



**Stanovení korelačních vztahů pro jehličnaté dřevo při  
měření pevnosti v tlaku podél vláken pomocí roztlačování  
čelistí ve vrtu**

Bakalářská práce

*Vedoucí práce:*  
Ing. Jan Baar, Ph.D.

*Vypracoval:*  
Pavel Brüstl

Prohlašuji, že jsem práci: Stanovení korelačních vztahů pro jehličnaté dřevo při měření pevnosti v tlaku podél vláken pomocí roztačování čelistí ve vrtu vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnici o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

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

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

V Brně dne:.....

.....

podpis

## **Poděkování**

Mé poděkování patří Ing. Janu Baarovi, Ph.D. za vedení, cenné rady a vstřícnost při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji také konzultantovi Ing. Michalu Kloiberovi, Ph.D. za poskytnuté informace a spolupráci. Dále také pracovníkům ústavu nauky o dřevě za ochotnou pomoc při laboratorním měření.

## **Abstrakt**

Jméno: Pavel Brüstl

Název: Stanovení korelačních vztahů pro jehličnaté dřevo při měření pevnosti v tlaku podél vláken pomocí roztláčování čelistí ve vrtu

Tato práce se zabývá zjištěním korelací mezi nově navrženým přístrojem pro měření konvenční pevnosti a modulu přetvárnosti v tlaku podél vláken oproti měření na vzorcích zkoušených podle evropských norem. Hlavním cílem bylo ověření přesnosti měření nově navrženého semidestruktivního přístroje, který pracuje na principu roztláčování čelistí v předem vyvrtaném otvoru a má plánované využití při in-situ měření kvality konstrukčních dřevěných prvků.

Provedeným výzkumem jsme zjistili velmi dobré korelační vztahy zejména u konvenční pevnosti s tlakem podél vláken a pevností v ohybu (korelační koef. 0,90–0,92)

V teoretické části je uvedena problematika týkající se testování dřeva a jeho pevnostní charakteristika. Dále jsou uvedeny výsledky a statistická vyhodnocení.

Klíčová slova: smrk, tlak, ohyb, semidestruktivní zařízení, in-situ měření

## **Abstract**

Name: Pavel Brüstl

Title: Determination of correlation relationships for conifer wood while measuring the strength in pressure along the fibers by pushing jaws inside predrilled hole

This thesis deals with finding correlations between newly designed device for measuring the convention strength in pressure and the modulus of deformation in a pressure along the fibers compared to measurements on samples tested according to european standards. The main objective was to verify the measurement accuracy of the newly designed semidestructive device which works on the principle of the mashing jaws in additionally drilled hole and has a planned usage for in-situ measurement of the quality of structural wood elements.

By done research we have found out very good correlated relationships, especially at convention strength with the pressure the ratio of fibres and strength in a bend (correlated coeff. 0,90-0,92).

The theoretical part includes issues related to the testing of wood and its strength characteristics. Afterwards, there are listed the results of a statistical evaluation.

Keywords: spruce, compression, bending, semidestructive device, in-situ measurement

# OBSAH

1	ÚVOD .....	1
2	CÍL PRÁCE .....	2
3	LITERÁRNÍ PŘEHLED .....	3
3.1	Mechanické namáhání dřeva.....	3
3.1.1	Pružnost dřeva .....	4
3.1.2	Modul pružnosti.....	4
3.1.3	Pevnost dřeva .....	6
3.1.4	Pevnost v tlaku .....	6
3.1.5	Pevnost v ohybu .....	7
3.2	Jehličnaté dřevo .....	8
3.3	Letokruhy.....	9
3.4	Hustota dřeva .....	10
3.5	Průzkum poškození dřeva .....	10
3.6	Nedestruktivní testování dřeva .....	11
3.6.1	Vizuální posouzení .....	11
3.6.2	Ultrazvuk .....	12
3.7	Semidestruktivní testování dřeva .....	12
3.7.1	Odporové vrtání.....	13
3.7.2	Zatlačování trnu.....	13
3.7.3	Roztlačování čelistí ve vrtu .....	14
4	MATERIÁL A METODIKA .....	17
4.1	Odběr zkušebních vzorků .....	17
4.2	Měření vzorků.....	18
4.2.1	Hustota a vlhkost .....	19
4.2.2	Roztlačovák .....	19
4.2.3	Pevnost v tlaku podél vláken a ohybu .....	20
4.3	Statistické vyhodnocení .....	21
4.4	Stanovení podílu letního dřeva .....	22
5	VÝSLEDKY .....	23
5.1	Popisná statistika.....	23
5.2	Konvenční pevnost .....	23
5.3	Modul přetvárnosti.....	25
5.4	Průměrná šířka letokruhu.....	27
5.5	Procentuální zastoupení letního dřeva .....	29
6	DISKUZE .....	31
7	ZÁVĚR .....	33
8	SUMMARY .....	34
9	LITERATURA .....	35

# 1 ÚVOD

Dřevo patří mezi nejčastěji používané stavební materiály a jeho využití v různých konstrukcích je známo již mnoho tisíciletí. S vývojem lidské společnosti se postupně zdokonalovaly technologie opracování, spojování a povrchové úpravy dřeva. Zdokonalovaly se rovněž konstrukční systémy, takže bylo možno lépe využít pevnostních vlastností dřeva. Zásadou svých vlastností, jako je malá hustota, ale zároveň vysoká pevnost, snadná opracovatelnost nebo nízká tepelná vodivost, je dřevo ve stavitelství používáno na širokou škálu konstrukčních prvků, jako například konstrukce krovů či stavebně truhlářských výrobků.

Dřevo nemá neomezenou životnost, a proto bývá za určitých podmínek znehodnocováno atmosférickými vlivy i rostlinnými a živočišnými organismy. Tímto procesem se snižuje pevnost a jiné mechanické i fyzikální vlastnosti dřeva. Pro zjišťování vlastností dřeva ve stavbě existuje speciální obor: diagnostika dřevěných konstrukcí, který je využívám převážně pro hodnocení zdravotního stavu dřevěných artefaktů nebo dřeva zabudovaného ve stavbách a při posuzování bezpečnosti a spolehlivosti stávajících dřevěných konstrukcí, především při změně užívání nebo přestavbě objektu. Důležitou součástí je diagnostika historických dřevěných staveb, kde je zájem o co nejmenší zásah do konstrukce stavby. Pro tyto účely slouží několik diagnostických metod, které poskytují požadované informace při vysoké šetrnosti k zachování původního dochovaného materiálu.

Základním posouzením dřeva je vizuální průzkum, což je nejjednodušší a nejstarší neinvazivní metoda. Tato metoda sice odhalí povrchové poškození dřeva, ale neumožňuje však přesnější určení celkového poškození, protože vnitřní rozsah poškození dřeva může být odlišný od vnějších projevů. Vizuální metodou se též nedají určit mechanické a fyzikální vlastnosti, které bývají podkladem projektantů pro návrh sanačního opatření.

Pro přesnější určení kvality konstrukčního dřeva se používají nedestruktivní a semidestruktivní přístroje, které dokáží buď samostatně, nebo jejich kombinací určit velice přesnou informaci o stavu zkoumaného dřeva. Pro semidestruktivní způsob testování dřeva byl na UTAM AV ČR vyvinut nový přístroj, který pracuje na principu roztlačování dřevních vláken ve vyvrtném otvoru, což poskytuje informaci o statickém a fyzikálně-mechanickém stavu zkoumaného prvku.

Tato bakalářská práce se bude zabývat výsledky z měření za účelem ověření funkčnosti nového semidestruktivního zařízení v porovnání se standardními destruktivními tlakovými zkouškami podle evropské normy.

## **2 CÍL PRÁCE**

Cílem této práce bude stanovení korelačních vztahů pro mechanické vlastnosti měřené pomocí nově sestrojeného semidestruktivního přístroje (konvenční pevnost a modul přetvárnosti v tlaku podél vláken) vyvinutého na UTAM AVČR oproti standardní pevnostní zkoušce na univerzálním zkušebním stroji dle norem (pevnost v tlaku podél vláken a v ohybu). Dále si klade za cíl vyhodnotit vliv podílu jarního a letního dřeva v letokruhu na mechanické vlastnosti měřené pomocí nově sestrojeného přístroje.



## 3 LITERÁRNÍ PŘEHLED

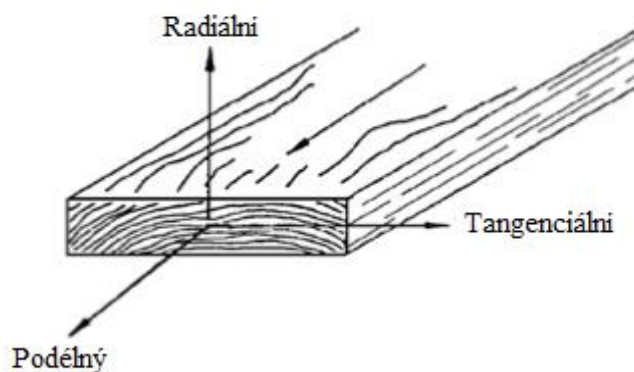
### 3.1 Mechanické namáhání dřeva

Mechanickým namáháním rozumíme proces, při kterém nastává interakce mezi mechanickými silami a ostatními činiteli namáhání se dřevem. Výsledkem tohoto procesu jsou dočasné anebo trvalé změny tvaru dřeva (Požgaj et al. 1997). Kaw (1997) uvádí mechanické namáhání jako vnější síly, které působí na těleso buď povrchově (např. ohyb) anebo tíhou tělesa (např. vlastní tíha stojícího vertikálního sloupu). Tyto síly jsou důvodem vnitřních sil v tělesech.

Mechanické namáhání je tedy stav, při kterém na dřevo působí vnější síly, které ho deformují v závislosti na míře vnitřního odporu jeho struktury. Reakce dřeva na mechanické namáhání nezávisí jen na vazbách chemických složek dřeva a jejich vzájemného spojení (celulózy, ligninu, hemicelulózy), ale často v rozhodující míře i na samotné geometrii tělesa. Struktura chemického složení dřeva se ze strany mechanického namáhání může studovat na třech úrovních, a to na makroskopické, mikroskopické a na úrovni mikroskopické stavby sahající až do struktury polymerů

Z chemického hlediska se dřevo skládá z celulózy, hemicelulózy a ligninu. Celulóza tvoří 43 až 52 % z hmotnosti jehličnatého dřeva a je základní strukturální složkou buněčných stěn dřeva. Řetězce celulózy v mřížce navzájem postranně drží sekundární vodíkové vazby, což je příčinou anizotropie pružných a pevnostních vlastností celulózy a tím pádem mají vliv i na celkové fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Hemicelulóza ovlivňuje chemické a fyzikální vlastnosti se zastoupením ve dřevě 20 až 30 %. Se stejnou procentuální hodnotou jako hemicelulóza je ve dřevě zastoupen lignin, který je důležitý pro zabezpečení zdřevnatění buněčných stěn a dodává dřevu pevnost, zejména v tlaku (Požgaj et al. 1997).

Dřevo může být popsáno jako ortotropní materiál, takže má jedinečné a autonomní mechanické vlastnosti ve třech vzájemně kolmých osách: podélná, radiální a tangenciální. Podélná osa L je rovnoběžná s vlákny, radiální osa R je kolmá k letokruhům (kolmo k vláknům v radiálním směru) a tangenciální osa T je kolmá k vláknům, ale tangenciální k letokruhům (Ross 2010).



**Obr. 1** Tři hlavní osy ve dřevě s ohledem na směr vláken a letokruhů (Ross 2010)

Mezi základní vlastnosti, které u dřeva sledujeme, patří jeho tvrdost, pružnost a pevnost. Těmito vlastnostmi se liší nejen listnaté dřevo od jehličnatého, ale i dřevo jednotlivých druhů dřevin. Tvrdost dřeva závisí na více faktorech, jako je třeba hustota či rovnoměrnost letokruhů nebo zda se jedná o jádro, které bývá tvrdší než dřevo bělové. Vliv má také složení letokruhu, kde letní dřevo je tvrdší než dřevo jarní (Havířová 2005).

### 3.1.1 Pružnost dřeva

Pružnost dřeva všeobecně definujeme jako schopnost dosáhnout původního tvaru po odstranění vnějších působících sil. Při měření deformací běžnými přístroji (např. tenzometry) je z makroskopického hlediska možné pružnost vnímat za zcela vratný děj, protože po uvolnění vnějších sil se těleso vrátí do původního tvaru. Pokud se jedná o submikroskopickou stavbu, tak zde už návratné procesy ve dřevní struktuře nemusí nastat. Z pracovního diagramu závislosti napětí na deformaci (viz obr. 2) bude pružnost dřeva pozorována na lineární části diagramu. Pružnost dřeva můžeme například určit modulem pružnosti a také mezí úměrnosti (Požgaj et al. 1997).

### 3.1.2 Modul pružnosti

Vyjadřuje vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím větší je modul pružnosti, tím větší napětí je potřeba pro způsobení deformace. U tahu, tlaku a ohybu bývá deformace po mez úměrnosti zpravidla lineární. Modul pružnosti v tahu a tlaku je možné charakterizovat jako podíl mezi napětím a podélnou deformací.

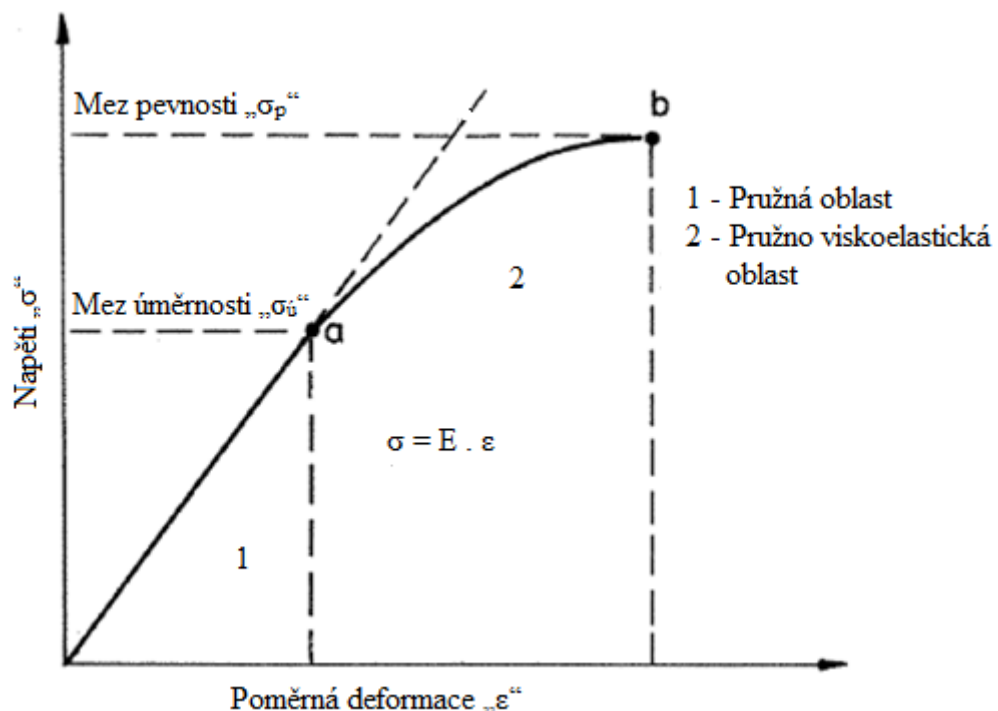
$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

Po úpravě dostáváme vzorec:

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

kde:  $E$  – modul pružnosti [MPa],  $F$  – síla působící na plochu  $S$  [N],  $l$  - původní délka, na které se měřila deformace [m],  $S$  – plocha [m<sup>2</sup>],  $\Delta u_1$  - absolutní deformace [m]

Při statických výpočtech dřevěných konstrukcí představuje modul pružnosti velmi důležitou hodnotu. Z průběhu pracovního diagramu napětí – deformace (tah, tlak, ohyb) vyplývá, že po mez úměrnosti jsou vztahy lineární a příslušná rovnice přímky má tvar  $y = k \cdot x$ . Pokud tento vztah převedeme na souřadnice deformace a napětí, tak rovnice přímky má tvar Hookova zákona. Hodnoty modulů pružnosti v tlaku ve směru vláken se pohybují od 11 000 MPa do 15 000 MPa (Požgaj et al. 1997).



Obr. 2 Obecný tvar pracovního diagramu pro dřevo, závislost mezi napětí a deformací (Požgaj et al. 1997)

Deformací rozumíme změnu tvarů a rozměrů dřeva, vyvolanou působením mechanických sil. Ve dřevě pozorujeme tři druhy deformace, a to pružnou deformaci, deformaci pružnou v čase a plastickou deformaci. Celý proces deformace dřeva rozdělujeme

na dvě části a to na pružnou oblast, která se vyskytuje po mez úměrnosti a je u ní předpoklad pouze pružné deformace, čili se jedná o návratnou změnu dřeva po odstranění vnějších sil. Druhá oblast je pružno-viskoelastická, kde vznikají kromě pružných deformací i deformace pružné v čase a plastické deformace, což způsobuje již nevratné změny ve dřevě. Pružno-viskoelastická oblast je zpravidla od meze úměrnosti po mez pevnosti.

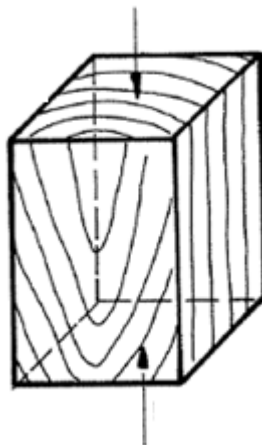
Mez úměrnosti je bod odklonu od lineární části v pracovním diagramu, který je způsoben především nárůstem plastických deformací a deformací pružných v čase. Mez pevnosti je maximální hodnota napětí, při které ještě nedošlo k porušení celistvosti materiálu a vypočítá se jako podíl síly  $F$  a průřezu zatěžované plochy  $S$ , na kterou síla působí (Požgaj et al. 1997).

### **3.1.3 Pevnost dřeva**

Pevnost dřeva vyjadřuje jeho schopnost přenášet napětí, které ve dřevě vzniká v důsledku zatížení. Dle typu konstrukce a způsobu zatížení a tím i vzniklého namáhání rozlišujeme pevnost dřeva v tahu, tlaku, ohybu a smyku. Jako pevnost dřeva se označuje takové napětí, u kterého dojde k porušení dřeva, tedy k jeho trhání, lámání, štípaní apod. Pevnost dřeva je závislá na jeho kvalitě, druhu dřeva, hustotě, objemové hmotnosti a na jeho vlhkosti (Havířová 2005). Dřevo s pravidelnou strukturou a menším počtem vad má vyšší pevnost. Stejně tak je důležitý úhel, který svírá působící síla se směrem vláken, protože dřevo má výrazně odlišnou pevnost ve směru vláken a kolmo na vlákna. Ve směru napříč vláken jsou hodnoty výrazně nižší, než ve směru vláken. Také při zatížení v průběhu času vykazuje dřevo výrazný pokles pevnosti, kdy při dlouhodobém zatěžování klesá pevnost dřeva přibližně na 60 % krátkodobé pevnosti dřeva (Vaverka et al. 2008).

### **3.1.4 Pevnost v tlaku**

Pokud vnější síla tlačí na průřez, vzniká tlakové namáhání. Napětí a deformace jsou označeny záporným znaménkem. V případě tlaku se vlákna ve dřevě stlačují a po dosažení meze pevnosti se roztlačí. Pevnost v tlaku podél vláken patří mezi významné a charakteristické tlakové pevnosti v porovnání s ostatními směry zatížení.



**Obr. 3 Znárodnění působení tlaku rovnoběžně s vlákny (Požgaj et al. 1997)**

Kvůli poměrně vysoké pevnosti má tlak rovnoběžně s vlákny široké uplatnění, jako jsou např. kůly, vzpěry, různé části prvků nosníků, atd. Velikost deformace při tlaku podél vláken u jehličnatých dřevin převážně závisí na vzájemném spojení tracheid, především letních. Pevnost vláken převážně ovlivňuje střední vrstva  $S_2$  sekundární stěny. Můžeme předpokládat, že napětí vznikající působením vnějších sil ve větší míře přenáší elementy s hrubšími stěnami (u jehličnatých dřevin letní tracheidy a u listnatých dřevin libriformní vlákna). Pevnost v tlaku podél vláken se u našich hospodářsky významných dřevin pohybuje v rozpětí 30 – 70 MPa (Požgaj et al. 1997)

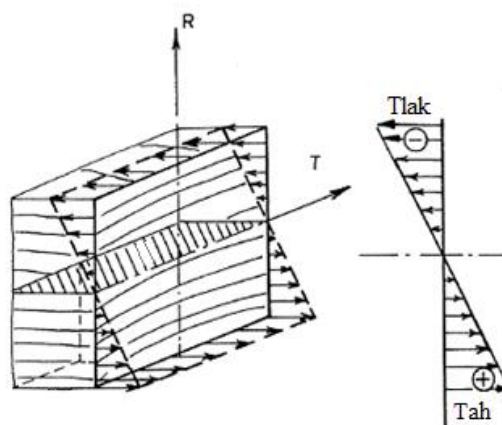
### **3.1.5 Pevnost v ohybu**

Pevnost dřeva v ohybu kolmo na vlákna má široké uplatnění v praxi, kdy se objevuje např. u nosníků, trámů, apod. Jak zatížíme ohybem dřevěný nosník, dochází k deformaci, přičemž na vnitřní straně vzniká napětí tlakové a na vnější napětí tahové. Na příčném řezu se nachází nedeformovatelná část, kterou nazýváme neutrální osa (viz obr. 4). Čím víc se vzdalujeme od neutrální osy, tím víc se vrstvy deformují a vzniká větší napětí a tím pádem jsou největší hodnoty ohybu v krajních vláknech (Požgaj et al. 1997).

Pevnost v ohybu se může lišit mezi dřevy o více jak 10-ti násobek. Rozdíly nejvíce způsobuje odlišná hustota dřeva, dále také procentuální zastoupení letního a jarního dřeva a šířka letokruhů (Holan 2008).

Při použití dřeva na nosné účely je důležité stanovit výpočtovou pevnost. S ohybem se zabýváme kvůli častému zatížení v dřevěných konstrukcích. Pokud napětí ve dřevě překročí mez úměrnosti a blíží se k napětí na mezi pevnosti, krajní vlákna na tlakové straně

se deformují tak, že vzniká trvalá plastická deformace a následně se materiál poruší. Vlákna se deformují, až se těleso zlomí.



**Obr. 4** Rozložení napětí po výšce tělesa u radiálního ohybu kolmo na vlákna. R – radiální směr, T – tangenciální směr (Požgaj et al. 1997)

Charakter porušení u zatížení dřeva ohybem napříč vláken může být proměnlivý a závisí na geometrickém tvaru tělesa, rozložení působících vnějších sil, rozměrech, ale i na struktuře dřeva. Průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu se pro naše dřeviny pohybuje v rozmezí 50–130 MPa při vlhkosti okolo 12 % (Požgaj et al. 1997).

Autor	$\sigma$ [MPa] při $w = 12\%$	
	podél vláken	ohyb
Ugolev, 1975	44,4	79,5
Lexa, 1952	-	64,75
Požgaj et al., 1997	34,1	70,4
Kollman, 1951	51,28	-
Brumovský, Rada, 1991	50	78

**Tab. 1** Pevnost podél vláken a v ohybu u dřeva smrku (*Picea abies*) dle jednotlivých autorů

### 3.2 Jehličnaté dřevo

Základním stavebním prvkem jehličnatých dřevin jsou dva druhy buněk: tracheidy a parenchymatické buňky (Brumovský a Rada 1991). Jarní a letní tracheidy představují přibližně 90 až 95 % objemu dřeva a plní funkci pevnostní a vodivou. Jsou dlouhé 2 až 5 mm a široké 0,015 až 0,045 mm (Reinprecht 2008). Brumovský a Rada (1991) uvádí délku

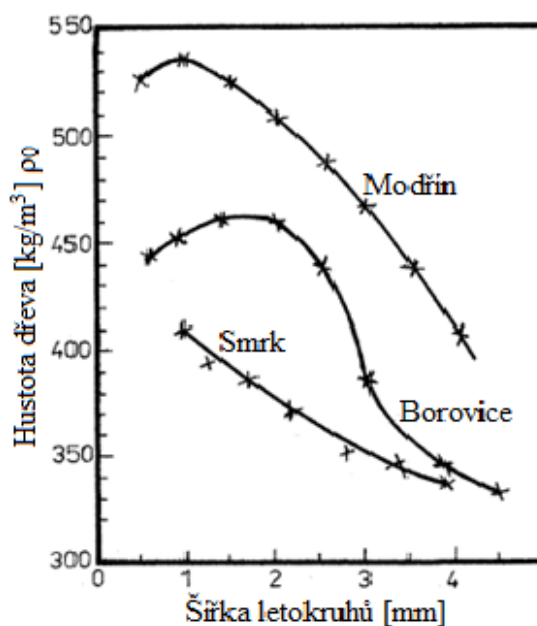
tracheid u smrku 1,3 až 4,3 mm a tloušťku 0,015 až 0,05 mm. Dřevní parenchym je zejména v dřevných paprscích a má funkci zásobní (Žák a Reinprecht, 1998)

### 3.3 Letokruhy

Letokruh je vrstva dřeva, tloušťkový přírůst vytvořený za jeden rok. Letokruh se vytváří ve vegetačním období periodickou činností dělivých buněk (kambia) a jeho vrstva obaluje kmen, větve a kořeny (Požgaj et al. 1997). Typický letokruh se skládá ze dvou samostatných částí rozdílných barvou i texturou. Dřevo tvořené v rané fázi růstu je obvykle světlejší, měkčí a nazýváme ho jarní dřevo. Následovně se tvoří letní dřevo, které bývá tmavší a tvrdší. Letní dřevo má také rozhodující vliv na některé mechanické vlastnosti dřeva (Bodig a Jayne 1993).

Jehličnaté dřeviny mají výraznou vrstvu letního dřeva a zřetelný rozdíl mezi jarním a letním dřevem, takže jejich letokruhy jsou pozorovatelné nejzřetelněji. Letní dřevo má dvakrát až třikrát vyšší hustotou, než dřevo jarní (Požgaj et al. 1997).

Šířka letokruhů i zastoupení jarního a letního dřeva jsou velmi variabilní, ovlivněné celou řadou vnitřních faktorů (genetická dispozice, růstové hormony, atd.), ale zejména vnějších faktorů (klimatické, stanovištní, půdní, nadmořská výška aj.). Šířka letokruhů i zastoupení jarního a letního dřeva ovlivňují fyzikální i mechanické vlastnosti dřeva a tím pádem i jeho praktické použití (Reinprecht 2008).



Obr. 5 Závislost hustoty dřeva na šířce letokruhů u některých jehličnatých dřevin (Trendelburg, 1939)

U většiny našich hospodářsky významných dřevin se šířka letokruhu pohybuje převážně mezi 1 až 5 mm. Šířka stejného letokruhu je v různých částích stromu rozdílná. Větve mají užší letokruhy jak kmen. Vliv šířky letokruhů na hustotu dřeva jehličnatých a listnatých dřevin je rozdílný. Hustota dřeva borovice stoupá s poklesem šířky letokruhů v důsledku vyššího podílu letního dřeva. U listnatých dřevin s výjimkou některých roztroušeně pórovitých dřevin, převládá opačná tendence. Z toho vyplývá, že u jehličnatých dřevin s věkem hustota stoupá a u listnatých naopak klesá (Požgaj et al. 1997).

### **3.4 Hustota dřeva**

Udává hmotnost jednotkového objemu dřeva, přičemž se nejčastěji vyjadřuje v  $\text{kg/m}^3$  nebo  $\text{g/cm}^3$ . Hustota dřeva je ukazatelem vhodnosti použití dřeva na takové účely, kde se vyžaduje například nízká hmotnost při vysoké pevnosti anebo pružnosti (konstrukční prvky). Hustota dřeva je důležitým faktorem, který přímo ovlivňuje pevnost dřeva. Uvádí se, že čím vyšší je hustota dřeva, tím jsou jeho pevnostní vlastnosti lepší a tím je i dřevo kvalitnější (Požgaj et al. 1997). Gryc et al. (2009) uvádí jako průměrnou hustotu pro smrk při vlhkosti 12%  $450 \text{ kg/m}^3$ .

### **3.5 Průzkum poškození dřeva**

Dochované historické dřevěné konstrukce patří mezi působivé důkazy o řemeslných a stavebně technických dovednostech našich předků. Z toho důvodu je zařazujeme i do našeho kulturního dědictví. Pochopení stavebních technik nám pak poskytne důležité informace použitelné pro přestavby nebo pro predikci nové dřevěné konstrukce. Dřevo používané ve významných historických stavbách může mít zhoršený zdravotní stav vlivem biotických či abiotických činitelů. Výzkum na historických stavbách se také zaměřuje na stav objektu, biologický útok a podporu preventivního opatření. Při detekci problému v dřevěných konstrukcích je žádoucí, aby se postupovalo dle doporučené metody (Kotlíková et al. 2008).

Pokud již došlo k napadení zabudovaného dřeva houbami a hmyzem, v jistých mezích je ještě stále možná úspěšná sanace a ochrana takového dřeva. Sanací a ochranou shnilého dřeva se zároveň zlepší i zdravotní stav a hygienické podmínky v takto poškozených bytových prostorách. (Např. výskyt dřevomorky vyvolává řadu specifických onemocnění hlavně horních cest dýchacích a alergie.) K tomu, aby se mohlo přistoupit k sanaci a ochraně dřeva ve stavbě, je nutné nejprve přesně zjistit druh škůdce, rozsah a



stupeň napadení. Posouzení napadení dřeva se musí provést na odpovídající odborné úrovni, a to komplexně, nezávislými odborníky (Žák a Reinprecht 1998).

Největším nedostatkem stavebně-technického výzkumu pro dřevěné historické stavby je nevyužití moderních diagnostických metod. Běžný průzkum je založen na smyslových orgánech posuzující osoby, což je v této době nedostačující. Tím pádem je běžný odhad poškození bez použití moderních diagnostických nástrojů velmi subjektivní. Stavebně technický průzkum by měl být založen na základě diagnostických technik, které mohou být rozděleny na destruktivní, semi-destruktivní a nedestruktivní (Kotlínová et al, 2008). Použití přístrojových metod není vždy nezbytné pro určení poškození a rozsah hnilobného stupně poškození dřeva, umožňuje však bez pochyby důkladnější průzkum kvality dřeva a poruch konstrukce (Reinprecht a Štefko 2000)

### **3.6 Nedestruktivní testování dřeva**

Nedestruktivní (neinvazivní) testování dřeva má svůj původ při nutnosti zkoumání stavu dřevěných prvků bez jejich zničení. Vývoj vědeckých nedestruktivních metod byl na počátku 20. století s rozvojem přístrojů a vybavení na měření vlastností dřeva (Bucur 2003). Také Kotlínová et al. (2008) uvádí, že nejdůležitějším způsobem kontroly v oblasti stanovení a vyhodnocení aktuálního stavu historického objektu je použití nedestruktivní diagnostické metody v zájmu o minimální zásah do historické stavby.

Mezi nedestruktivní testování dřeva patří například vizuální posouzení, šíření elastických vln, radiografie, georadar a další (Kloiber a Drdáký 2015).

#### **3.6.1 Vizuální posouzení**

Nejdříve se nedestruktivně dřevo hodnotí pomocí vizuální prohlídky, kdy můžeme detekovat biologickou degradaci (Bucur 2003). Problém ovšem nastává ve chvíli, kdy je potřeba přesně definovat celkové poškození jednotlivých prvků konstrukce, tzn. identifikovat rozsah vnitřního poškození, lokalizovat přechod mezi zdravou a již poškozenou částí, eventuálně určit mechanické a fyzikální vlastnosti, které požadují projektanti jako podklad pro návrh sanačních opatření. Nicméně takové návrhy nelze obvykle provádět jen na základě vizuálního průzkumu, ale je nutné požadovat zapojení především nedestruktivních nebo semidestruktivních přístrojů, které dokáží jednotlivě nebo ve vzájemné kombinaci dvou i více zařízení poskytnout přesnou informaci o stavu posuzované památkové konstrukce (Kloiber a Bláha 2005).

Úspěšné výsledky vizuálního průzkumu tedy závisí hlavně na zkušenostech posuzovatele, čistoty a stavu zkoušeného materiálu, kvality optického nástroje a vhodného osvětlení (Mix 2005).

### **3.6.2 Ultrazvuk**

Pomocí ultrazvukového přístroje je možno změřit čas průchodu zvukových vln mezi zvukovými sondami a rychlost zvukových vln. Z těchto veličin je možno odvodit hustotu anebo pevnostní a přetvárné vlastnosti daného materiálu (Lokaj et al. 2007).

Čas přechodu ultrazvukové vlny závisí na druhu dřeva a jeho hustotě. Vlna prochází zónami s vyšší hustotou dřeva. Při přítomnosti defektu se čas přechodu zvukové vlny prodlužuje. Lze detekovat biotické poškození, jako je dřevokazná hniloba a hmyz, i přirozené vady, jako jsou suky a trhliny

Ultrazvuk nachází uplatnění především při stavebnětechnických průzkumech dřevěných konstrukcí, kde je potřeba v poměrně krátkém čase, za přijatelné finanční náklady, provést relativně přesné zjištění přechodu mezi poškozenou a zdravou částí, tak aby byl zachován co největší podíl původního materiálu. (Kloiber a Kotlíková 2007).

## **3.7 Semidestruktivní testování dřeva**

U této metody testování dřeva se hodnotí odolnost (odpor) vůči vnikání pracovních částí přístrojů, jako např.: vrtáky, jehly, trny, apod. do jeho struktury, což umožňuje charakterizovat určité mechanické vlastnosti a hustotu (Kasal a Tannert 2010).

Semidestruktivní metody (částečně invazivní) jsou založeny na vzájemných vazbách mezi hustotou anebo tvrdostí dřeva a odporem dřeva vůči vnikání pracovních částí měřících přístrojů. Tvrdost dřeva se liší v závislosti na druhu dřeviny, podílu jarního a letního dřeva a také dle typu a stupně poškození dřeva hnilobou, hmyzem, apod.

Odpor dřeva je definovaný jako odpor vůči vtláčení, obvykle kovového tenkého materiálu. Má tedy i souvislost se stlačením, stříháním vláken i rázové houževnatosti. Tento odpor dále vykazuje pozitivní korelaci s hustotou dřeva a má přímou souvislost s pevnostními vlastnostmi daného materiálu (Piazza a Riggio 2006).

Mezi používané semidestruktivní metody patří například zarážení trnu, odporové vrtání, zatlačování trnu, nebo i nově navržený přístroj pro roztlačování čelistí ve vrtu (Kloiber a Drdácký 2015).

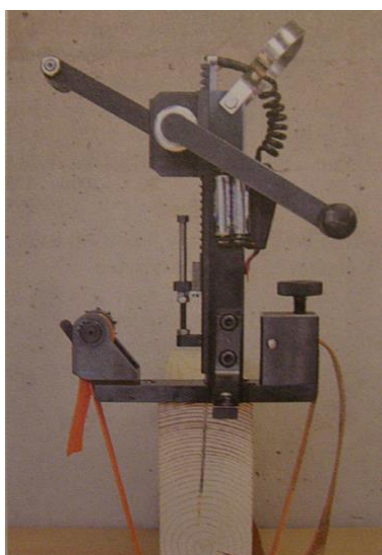
### 3.7.1 Odporové vrtání

Principem této metody je měření mechanického odporu materiálu při vrtání (Kloiber a Drdácký 2015). Mezi přístroje měřící pomocí odporového vrtání patří Resistograf, u kterého se odolnost proti vrtání měří obvykle v radiálním směru. Je vhodný pro určení vnitřního poškození, což ale vyžaduje delší dobu vrtání. Vícenásobný zásah může být omezující z důvodu narušení povrchu a tím i estetického znehodnocení materiálu. Vzhledem k malému průměru pracovní části, která má tím pádem nižší tuhost, může dojít k jejímu ohybu. Při nesprávném měření se vrták může ohnout a způsobit odchylku měření.

Resistograf má elektrický motor napájený bateriemi, což je velmi užitečné pro použití přímo na stavbách (Kloiber a Kotlínová 2007).

### 3.7.2 Zatlačování trnu

Zatlačování trnu je prováděno přístrojem, který umožňuje stanovení mechanického odporu vůči pozvolnému vnikání tělesa do dřeva, a to do hloubky odpovídající rozměrům běžných dřevěných konstrukčních prvků, využitelný pro následné nepřímé stanovení hustoty a mechanických vlastností dřeva. Přístroj lze k měřenému prvku připevňovat různými způsoby, nejčastěji textilním popruhem nebo opásáním pomocí válečkového řetězu. Po upevnění k měřenému prvku je kolmo k základně přístroje do dřeva vtlačován trn. Dřík trnu má průměr 2,5 mm a je zakončen půlkulatým hrotem o průměru 3 mm. Při vtlačování trnu do dřeva je zaznamenávána působící síla, která je vztažena k měřené dráze (Kloiber a Drdácký 2015).



Obr. 6 Přístroj pro měření mechanického odporu dřeva při zatlačování trnu (Kloiber a Drdácký 2015)

### 3.7.3 Roztlačování čelistí ve vrtu

Mezi dosavadními přístroji metod chybělo řešení, které by umožňovalo měřit mechanické vlastnosti dřeva jako modul pružnosti nebo pevnost rovnoběžně s vlákny. Toto měření nyní umožňuje zkouška roztlačování ve vrtu (Kloiber a Drdácký 2015).

Nový diagnostický přístroj (dále též „roztlačovák“) je určen k zjišťování mechanických vlastností dřeva pomocí šetrně destruktivního měření při zatěžování miniaturním lisem, vloženým do vyvrtaného otvoru. Zařízení lze použít jak v laboratoři, tak přímo v terénu pro hodnocení stavu a kvality dřeva. Při aplikaci je měřena závislost deformace na působícím napětí při roztlačování symetricky uspořádaných tlačných čelistí ve vyvrtaném radiálním otvoru o průměru 12 mm (Kloiber et al. 2014).

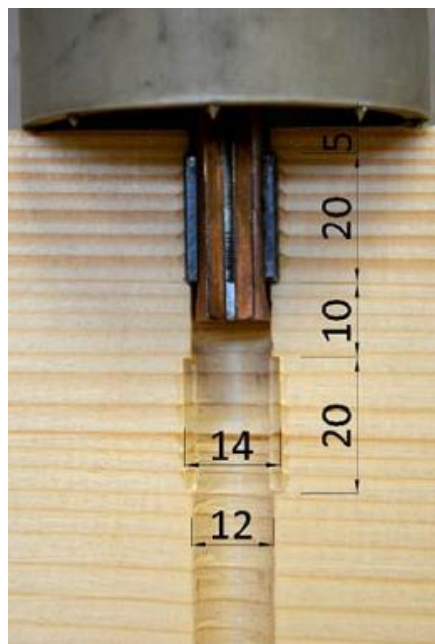


Obr. 7 Nově sestrojený přístroj k semidestruktivnímu testování dřeva

Výhodou přístroje je možnost plynulého snímání síly a posunutí při roztlačení čelistí v různých hloubkách odpovídajících požadavkům na hodnocení prvků konstrukcí běžných dimenzí. Přístroj se na testovaný objekt přikládá pomocí válcovitého pouzdra, které umožňuje měření ve čtyřech polohách předem vyvrtaného otvoru. Aretace pouzdra je zajištěna pomocí dvou rýhovaných šroubů, pro polohy: (hloubka vývrtu) 5-25, 35-55, 65-85, 95-115 mm. Po zasunutí měřicí části přístroje do vyvrtaného otvoru a přiložení na testovaný objekt jsou pomocí táhla s rozvracím klínem roztlačovány zakulacené čelisti (viz obr. 8) do stěn vyvrtaného otvoru. Maximální hloubka zatlačení čelistí je na obou stranách 1,5 mm.



**Obr. 8 Detail čelistí nově sestrojeného přístroje**



**Obr. 9 Detail táhla s rozevřacím klínem a zakulacenými čelistmi (Kloiber a Drdácký 2015).**

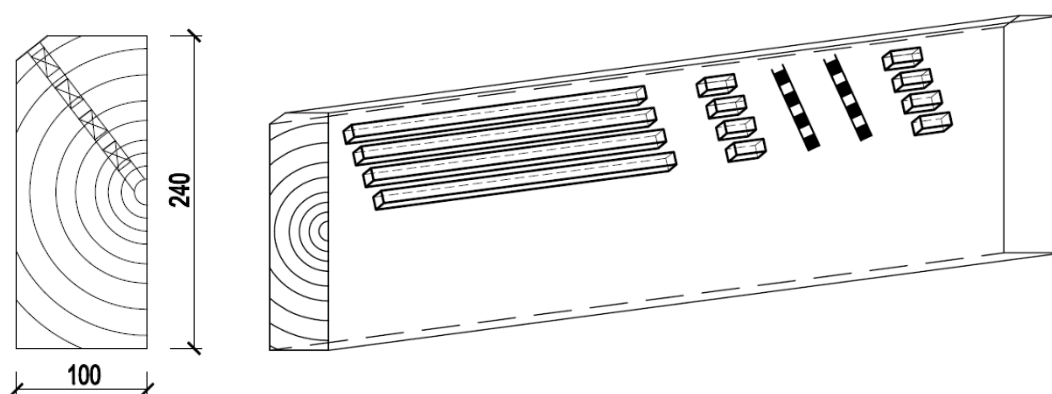
Pohon táhla je zajištěn přes šroub s maticí (popř. hřeben se šnekem, nebo hydraulickým obvodem). Zdrojem síly je akumulátorová vrtačka s planetovou převodovkou, nicméně může být využit i manuální pohon pomocí jednoruční kliky. Zakulacené čelisti mají šířku 5 mm a délku 20 mm. Čelisti jsou vyrobeny ze speciální nástrojové oceli. Součástí čelistí jsou pružná ramena, jejichž pohyb při roztlačení je zajištěn pomocí rozvřacího bronzového klínu osazeného na dolním konci táhla pomocí kolíku a šroubu. Vrcholový úhel klínu je  $15^\circ$ . Tento úhel není samosvorný a pro odlehčení čelistí stačí uvolnění roztlačovací síly.

Průběžně je snímána a zaznamenána působící síla při vytahování táhla, která je kalibrovaná na skutečnou sílu při roztlačování čelistí a následně simultánně vztažena k měřené dráze roztlačení (posuvu) čelistí. Měření síly probíhá pomocí siloměru vloženého mezi horní hranu táhla s kloubem a šroub táhla. Snímání posuvu zajišťuje dvojice planžet s tenzometrickým měřením ohybové deformace vyvolané kuželovou částí šroubu táhla, která bude úměrná osovému posuvu a tudíž i roztlačení čelistí. Signály jsou z přístroje bezdrátově přenášeny do měřicího přenosného počítače, kde jsou zpracovány. (Kloiber a Drdácký 2013).

## 4 MATERIÁL A METODIKA

### 4.1 Odběr zkušebních vzorků

Měřené vzorky dřeva byly získány z devatenácti stromů smrku (*Picea abies*), ze kterých byly vyřezány fošny o příčných rozměrech 100×240 mm a délce 1 m. Po vysušení a klimatizování na vlhkost 12 %, byly v každém výřezu vyvrtány 2 otvory pomocí vrtáku o průměru 12 mm. Vrtání bylo prováděno v místě kolmo na směr vláken v radiálním směru se vzdáleností otvorů 100 mm. Čistě radiálního směru bylo dosaženo odfrézováním hrany, čímž vznikla tangenciální plocha (viz obr. 10). Hloubka vrtu byla 130 mm, aby bylo možno provést měření pomocí roztlačováku ve čtyřech polohách (viz obr. 12), které jsou v rozmezí: 5–25 mm, 35–55mm, 65–85mm a 95–115 mm. Celkový počet měření byl tedy proveden ve 152 pozicích (19 výřezů po dvou vrtech ve čtyřech úrovních)



Obr. 10 Zleva: Čelní pohled na původní fošnu a směr vrtu; poloha zkušebních vzorků v původním výřezu (zleva: ohybové vzorky, tlakové vzorky, 2 vrty pro roztlačovák a znovu tlakové vzorky)

K ověření vztahu měřených parametrů pomocí roztlačováku a parametrů získaných při standardních zkouškách mechanických vlastností dřeva byly vyrobeny tlakové a ohybové vzorky, které byly získány z původních výřezů ve shodných hloubkových pozicích měřených pomocí zkoušky roztlačování ve vrtu (viz obr. 10). Pro každou úroveň měřenou roztlačovákem byly odebrány vždy dva tlakové vzorky o rozměrech 20×20×30 mm a jeden ohybový vzorek o rozměrech 20×20×300 mm. Vzdálenost mezi jednotlivým odběrem vzorků v podélném směru byla minimálně 50 mm. Veškeré vzorky i otvory byly vybírány v takovém místě výřezu, aby následné měření neovlivňovali vady dřeva. Vzorky byly vyráběny ve spolupráci s CET (Centrum Excellence Telč) a laboratoří mobilní diagnostiky a podpory památkové péče. Odběr zkušebních vzorků byl prováděn dle ČSN EN 326-1.



**Obr. 11 Stojan s vrtačkou pro vyvrtání otvoru k měření roztláčovákem**



**Obr. 12 Zkouška roztláčování ve vrtu prováděná v radiálním směru**

## 4.2 Měření vzorků

Měření bylo celkem prováděno na 152 tlakových vzorcích, dle stejného počtu měření pro roztláčovák. Ohybových vzorků bylo měřeno pouze 76, kdy pro každou hloubkovou úroveň bylo vyrobeno po jednom vzorku.

Veškeré hodnoty kromě ohybových vzorků, byly zprůměrovány za jednu hloubkovou úroveň, takže se v konečné fázi počítalo u všech parametrů se 76 hodnotami.

Pro většinu grafů v závislosti na pevnosti či modulu, se vyskytují hodnoty jak průměrné za hloubkovou úroveň (76 hodnot), tak i hodnoty průměrné za celý vzorek (19 hodnot).



#### 4.2.1 Hustota a vlhkost

Všechny vzorky byly před vlastním testováním změřeny posuvným měřidlem a zváženy digitální váhou s přesností na dvě desetinná místa. Hustota vzorků byla vypočítána pomocí vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

kde:  $\rho$  – hustota [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $m$  – hmotnost [kg],  $V$  – objem vzorku [ $\text{m}^3$ ]

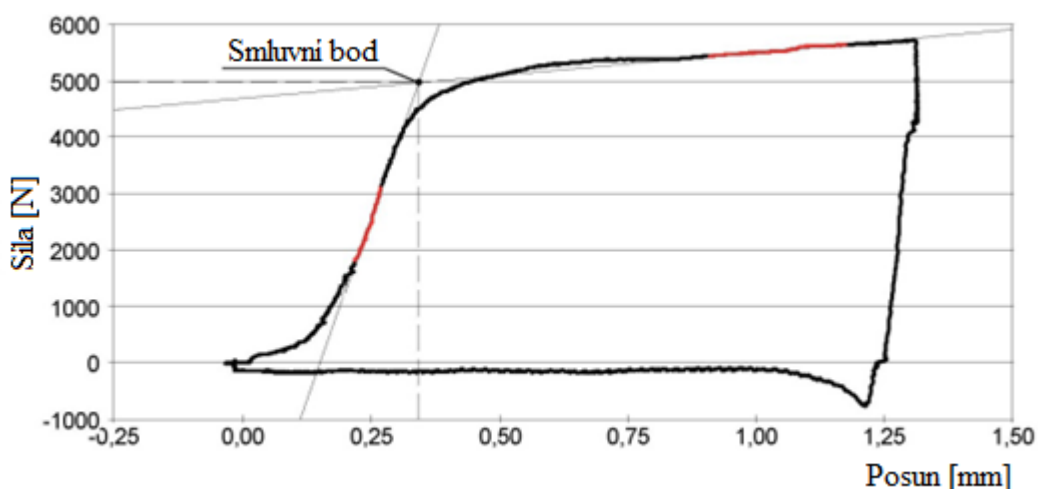
Dále byla zjišťována vlhkost vzorků, které se po provedení zkoušky vložily do sušárny a při teplotě  $103\text{ }^\circ\text{C}$  se sušily do absolutně suchého stavu a následně byla vypočítána jejich původní vlhkost pomocí vztahu:

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100$$

kde:  $w$  – vlhkost [%],  $m_w$  – hmotnost vlhkého vzorku [g],  $m_0$  – hmotnost suchého vzorku [g]

#### 4.2.2 Roztlačovák

U roztlačováků byly mechanické vlastnosti určovány pomocí pracovního diagramu se záznamem síly, působící při vytahování táhla. V pracovním diagramu byla na ose x znázorněna vzdálenost posunutí při pohybu čelistí a na ose y byla síla potřebná pro jejich zatlačení. Veškeré potřebné hodnoty byly převzaty z příslušného softwaru z měřicího počítače



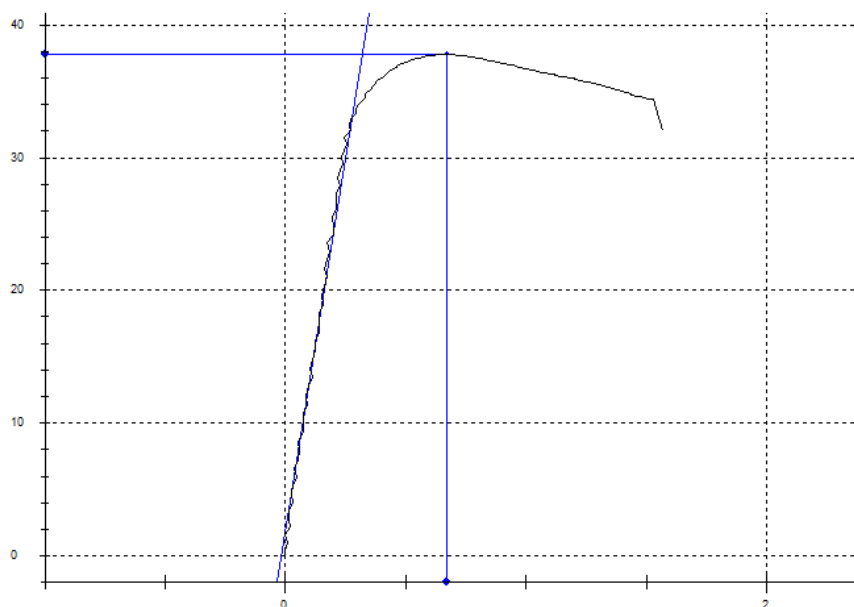
Obr. 13 Pracovní diagram: záznam síly při zkoušce roztlačování ve vrtu vztážené k měřené dráze roztlačení čelistí (Kloiber a Drdáký 2013)



Maximální síla byla stanovena z průsečíku přímek, které znázorňovaly tečny z elastické a plastické části v pracovním diagramu. Průsečík přímek je nazýván jako smluvní bod (viz obr. 13). Konvenční pevnost ( $C\sigma_{C(L)}$ ) se stanovila z podílu mezního zatížení a plochy zatlačovaných čelistí. Jelikož není možné přímo z pracovního diagramu stanovit modul pružnosti, tak se ze sklonu přímky částí záznamu síly a deformace, stanovil modul přetvárnosti ( $MOD_{C(L)}$ ).

#### 4.2.3 Pevnost v tlaku podél vláken a ohybu

K ověření přesnosti hodnot z roztlačováku byly určeny pro tlakové vzorky následující parametry: hustota dřeva ( $\rho$ ), pevnost v tlaku podél vláken ( $\sigma_{C(L)}$ ) a modul pružnosti v tlaku podél vláken ( $MOE_{C(L)}$ ). Pro ohybová tělíska to byly: pevnost v ohybu ( $MOR_B$ ) a modul pružnosti v ohybu ( $MOE_B$ ). Ohyb byl proveden v radiálním směru. Tyto parametry byly zjištěny pomocí testování destruktivními testy na univerzálním zkušebním stroji Zwick Z050 (dále též „trhačka“) a následným vyhodnocením výsledků softwarem TestXpert v 11.01. Tlakový test byl proveden v souladu s národními a evropskými normami ČSN 49 0110. Test v ohybu byl proveden dle normy ČSN 49 0115.

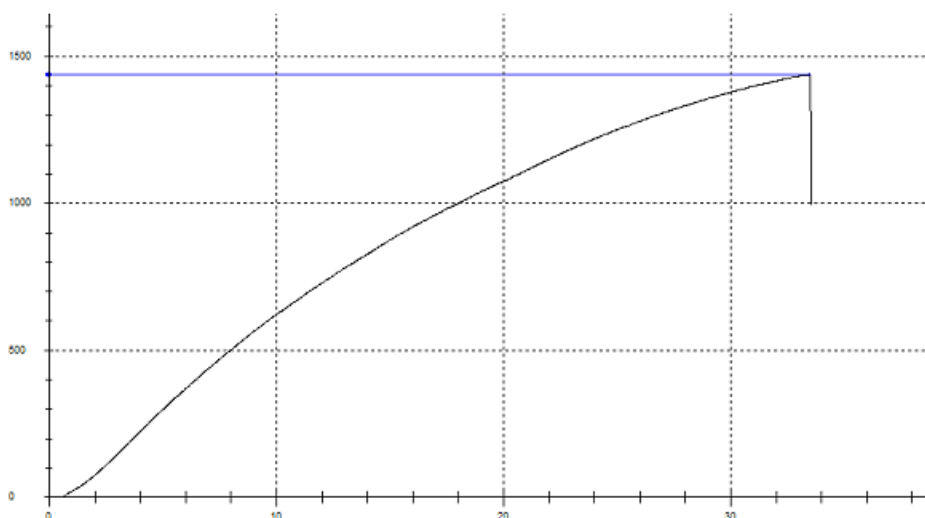


**Obr. 14 Pracovní diagram: průběh tlakové zkoušky u jednoho z měřených vzorků v závislosti napětí [MPa] na podélné deformaci [-]**

Měřené hodnoty u tlakové zkoušky, byly zjišťovány pomocí pracovního diagramu, pomocí softwaru TestXpert v 11.01. Jedinou hodnotu, která byla vypočtena dodatečně, je mez pevnosti v tlaku podél vláken, která se vypočítá dle vztahu:

$$\sigma = \frac{F}{a \cdot b}$$

kde:  $\sigma$  – mez pevnosti [N/mm<sup>2</sup>],  $F$  – maximální zatížení [N],  $a$ ,  $b$  – rozměry průřezu zkušebního tělesa, na který zatížení působí [mm].



**Obr. 15 Pracovní diagram: průběh ohybové zkoušky u jednoho z měřených vzorků v závislosti síly [N] na čase [s]**

U ohybové zkoušky byly veškeré potřebné hodnoty získány ze softwaru TestXpert v 11.01.

### 4.3 Statistické vyhodnocení

Pro veškeré neměřené hodnoty bylo provedeno stanovení základní popisné statistky, kde se uvedl průměr, medián, směrodatná odchylka, variační koeficient a minimální a maximální hodnoty pro veškeré parametry

Pro zjištění závislostí mezi měřenými parametry bylo použito korelační analýzy.

#### **4.4 Stanovení podílu letního dřeva**

Podíl letního dřeva na zkušebních vzorcích se měřil pomocí speciálního měřicího stolu Timetable TT-60-0-100/10, který byl propojený s počítačem. Stůl obsahoval posuvný šroubový mechanismus a impulsmetr, kterým se zaznamenával interval posunu desky stolu a tím pádem i šířka letokruhu. Dále byla nad deskou stolu umístěná na stativu stereolupa s nitkovým křížem, kterou byl sledován vzorek. Šířka jarního a letního dřeva v jednotlivých letokruzích byla měřena s přesností na 0,01 mm. Následně byly šířky letokruhů zpracovány v počítači v tabulkového editoru Microsoft Excelu.

V Microsoft Excelu jsme následovně z naměřených údajů vypočítali průměrnou šířku letokruhu a procentuální zastoupení letního dřeva ve vzorku.

## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Popisná statistika

Základní popisnou statistiku měřených parametrů nám zobrazují tabulky 2–5. Tato statistika byla vytvořena z veškerých zjištěných hodnot. Naměřené hodnoty odpovídají normálnímu rozdělení, což bylo ověřeno pomocí histogramu.

	$\sigma_{C(L)}$ [MPa]	$MOE_{C(L)}$ [MPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
průměr	37,7	13015	467
medián	36,8	12967	459
směr.odch.	6,3	3655	70
var. koef.	16,8	28	15
min	25,3	5853	325
max	51,7	27429	665

**Tab. 2 Trhačka - tlak podél vláken**

kde:  $\sigma_{C(L)}$  – tlak podél vláken,  $MOE_{C(L)}$  – modul pružnosti v tlaku podél vláken,  $\rho$  – hustota

	$C\sigma_{C(L)}$ [MPa]	$MOD_{C(L)}$ [MPa]
průměr	68,6	27601
medián	67,5	27682
směr.odch.	10,3	8617
var. koef.	15,0	31
min	46,5	11625
max	99,3	48080

**Tab. 3 Roztlačovák**

kde:  $C\sigma_{C(L)}$  – konvenční pevnost,  $MOD_{C(L)}$  – modul přetvárnosti

	$MOR_B$ [MPa]	$MOE_B$ [MPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
průměr	66,0	8036	472
medián	65,1	8034	465
směr.odch.	10,4	1348	66,3
var. koef	16	17	14
min	44,6	5014	331
max	86,0	11122	665

**Tab. 4 Trhačka – ohyb**

kde:  $MOR_B$  – pevnost v ohybu,  $MOE_B$  – modul pružnosti v ohybu,  $\rho$  – hustota

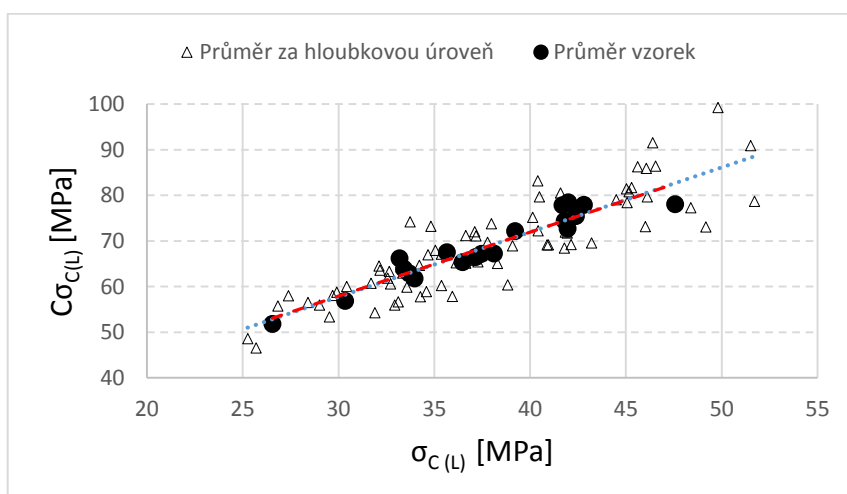
	w [%]
průměr	15,2
medián	15,2
směr.odch.	0,5
var. koef.	3,5
min	13,9
max	16,3

**Tab. 5 Vlhkost**

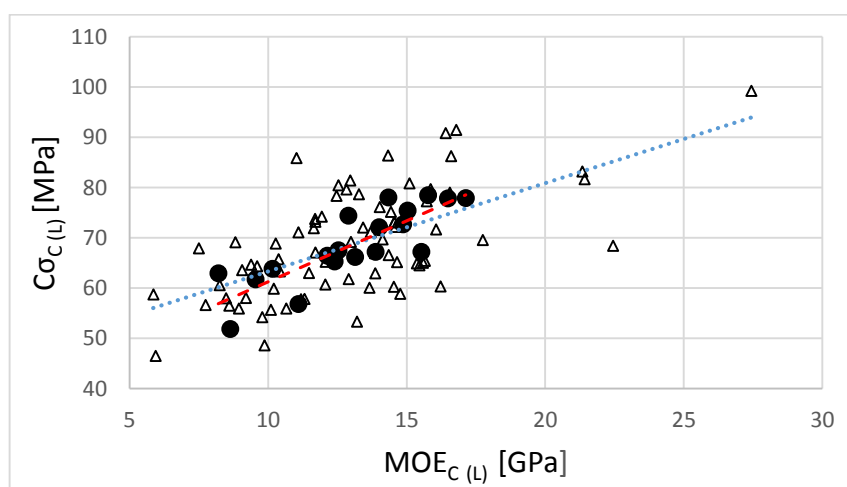
kde: w – vlhkost

## 5.2 Konvenční pevnost

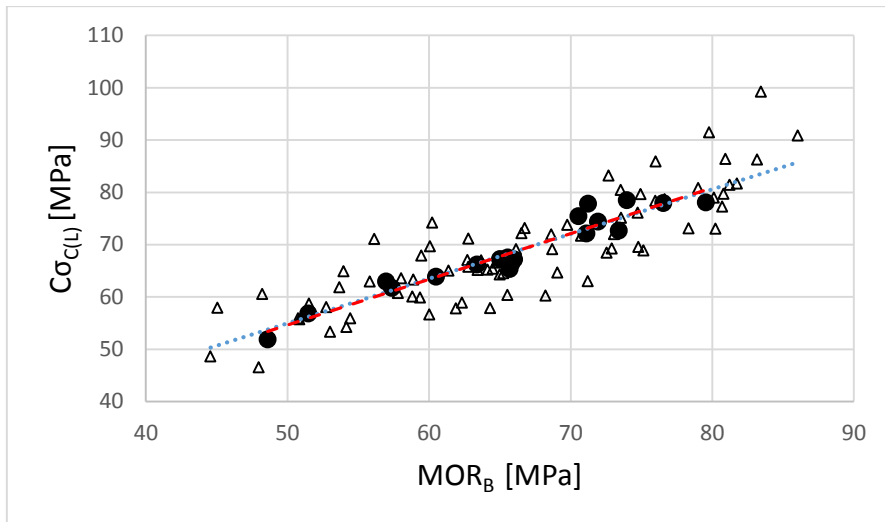
U konvenční pevnosti získané ze zkoušky roztačování čelistí ve vrtu byla zkoumána korelace s pěti parametry, které jsou zobrazeny na obr. 16–20. Jsou to tlak podél vláken ( $\sigma_{C(L)}$ ), modul pružnosti v tlaku podél vláken ( $MOE_{C(L)}$ ), pevnost v ohybu ( $MOR_B$ ), modul pružnosti v ohybu ( $MOE_B$ ) a hustota ( $\rho$ ). U těchto grafů byla zvolena lineární regrese. V každém grafu jsou uvedeny hodnoty jak pro průměr za hloubkovou úroveň (76 hodnot), tak i průměrné hodnoty za celý vzorek (19 hodnot). Způsob značení znázorňuje legenda na obr. 16. Hodnoty koeficientů determinace konvenční pevnosti s výše uvedenými parametry se pohybovaly v rozmezí 0,70–0,92. Největší korelační vztah byl s pevností v ohybu a nejmenší s modulem pružnosti v tlaku podél vláken.



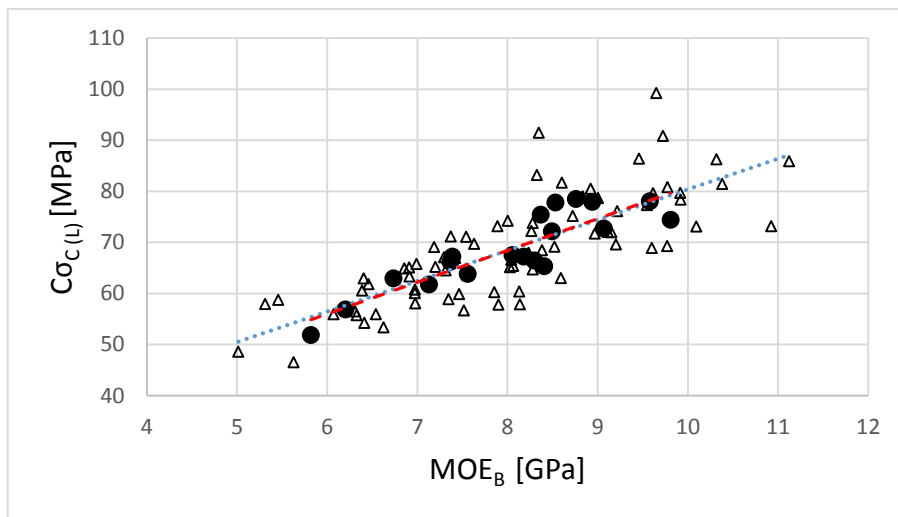
Obr. 16 Závislost tlaku podél vláken a konvenční pevnosti



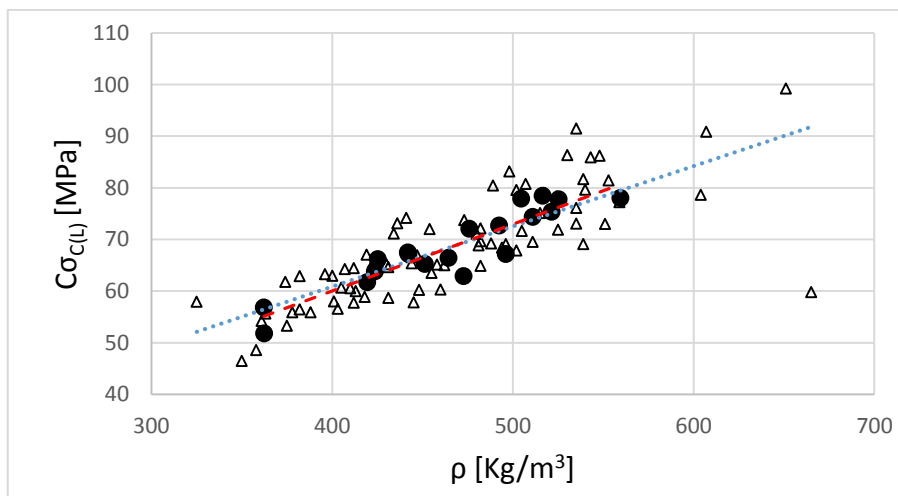
Obr. 17 Závislost modulu pružnosti v tlaku podél vláken a konvenční pevnosti



Obr. 18 Závislost pevnosti v ohybu a konvenční pevnosti



Obr. 19 Závislost modulu pružnosti v ohybu a konvenční pevnosti



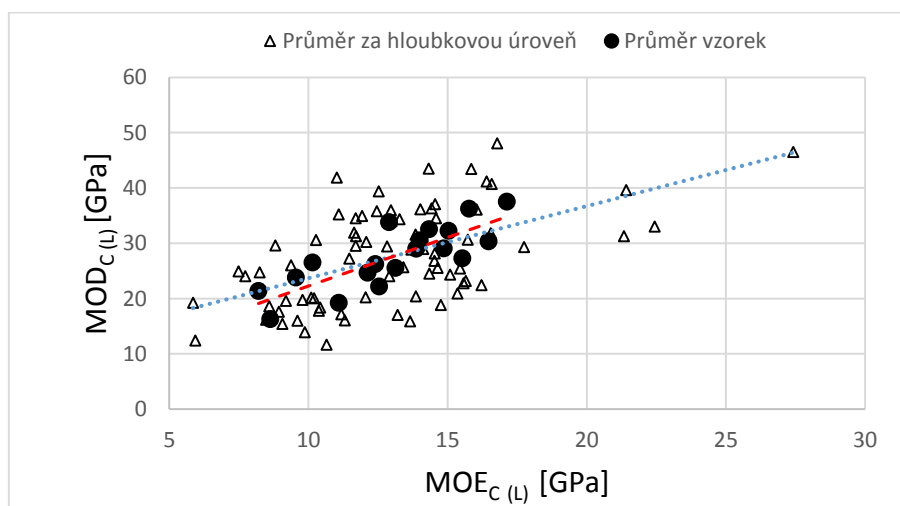
Obr. 20 Závislost hustoty a konvenční pevnosti

Korelovaný parametr	koefficient determinace $R^2$	rovnice přímky
$\sigma_C(L)$	0,9084	$y = 1,4x + 15,927$
$MOE_C(L)$	0,7024	$y = 0,0024x + 37,048$
$MOR_B$	0,9259	$y = 0,874x + 10,922$
$MOE_B$	0,7853	$y = 0,0062x + 18,661$
$\rho$	0,8509	$y = 0,1293x + 8,2668$

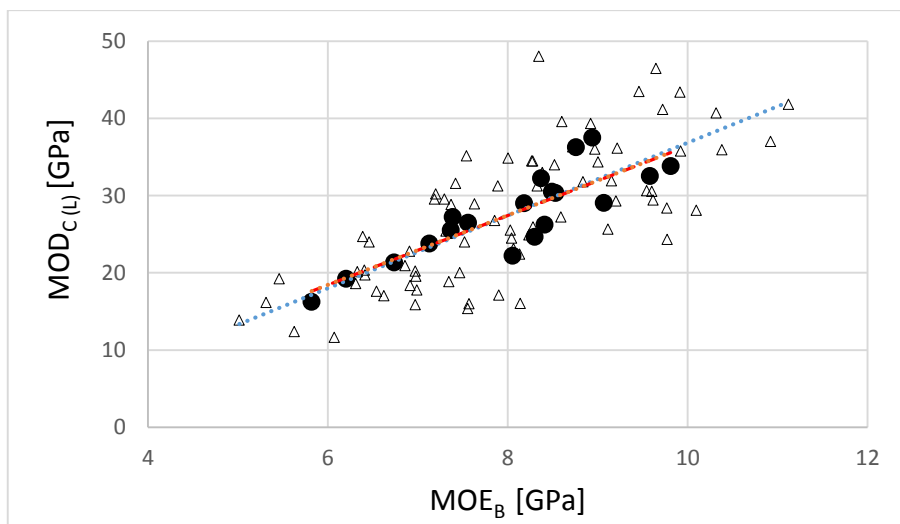
**Tab. 6 Regresní analýza: vztah mezi měřenými parametry a konvenční pevností  $C\sigma_{C(L)}$  pro průměrné hodnoty za celý vzorek**

### 5.3 Modul přetvárnosti

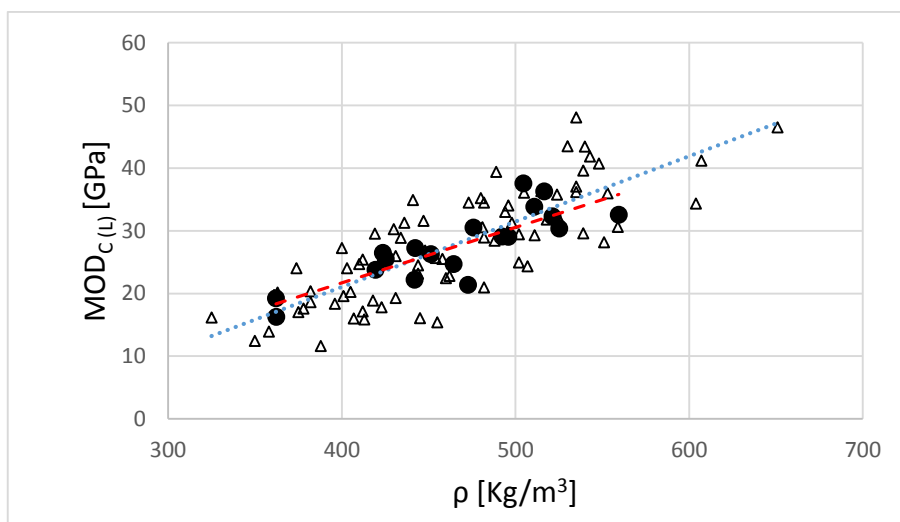
Pro modul přetvárnosti byly vytvořeny grafy se třemi parametry, které jsou uvedeny na obr. 21–23. Pro všechny grafy byla k popisu vztahu zvolena lineární regrese. V každém grafu jsou uvedeny hodnoty jak pro průměr za hloubkovou úroveň (76 hodnot), tak i průměrné hodnoty za celý vzorek (19 hodnot). Způsob značení znázorňuje legenda na obr. 21. Koeficienty determinace jednotlivých parametrů, jako je modul pružnosti v tlaku podél vláken ( $MOE_C(L)$ ), modul pružnosti v ohybu ( $MOE_B$ ) a hustota ( $\rho$ ), vyšly v rozmezí 0,65–0,72. Z čehož nevyšší korelační vztah s modulem přetvárnosti dosáhl modul pružnosti v ohybu a nejnižší hustota.



**Obr. 21 Závislost modulu pružnosti v tlaku podél vláken a modulu přetvárnosti**



Obr. 22 Závislost modulu pružnosti v ohybu a modulu přetvárnosti



Obr. 23 Závislost hustoty a modulu přetvárnosti

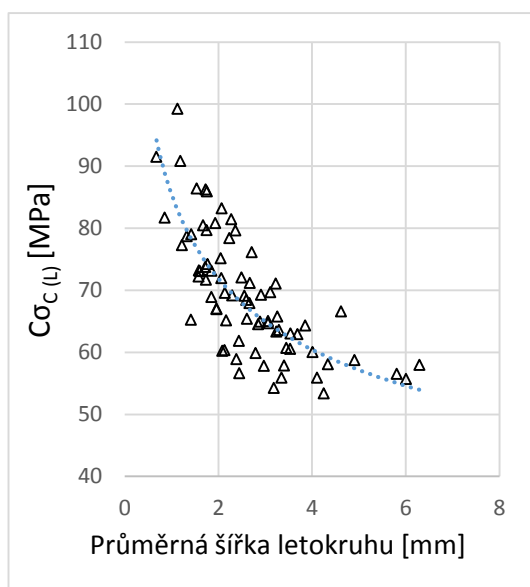
Korelovaný parametr	koeficient determinace $R^2$	rovnice přímky
$MOE_{C(L)}$	0,6503	$y = 1,7574x + 4687,9$
$MOE_B$	0,7237	$y = 4,5008x - 8566,1$
$\rho$	0,7016	$y = 88,546x - 13725$

Tab. 7 Regresní analýza: vztah mezi měřenými parametry a modulem přetvárnosti  $MOD_{C(L)}$  pro průměrné hodnoty za celý vzorek

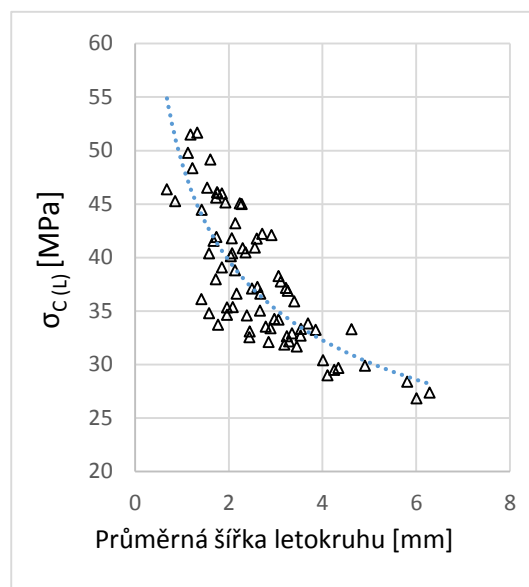


## 5.4 Průměrná šířka letokruhu

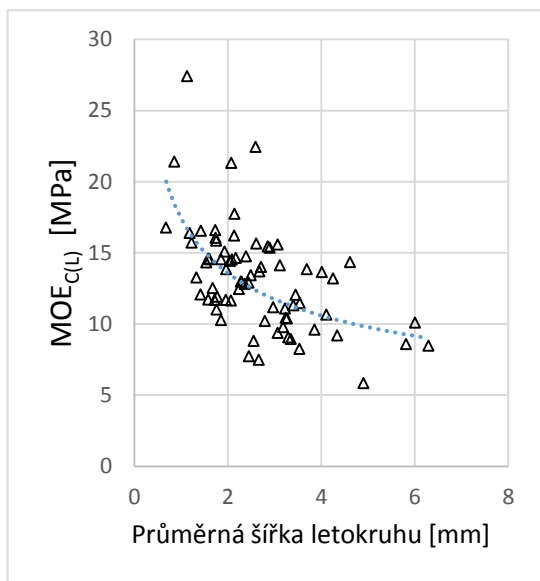
Obr. 24–27 představují grafy jednotlivých parametrů v závislosti na průměrné šířce letokruhů [mm]. Na obr. 24 jsou znázorněny hodnoty konvenční pevnosti ( $C\sigma_{C(L)}$ ) získané z roztlačováku a pro porovnání jsou na obr. 25 hodnoty z tlaku podél vláken ( $\sigma_{C(L)}$ ) z univerzálního zkušebního stroje. Pro stejné srovnání jsou na obr. 26 hodnoty pro modul přetvárnosti ( $MOD_{C(L)}$ ) a na obr. 27 hodnoty modulu pružnosti pro tlak podél vláken ( $MOE_{C(L)}$ ). Pro všechny čtyři grafy byla zvolena mocninná spojnice trendu. Hodnoty koeficientu determinace se pohybovaly od 0,33–0,65. Nejvyšší korelační vztah v závislosti na průměrné šířce letokruhu vyšel u tlaku podél vláken a nejnižší u modulu pružnosti v tlaku podél vláken.



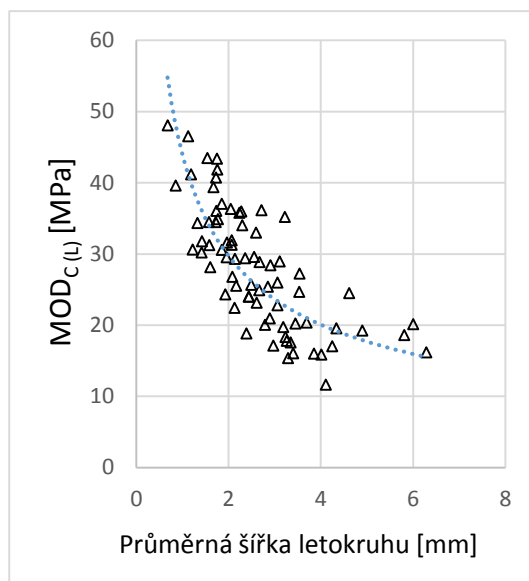
Obr. 24 Závislost konvenční pevnosti a průměrné šířky letokruhu



Obr. 25 Závislost pevnosti v tlaku podél vláken a průměrné šířky letokruhu



Obr. 26 Závislost modulu pružnosti v tlaku podél vláken a průměrné šířky letokruhu



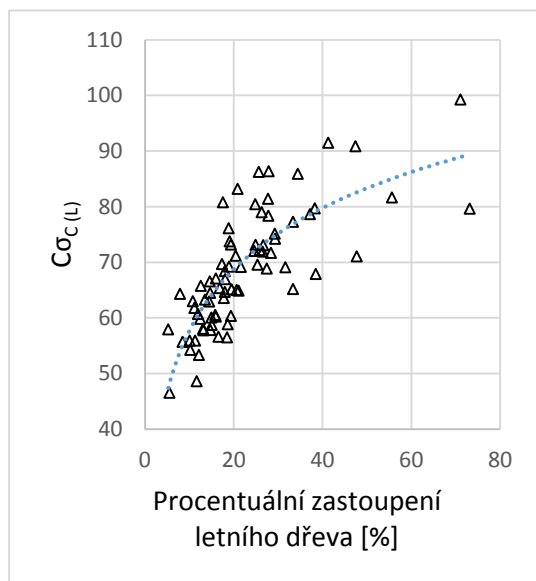
Obr. 27 Závislost modulu přetvárnosti v ohybu a průměrné šířky letokruhu

korelovaný parametr	koeficient determinace $R^2$	rovnice přímky
$C\sigma_{C(L)}$	0,5979	$y = 270,41x^{-0,25}$
$MOD_{C(L)}$	0,6018	$y = 595712x^{-0,566}$
$\sigma_{C(L)}$	0,6503	$y = 194,12x^{-0,299}$
$MOEC(L)$	0,3367	$y = 90887x^{-0,359}$

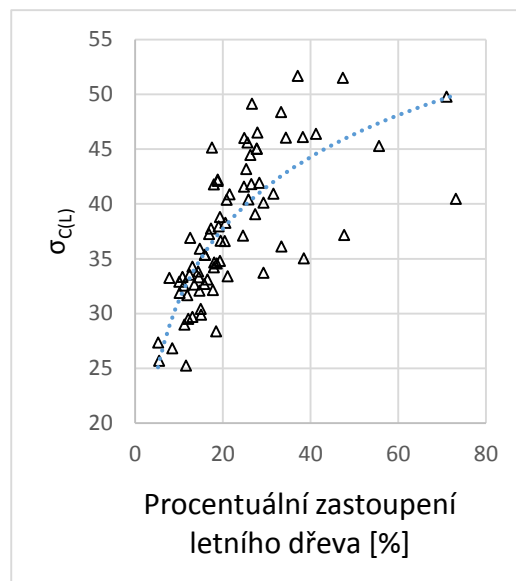
Tab. 8 Regresní analýza: vztah mezi měřenými parametry a průměrné šířce letokruhu pro průměrné hodnoty za hloubkovou úroveň

## 5.5 Procentuální zastoupení letního dřeva

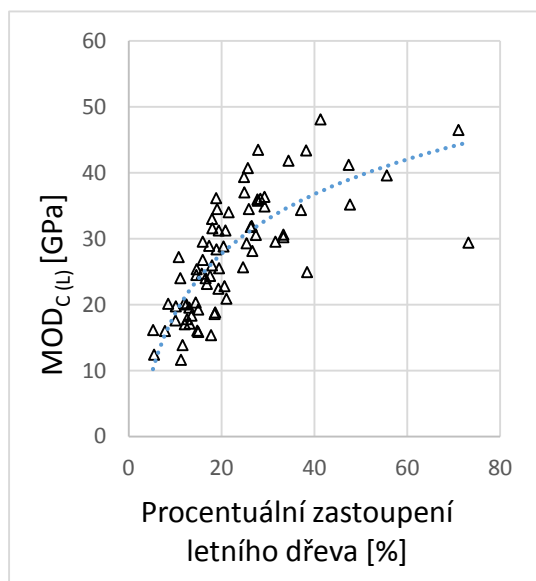
Vliv procentuálního zastoupení letního dřeva na jednotlivé parametry nám zobrazují obr. 18–21. Pro tento vliv bylo použito stejných parametrů, jako pro závislosti na průměrné šířce letokruhů. U všech těchto grafů byla hodnotami proložena logaritmická regrese. Hodnoty koeficientů determinace se pohybovaly v rozmezí 0,24–0,61. Nejvyšší a nejnižší hodnotu měli opět stejné parametry jak u závislosti na průměrné šířce letokruhu.



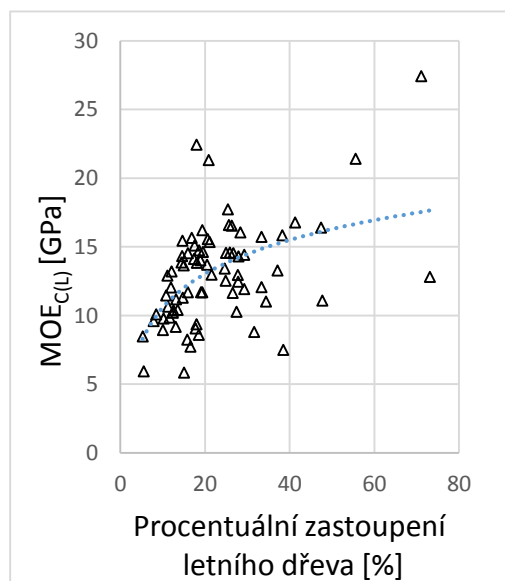
Obr. 28 Závislost konvenční pevnosti a procentuálního zastoupení letního dřeva



Obr. 29 Závislost pevnosti v tlaku podél vláken a procentuálního zastoupení letního dřeva



Obr. 30 Závislost modulu přetvárnosti a procentuálního zastoupení letního dřeva



Obr. 31 Závislost modulu pružnosti v tlaku podél vláken a procentuálního zastoupení letního dřeva

korelovaný parametr	koefficient determinace $R^2$	rovnice přímky
$C\sigma_{C(L)}$	0,6189	$y = 15,929\ln(x) + 21,009$
$MOD_{C(L)}$	0,5965	$y = 13062\ln(x) - 11454$
$\sigma_{C(L)}$	0,5768	$y = 9,4391\ln(x) + 9,4483$
$MOEC(L)$	0,2489	$y = 3,5563\ln(x) + 2,3798$

**Tab. 9 Regresní analýza: vztah mezi měřenými parametry a procentuálním zastoupením letního dřeva pro průměrné hodnoty za hloubkovou úroveň**

## 6 DISKUZE

Námi naměřená průměrná hodnota meze pevnosti v tlaku podél vláken z univerzálního zkušebního stroje vyšla 37,7 MPa, což se v porovnání s ostatními autory nejvíce přibližuje hodnotě 34,1 MPa (Požgaj et al. 1997) a 44,4 MPa (Ugolev 1975).

Dále se měřila pevnost v ohybu s průměrnou hodnotou 66 MPa. Lexa (1952), uvádí hodnotu pro pevnost v ohybu 64,8 MPa a Požgaj et al. (1997) 70,4 MPa.

Hustota dřeva dosahuje průměrné hodnoty 467 kg/m<sup>3</sup> při průměrné vlhkosti 15,2 %. Gryc et al. (2009) uvádí hustotu smrku (*Picea abies*) při 12 % 450 kg/m<sup>3</sup>. Z toho vyplývá, že naše hodnoty se nijak výrazně neliší od průměrných hodnot uváděných v literatuře.

Konvenční pevnost ( $C\sigma_{C(L)}$ ) zjišťovaná zkouškou roztláčování ve vrtu má průměrnou hodnotu 68,6 MPa, což je přibližně o 82 % větší hodnota, než u pevnosti v tlaku podél vláken ( $\sigma_{C(L)}$ ) 37,7 MPa měřenou na univerzálním zkušebním stroji. Přesto nám pevnost v tlaku podél vláken a konvenční pevnost (viz obr. 16), ukazují velmi silný korelační vztah v podobě koeficientu determinace ( $R^2$ ) s hodnotou 0,90.

Při zkoušce roztláčování čelistí ve vrtu nedochází přesně k podélnému tlačení vláken a na odpor proti působení tlaku čelistí má vliv více faktorů. Proto jsme naším experimentem zjišťovali i vliv konvenční pevnosti na ohyb a dle výsledků byl zjištěn velmi silný korelační vztah. Koeficient determinace pro konvenční pevnost a pevnost v ohybu ( $MOR_B$ ) (viz obr. 18) vyšel 0,92 a jedná se o největší naměřený korelační vztah z měřených parametrů s průměrným rozdílem hodnot pouze 3,6 % a průměrným rozdílem pevnosti 4,8 MPa.

Z toho nám vyplývá, že díky naměřené konvenční pevnosti můžeme pomocí rovnice přímky poměrně s velkou přesností určit pevnost v tlaku podél vláken a i pevnost v ohybu, které patří mezi hlavní pevnosti při zjišťování technického stavu dřevěných konstrukcí. Již z těchto hodnot je patrná značná přesnost měření nově navrženého přístroje.

Další měřené závislosti s konvenční pevností se pohybují v rozmezí 0,7–0,85, což naznačuje příznivý korelační vztah s parametry jako je modul pružnosti v tlaku podél vláken (viz obr. 17), modul pružnosti v ohybu (viz obr. 19) a hustotě dřeva (viz obr. 20).

Také modul přetvárnosti zaznamenává vysoké korelační vztahy převážně s modulem pružnosti v ohybu ( $MOE_B$ ) (viz obr. 22), kde koeficient determinace nabývá hodnoty 0,72. Dalším porovnávacím parametrem byl modul pružnosti v tlaku podél vláken ( $MOE_{C(L)}$ ) (viz obr. 21) s hodnotou  $R^2$  0,65 a hustota (viz obr. 23) s  $R^2$  0,70. Hodnota modulu přetvárnosti vycházela průměrně o 51 % vyšší, než hodnota modulu pružnosti v tlaku podél vláken a o přibližně 69 % vyšší, než hodnota modulu pružnosti v ohybu. Zasluhou výsledných rovnic

přímek z jednotlivých grafů můžeme odhadnout mechanické vlastnosti měřeného prvku a to u většiny závislostí s poměrnou přesností.

Na pevnost dřeva má značný vliv i průměrná šířka letokruhu. Obecně je známo, že s rostoucí šířkou letokruhu u jehličnatých dřevin klesá podíl letního dřeva (Požgaj et al. 1997). Všeobecně se šířka letokruhů s rostoucím věkem zmenšuje a tím pádem u jehličnatých dřevin roste s věkem zastoupení letního dřeva. Tento fakt jsme zjistili i na našich vzorcích, kdy například hodnoty meze pevnosti byly v první úrovni měření (5–25mm) přibližně o 20 % větší, než ve čtvrté úrovni (95–115 mm), tedy blíže ke středu. Vliv šířky letokruhu na konvenční pevnost a pevnost v tlaku podél vláken si můžeme prohlédnout v grafech na obr. 24 a 25. Pro závislosti na průměrné šířce letokruhu byla v grafech zvolená mocninná spojnice trendu, která nejlépe vystihovala naše data. Tato spojnice nám také ukazuje, že od určité míry už na pevnost v tlaku podél vláken nemá vliv šířka letokruhu. Konkrétně u jehličnatých dřevin je to z důvodu minimálního zastoupení letního dřeva a tím pádem se dřevo stává víceméně homogenní se zastoupením výrazného množství jarního dřeva, které nemá takovou odolnost vůči zatížení, jako dřevo letní. Velmi podobnou závislost na průměrné šířce letokruhu má i modul přetvárnosti a modul pružnosti v tlaku podél vláken (viz obr. 26 a 27).

Další závislosti byly na procentuálním zastoupení letního dřeva. U těchto grafů se nám opět potvrzuje, že s rostoucím zastoupením letního dřeva v letokruhu nám zároveň roste i pevnost dřeva (viz obr. 28–31).

## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo stanovit korelační vztahy mezi konvenční pevností a modulem přetvárnosti měřených pomocí nově sestrojeného přístroje oproti standardním pevnostním zkouškám v tlaku podél vláken a ohybu na univerzálním zkušebním stroji.

Experimentálním měřením vzorků dřeva byla zjištěná velmi vysoká přesnost stanovení mechanických vlastností nově sestrojeného přístroje. Největší korelační vztahy měla konvenční pevnost ( $C\sigma_{C(L)}$ ) na tlaku podél vláken ( $\sigma_{C(L)}$ ) a pevnosti v ohybu ( $MOR_B$ ), kde se koeficient determinace pohyboval v rozmezí 0,90–0,92. Ostatní měřené parametry jak na konvenční pevnosti, tak na modulu přetvárnosti vykazovaly koeficienty determinace v rozmezí od 0,65–0,85, což poukazuje na příznivé korelační vztahy.

Dalším cílem bylo vyhodnocení vlivu podílu jarního a letního dřeva v letokruhu na mechanické vlastnosti měřené pomocí nově sestrojeného přístroje. U veškerých výsledků se hodnota konvenční pevnosti i modulu přetvárnosti úměrně zvyšovala s rostoucím podílem letního dřeva ve vzorku.

Tím pádem se podařilo ověřit funkčnost a spolehlivost nově navrženého semidestruktivního přístroje, který bude mít jistě velké uplatnění při určování technického stavu dřevěných konstrukcí.

## 8 SUMMARY

The main objective of this thesis was to determine the correlations between conventional strength and modulus of deformation measured by a newly-designed device compared to the standard strength tests in pressure along the fibres and the bending at universal testing machine.

Experimental measurements of wood samples detected very high accuracy of determination of the mechanical properties of the newly-designed instrument. The largest correlations were conventional strength ( $C\sigma_{C(L)}$ ) of the pressure along the fibres ( $\sigma_{C(L)}$ ) and a modulus of rupture ( $MOR_B$ ), where the coefficient of determination ranged from 0,90 to 0,92. Other parameters measured as to the conventional strength and at the modulus exhibited coefficients of determination ranging from 0,65 to 0,85 which indicates a positive correlation relationship.

Another objective was to evaluate the effect of the proportion of spring and summer wood in annual ring on the mechanical properties measured using the newly-designed device. For all results, the value of conventional strength and modulus increased proportionally with increasing proportion of summer wood in the sample.

Thanks to this, the reliability and functionality of the newly-designed semi destructive device were able to be evaluated, so it will certainly have great application in determining the technical condition of the wooden structures.



## 9 LITERATURA

1. BODIG, J., JAYNE, B. A.: Mechanics of Wood and Wood Composites. Malabar: Krieger Publish.Comp., 1993, ISBN 0-89464-777-6.
2. BUCUR, V.: Nondestructive characterization and imaging of wood. Berlin: Springer, 2003, 354 str. ISBN 3-540-43840-8
3. BRUMOVSKÝ, M., RADA, O.: Dřevo v rekreačním objektu, nakladatelství Brázda, Praha, 1991, 200 str. ISBN 80-209-0187-6
4. GRYC, V., VAVRČÍK, H., KOTALÍK, O., Vybrané vlastnosti smrku pichlavého (*Picea pungens* Englm.) z nelesních půd, 2009, ISSN 1211-8516
5. HAVÍŘOVÁ, Z.: Dům ze dřeva, vyd. Era, 1. vydání, 2005, 104 str. ISBN 80-7366-060-1
6. HOLAN, J.: Ochrana dřeva, 2008
7. ROSS, R.J., Forest Products Laboratory.: *Wood handbook: Wood as an Engineering Material* [online]. Centennial Edition. Madison, Wisconsin : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010 [25.4.2013].  
Dostupný z: [http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl\\_gtr190.pdf](http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf)
8. KAW, AUTAR K. Mechanics of composite materials, 1997, 329 str. ISBN 978-0-8493-1343-1
9. KLOIBER, M., DRDÁCKÝ, M.: Diagnostika dřevěných konstrukcí, vyd. ČKAIT, s.r.o., Praha, 1. vydání, 2015, 168 str. ISBN 978-80-87438-64-0
10. KLOIBER, M., DRDÁCKÝ, M.: Nový přístroj pro stanovení mechanických vlastností dřeva. In Křížová, K. (ed.). Sanace a rekonstrukce staveb 2013 Sanace dřeva. Praha: Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky - WTA CZ, 2013, s. 14-21. ISBN 978-80-02-02502-3. [Sanace a rekonstrukce staveb 2013, Praha, 14.11.2013-15.11.2013, CZ].<http://www.wta.cz/sborniky>

11. KLOIBER, M., KOTLÍNOVÁ, M.: Nedestruktivní defektoskopické přístroje používané při provádění stavebnětechnických průzkumů historických dřevěných konstrukcí. In: Stavební ročenka 2008, Jaga, 2007, Bratislava, Slovensko, 39-43 str. ISBN 80-8076-056-4
12. KLOIBER, M., BLÁHA, J.: Nedestruktivní identifikace poškození dřevěných nosných konstrukcí u památkově chráněných objektů. In: Drevoznehodnocující huby 2005, Mezinárodní konference Zvolen-Kováčová, Slovensko. ISBN 80-228-1535-7
13. KLOIBER, M., KUNECKÝ, J., TIPPNER, J., SEBERA V.: A new diagnostic device for *in-situ* determination of strength and modulus of deformability in compression of wood parallel to fiber. 2014. International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions F. Peña & M. Chávez (eds.) Mexico City, Mexico, 14–17 October 2014
14. KOLLMANN, F., 1951: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Berlin: Springer-Verlag, 870 str.
15. KOTLÍNOVÁ, M. et al.: Nondestructive testing of wood. Vyd. 1. Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce, 2008, 39 str. ISBN 978-80-87154-14-4.
16. LEXA, J. et al. 1952. Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva : Technologie dreva . I.svázok. Bratislava: Práca, 432 str.
17. LOKAJ, A., VAVRUŠOVÁ, K., HURTA, J.: Materiálové charakteristiky jehličnatého dřeva, Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava číslo 1, rok 2007, ročník VII, řada stavební. Dostupný z: <http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/64559/FAST-2007-7-1-1-lokaj.pdf?sequence=2>
18. MIX, P.E.: Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide. Hoboken, NJ: Wiley, 2005, ISBN 10 0-471-42029-8
19. POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M.: Štruktúra a vlastnosti dreva. 2 vydanie. Bratislava: Príroda, 1997, 485 str. ISBN 80-07-009604

20. PIAZZA, M., RIGGIO, M.: Limits of visual strength fading. Old timber roof beams “Ai Caduti dell’ Adamello“ refuge. 13 p.
21. REINPRECHT, L., ŠTEFKO, J.: Dřevěné stropy a krovy. Typy, poruchy, průzkumy a rekonstrukce. ABF, a. s., Nakladatelství ARCH. Praha, 2000. ISBN 80-86165-29-9
22. REINPRECHT, L.: Ochrana dřeva, vyd. Technická univerzita ve Zvolenu, 1. vydání, 2008, 453 str. ISBN 978-80-228-1863-6
23. TRENDELENBURG, R.: Das Holz als Rohstoff. J. F. Lemanns Verlag, München und Berlin 1939. 330 str.
24. UGOLEV, V.N.: Drevesinovedenije s osnovami lesnovo tovarovedenija, 1986, Moskva, 365 str.
25. VAVERKA, J. et al.: Dřevostavby pro bydlení, Praha: Grada, 2008, 376 str. ISBN 978-80-247-2205-4
26. ŽÁK, J., REINPRECHT, L.: Ochrana dřeva ve stavbě. Odborná příručka pro stavebníky, investory, projektanty a architekty, 1998, ISBN 80-86165-00-0

## **NORMY**

ČSN EN 326-1 *Odběr vzorků, nařezávání a kontrola - Část 1: Odběr vzorků, nařezávání zkušebních těles a vyjádření výsledků zkoušky*

ČSN 49 0110 *Drevo. Medza pevnosti v tlaku v smere vlákien*

ČSN 49 0112 *Zjišťování fyzikálních a mechanických vlastností přírodního dřeva*

ČSN 49 0115 *Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe*