

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

Vliv vlhkosti na konvenční pevnost v tlaku  
podél vláken při roztlačování čelistí ve vývrtnu

**Diplomová práce**

2015

**Bc. Jaroslav Pilát**

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem práci: Vliv vlhkosti na konvenční pevnost v tlaku podél vláken při roztlačování čelistí ve vývrtu, zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

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

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

V Brně, dne:.....

Podpis studenta

zadani

**Poděkování:**

*Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu diplomová práce Ing. Václavu Seberovi za cenné rady, čas strávený při konzultacích a odborné vedení diplomová práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a blízkým za podporu během studia.*

**Jméno** Bc. Jaroslav Pilát  
**Název práce** Vliv vlhkosti na konvenční pevnost v tlaku podél vláken při roztláčování čelistí ve vývrtnu

### **Abstrakt**

Tématem této diplomové práce je zjištění validity nově vyvinutého zařízení pomocí zjištění konvenční pevnosti v tlaku podél vláken měřené daným zařízením a standardní tlakovou zkouškou. Toto speciální zařízení lze v praxi využívat pro měření dřevěných prvků *in-situ* a to jak historických starých krovů, tak i u relativně nových staveb, u kterých je potřeba zjistit statickou únosnost daných prvků, která mohla být vlivem biotického či abiotického poškození výrazně změněna. Práce poskytuje statistická data při měření prototypovým zařízením při třech různých vlhkostech.

Naměřené hodnoty byly porovnávány s množstvím referenčních vzorků měřených na univerzálním zkušebním stroji Zwick Z050. Z výsledků vyplývá, že vlhkost má významný vliv na měřené veličiny. Rozsah korelací měřených veličin vůči 12% vlhkosti referenčních dat se pohybuje v intervalu 0,67- 0,94. Dále byl zjišťován vztah modulu deformability na modulu pružnosti, který se projevil vysokou závislostí ( $R=0,67-0,82$ ). Součástí práce bylo zkoumání vlivu podílu letního dřeva na měřené veličiny. Podíl letního dřeva byl stanoven pomocí digitální optické metody a bylo zjištěno, že taktéž významně ovlivňuje měřené veličiny (korelační koeficient v intervalu 0,51 – 0,77).

Díky bezdrátovému přenosu dat během měření a napájení zařízení pomocí akumulátoru lze s novým zatížením pracovat efektivně i v prostorech vzdálených od elektrické sítě. Pokud prostorové možnosti dovolí, lze získat data z dřevěných prvků o průřezu až 230 mm, ovšem musí se dodržet radiální směr měření. Zařízení dostatečně citlivě reaguje na změnu hustoty dřeva a jeho vlhkosti a podává přesné informace o mechanických vlastnostech dřevěných prvků ve formě pevnosti v tlaku podél vláken, která velmi koreluje s ohybovou tuhostí dřevěných prvků.

### **Klíčová slova**

Konvenční pevnost v tlaku, mez pevnosti, modul pružnosti, modul deformability, nedestruktivní testování, pevnost v tlaku podél vláken, roztláčování čelistí ve vývrtnu

**Name** Jaroslav Pilát  
**Title of work** Determination of moisture impact on conventional strength pressure along the fibres by pushing jaws inside predrilled hole.

### **Abstract**

This final thesis deals with determination of moisture influence on conventional strength pressure with use of the prototype diagnostic tool. This device can be used for *in situ* measurement of inbuilt wood properties in constructions. This new approach enables to determine strength and stiffness parameters of wood parallel to grain based on measurement of force required for pushing jaws inside the predrilled hole apart. The thesis aim is to determine the mechanical properties of wood by both experimental testing of novel device and with universal testing machine. The results of experiments are mutually compared, statically evaluated and also compared with known values. The experiments are carried out according to the standards for testing of the mechanical properties of raw wood.

### **Key words**

Non destructive testing, *in-situ*, compression strength, loading jack, conventional strength pressure, modulus of deformability

## Obsah

1	Úvod .....	9
2	Cíl práce.....	10
3	Literární přehled .....	11
3.1	Trvanlivost Dřeva.....	11
3.2	Poškození dřeva .....	11
3.3	Růstové vady.....	12
3.4	Abiotická degradace.....	12
3.4.1	Biotická degradace způsobená dřevokaznými houbami .....	14
3.4.2	Biotická degradace způsobená dřevokazným hmyzem.....	15
3.5	Vlhkost dřeva (vliv vlhkosti na mez pevnosti a modul pružnosti).....	16
3.6	Mechanické namáhání.....	18
3.6.1	Tlak .....	19
3.7	Zkoušení dřeva .....	19
3.8	Nedestruktivní metody .....	20
3.8.1	Vizuální posouzení.....	21
3.8.2	Akustické metody.....	21
3.8.3	Rentgen .....	23
3.9	Semi destruktivní metody .....	24
3.9.1	Videoscopie.....	25
3.9.2	Pilodyn .....	26
3.9.3	Resistograph.....	27
3.10	Roztlačování čelistí ve vývrtu .....	30
3.11	Mechanické namáhání.....	31
3.11.1	Pružnost dřeva .....	32
3.11.2	Pevnost dřeva .....	32
3.11.3	Faktory ovlivňující pevnost a pružnost dřeva .....	32
3.11.4	Stanovení podílu letního dřeva obrazovou analýzou .....	33
4	Materiál a metodika .....	34
4.1	Použité normy .....	34
4.2	Odběr zkušebních těles .....	34

4.3	Použité pomůcky .....	36
4.4	Zařízení pro roztlačování ve vývrtu .....	37
4.5	Zkouška v tlaku .....	39
4.6	Statistické vyhodnocení .....	39
4.6.1	Studentův t-test.....	40
4.6.2	F- test (test rozdílu dvou rozptylů).....	40
4.7	Korelační analýzy.....	40
4.8	Analýza rozptylu (Anova).....	41
4.9	Stanovení podílu letního dřeva obrazovou analýzou .....	41
5	Výsledky měření.....	42
6	Diskuze .....	50
7	Závěr.....	52
8	Přehled literatury .....	55
9	Použité normy.....	57
10	Seznam obrázků, tabulek a grafů.....	58
11	Příloha.....	60



## 1 Úvod

Základem jakékoliv analýzy tradičních dřevěných objektů je vizuální průzkum, který patří mezi nejjednodušší a nejstarší nedestruktivní metody používané při stavebně technických průzkumech. Umožňuje odhalit povrchové biotické a zároveň i viditelné mechanické poškození dřeva.

Ovšem problém 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.

Návrhy sanací a oprav historických dřevěných konstrukcí by měly vedle jejich funkční stabilizace a prodloužení životnosti sledovat cíl zachování co největšího objemu původního materiálu, který je nositelem celé řady cenných informací. Nicméně takové návrhy nelze obvykle provádět jen na základě vizuálního průzkumu, ale je nutné požadovat zapojení především nedestruktivních nebo semi-destruktivních přístrojů, které dokáží jednotlivě nebo ve vzájemné kombinaci dvou i více zařízení poskytnout přesnou informaci o stavu posuzované památkové konstrukce.

Rozsah současných metod a zařízení má nedostatek řešení umožňujících výzkum mechanických vlastností dřeva, užívajících jemné destruktivní metody. Proto bylo na UTAM AVČR vyvinuto prototypové zařízení, které pracuje na principu roztlačování vláken ve vývrtnu. Takto lze zjistit statickou únosnost a fyzikálně mechanické chování dřeva, při použití miniaturních symetricky se roztahujících čelistí, v předvrtaném otvoru.

Jiné semi-destruktivní testování materiálu taktéž umožňuje hodnocení stavu dřeva (Zaráženy trnu, vývrty jádra, analýza pilin, videoscopie). Popsané principy této nové metody pro posuzování mechanických vlastností se stala základem pro zkonstruování nového zařízení. Prezentovaná práce představuje nové zařízení a prezentuje výsledky měření za účelem ověření funkčnosti nového zařízení v porovnání se standartními destruktivními tlakovými zkouškami splňující Evropské normy.

## 2 Cíl práce

Cílem práce bylo posoudit vliv vlhkosti na konvenční pevnost v tlaku podél vláken měřenou pomocí prototypového zařízení vyvinutého na UTAM AVČR, které pracuje na principu roztlačování vláken ve vývrtnu. V rámci práce bude provedeno rozsáhlé měření, které odhalí primární závislosti a dále korelace mezi konvenční tlakovou pevností ve vývrtnu a standardní pevností měřenou na univerzálním zkušebním stroji.

Dílčím cílem práce je provedení analýzy podílu letního dřeva ve vývrtnu. Pro tyto účely je nutné nalézt metodiku odběru vzorků z měřené oblasti a poté podíl letního dřeva nasnímat a analyzovat pomocí videoskopie a nástrojů obrazové analýzy.

Dalším z cílů práce bylo posoudit vztah mezi klasickým modulem pružnosti v tlaku a modulem deformability, který je dalším výstupem roztlačovacího zařízení.

Součástí práce je také kvalitativní zhodnocení používaného prototypu, jsou zhodnoceny výhody či nevýhody zařízení.

## 3 Literární přehled

### 3.1 Trvanlivost Dřeva

Trvanlivostí dřeva je míněno schopností dřeva zachovávat si původní strukturu a vlastnosti při podmínkách příznivých pro aktivitu činitelů, které dřevo jinak znehodnocují (Reinprecht a Štefko, 2000). Trvanlivost dřeva v přirozeném stavu (bez nátěru a impregnace) je podmíněna chemickým složením a jeho anatomickou strukturou. Nejméně odolné jsou parenchymatické buňky než jiná dřevní vlákna, která lépe odolávají biologickým vlivům. Dřevo těžené koncem roku má vyšší hustotu a je mnohem trvanlivější než dřevo těžené na jaře; stejně tak bývá trvanlivější i jádrové dřevo než běl (Baier, Týn, 1996). Nutno podotknout, že odolnost dřeva proti biotickým škůdcům nezávisí na hustotě, neboť např. dřeva s velkou hustotou, bez obsahu jádrových látek typu terpenoidů, tríslovin apod., jako jsou například habr a buk patří k méně trvanlivým druhům (Reinprecht a Štefko, 2000).

V EU, je přirozená trvanlivost dřeva hodnocena podle EN 252 (Field Test Method for Determining the Relative Protective Effectiveness of Wood Preservatives in Ground Contact) pro dřevo v kontaktu se zemí a podle EN 113 (Wood Preservatives Test Method for Determining the Protective Effectiveness Against Wood Destroying Basidiomycetes). Pro hodnocení hub basidiomycetes v laboratořích není žádná existující norma pro hodnocení trvanlivosti dřeva bez kontaktu se zemí (Råberg a kol., 2005). Směrnice ENV 12037 (Wood Preservatives Test Method Exposed Out of Ground Contact) a EN 330 (1993) EB 330 (Wood preservatives Field – test Method for determining the Relative Protective Effectiveness of a Wood Preservative for Use Under Acoating and Exposed Out-of-ground Contact, které jsou zaměřené jen na hodnocení stavu upravovaného dřeva bez kontaktu se zemí (Råberg a kol., 2005).

### 3.2 Poškození dřeva

Základem jakékoliv diagnostiky historických dřevěných objektů je vizuální průzkum, který patří mezi nejjednodušší, nejpoužívanější a nejstarší nedestruktivní metody používané v běžné praxi a je nedílnou součástí nedestruktivního testování (Ross a Pelegrin, 1994). Užívá se za účelem získání informací týkajících se stavu a vlastností materiálu, ale také pro odhalení původních technologických postupů a potřebných zásahů do dřevěných konstrukcí.

Mezi základní hodnocení stavu prvků náleží určení druhu použitého dřeva, charakteristické znaky prvku, vad dřeva (suky, trhliny točivost, odlupčivost, barevné skvrny), odhalení povrchového abiotického a biotického poškození dřeva. Vizuální hodnocení je založeno na vyhodnocení a identifikaci biodegradace a zjištění přítomnosti biologických škůdců (změny povrchu, výletové otvory, prach a drť blízko poškozeného prvku, mycelium, plodnice hub, změny barvy). Dále je možné zjistit uvolnění konstrukčních spojů nebo deformace dřevěných prvků.

Stav dřeva zabudovaného v konstrukcích je funkcí materiálových vlastností, poškození způsobené biotickými nebo abiotickými činiteli a vnějších podmínek, (Bodig, 2000).

### **3.3 Růstové vady**

Odchylky v textuře, struktuře a ve tvaru, dřevní suroviny jsou definovány jako vady dřeva (Požgaj, 1997). Jak bylo uvedeno, stavebně technické průzkumy bývají zaměřené nejen na stanovení vlastností dřeva, ale i na popis růstových vad. Suky a trhliny jsou nejčastější a nejnebezpečnější vady v historických konstrukcích (Bodig, 2000). Důsledkem dělení hlavního kmene na vedlejší větve jsou suky, které mají vlastní letokruhy, čímž dochází k odklonu vláken a ovlivnění pevnosti prvku. Vzhledem k odklonu vláken jsou suky mnohdy více škodlivé než díry stejného průměru. Snížení pevnosti zapříčiněné sukou je velmi závislé na velikosti, umístění, stejně jako na typu prvku. S odklonem vláken souvisí i narůstající velikost suků a naopak. Hlavním faktorem je také umístění suku, protože i malý suk v kritickém místě může způsobit výrazný pokles pevnosti. Zvlášť významný pro trámové prvky je také umístění suků. Především suky v tlakové části trámu, kde je tahové tlakové napětí (Požgaj, 1997). Vlivem gradientů napětí a rozměrových změn se ve dřevě tvoří trhliny. Ty vytvářejí podél prvku výsušné nebo odlupčivé trhliny vznikající na hranici letokruhu. Oba dva případy trhlín způsobují snižující se pevnost. V místě trhlíny může dojít, v případě velkého zatížení, k rozdělení prvku na dvě části (Požgaj, 1997).

### **3.4 Abiotická degradace**

Degradace dřeva může být způsobována nejen biotickými, ale i abiotickými faktory, které mohou jeho stav ovlivňovat na fyzikálním, mechanickém i chemickém principu (Reinprecht, 1997). Většinou procesů abiotické degradace se nelze nikdy zcela vyhnout. Zvýšená vlhkost patří k nejzávažnějším problémům fyzikálního poškození a bývá i

lehce vizuálně rozpoznatelná. Voda se do konstrukcí dostává buď v kapalném skupenství, nebo jako plyn, respektive jako vodní pára. Za zdroje vlhkosti jsou považovány: Srážková voda, vztlínající voda (kapilární voda), kondenzovaná a sorpční voda. (Reinprecht, Štefko 2000). Působení vody při poškozování dřeva se projevuje na několika úrovních (Reinprecht, Štefko, 2000).

Voda vstupuje do chemických reakcí se stavebními složkami dřeva (depolymerizace hemicelulózy a celulózy hydrolytickými reakcemi na monosacharidy, kde většinou katalyzuje s enzymy dřevokazných hub, bakterií nebo kyselin z kyselých dešťů).

Dále bývá nosným médiem při transportu enzymů, kyselin, reakčních substrátů a produktů depolymerizačních reakcí, které jsou rozpustné ve vodě (potom přenos probíhá v buněčných stěnách a lumenech buněk, proto k hnilobě nedochází v suchém dřevě, protože není zabezpečen přenos enzymů k jednotlivým částicím dřeva).

Důsledkem fázové přeměny vody na led vznikají mrazové trhliny uvnitř buněčných stěn a mezi muňkami. Další mechanické poškození způsobuje prach a to v kombinaci s dešťovou vodou, tedy kapalnou, nebo v pevném skupenství, respektive sněhem. Tak se tvoří eroze na povrchu dřeva a bývá ve značeném rozsahu. Tato eroze bývá ještě umocněna UV zářením dopadajícím na povrch. Tak dochází k depolymerizaci ligninu. Při synergii všech těchto vlivů dochází k biotické degradaci, tedy hubami či hmyzem.

Mezi abiotické činitele lze zařadit poškození mechanické, které se obvykle nachází u dřeva zabudovaného, které v sobě má různé díry, otvory, řezy a zářezy. Takovéto poškození vznikají obvykle při renovacích, opravách nebo úpravách konstrukcí (Reinprecht, Štefko, 2000). Mechanickým poškozením se v podstatě rozumí namáhání (ohybové namáhání) nebo i vážnější poruchy poukazující na místní překročení materiálové pevnosti důsledkem změn statického či dynamického zatížení. Konstrukční spoje, ve kterých se většinou soustřeďuje napětí, bývají nejkritičtějšími místy. Nadměrné zatížení lze snadno určit vizuálně. Deformace mohou signalizovat vybočení nebo posunutí sloupů. K častému poškození dochází vlivem návaznosti na výsušné trhliny, které bývají způsobeny rozštípnutím v místě plátování, díky dřevěnému hřebu, či kolíku, jelikož se pak funkčnost spoje velice snižuje. Takto poškozené konstrukční prvky je možné velice snadno vizuálně diagnostikovat a následně určit jejich budoucí vývoj.

V důsledku hydrolyzních a oxidačních reakcí v polymerech dřeva se pod vlivem různých chemických látek mění struktura dřeva většinou v nestejném rozsahu a intenzitě (Unger, 2001). Do chemické biodegradace řadíme korozi kovových negalvanizovaných spojovacích prvků, jelikož uvolňují železné ionty do dřeva, a způsobují degradaci buněčné stěny a tím dochází lokálně ke snížení pevnosti prvku. Při zvýšené vlhkosti

dřeva a prostředí je tato chemická reakce ještě více urychlována. Při vizuálním hodnocení se jeví jako plochy tmavší barvy, měkké na dotyk, což je důsledkem reakce tříslovin a tvorby radikálů s dopadem na mírný rozklad polymerů (Reinprecht, 1997). Unger (2001) uvádí, že výraznější změny nastávají při vlhkosti 20-30%, zatímco při vlhkosti dřeva nižší než 10%, je poškození vlivem kovů velmi malé. Chemickou degradací lze také označit proces uvolňování hydroxidu vápenatého ze starších malt, které často bývají ve spojení s dřevem (Reinprecht, 1997).

Všechny tyto abiotické degradace (kyslík, imise, sluneční záření, teplo vítr, déšť, sních), kterým říkáme atmosférické vlivy, se týkají především dřeva nacházejícího se v exteriéru. Dřevo zabudované, či dřevo v interiéru ovlivňuje především vlhkost a na ní navazují degradace biotická.

### **3.4.1 Biotická degradace způsobená dřevokaznými houbami**

Dřevo, které je zabudované ve vlhké budově, jsou největším nebezpečím dřevokazné houby, jelikož dřevo rozkládají a snižují jeho pevnost, tím vážně ohrožují napadený objekt (Baier, Týn, 1996). Dřevokazné houby, hmyz, plísně, dřevo zbarvující houby nebo bakterie jsou příčinou biotického poškození dřevěných konstrukcí. (Reinprecht, 1997). Biotičtí činitelé mohou způsobovat škody v malém rozsahu, nebo až totální destrukce dřevěných prvků. Vhodné podmínky podporují jejich rozvoj, což bývá přístup kyslíku, optimální vlhkost, teplota a zdroj potravy (dřevo). V případě absence jedné z těchto podmínek k biotickému napadení nedochází.

Nejnebezpečnější a zároveň i nejčastěji se vyskytující formou znehodnocení dřeva je hniloba způsobená dřevokaznými houbami. Houby jsou se dřevem spojené už 300 milionů let, což vyplývá z rozboru fosilních nálezů. To že měly tehdejší houby lepší schopnost odolávat toxicitě fenolů a odbourávat lignin, bylo důsledkem, že dřevo stromů z dávnějších dob bylo více lignifikováno a obsahovalo i více fenolických látek, (Reinprecht, 1997).

Mnoho autorů se věnovalo stanovení intervalů optimální teploty a vlhkosti, což je závislé především na druhu dřevokazné houby. Reinprecht (1997) udává interval 10-30°C pro teplotu a nad 20 % pro vlhkost (Reinprecht, 1997). Zabel a kol. (1992) zjistili intervaly 24-32°C a 15-23 % vlhkosti.

Zvýšené vlhkosti, které jsou velmi důležité pro růst houby, jsou velmi dobrým vizuálním identifikátorem pro odhalení možného výskytu hniloby. Rozpoznání konkrétní hniloby je důležité pro stanovení správné formy likvidace. Zdrojem potravy dřevo-

kazné houby jsou anatomické elementy dřeva, a tím pevnost dřeva snižují. Rozvoj lze rozdělit do dvou stádií. První stádium je penetrace do buněk, kdy se jejich hyfy šíří především v prostoru lumenů. Prorůstají přes perforace cév z buňky do buňky, dvůrkatými ztenčeninami (tracheidy, cévy), nebo jednoduchými ztenčeninami (librifornní vlákna, parenchymatické buňky), popřípadě přímo buněčnými stěnami. Prorůstání hyf probíhá na bázi enzymatického rozkládání buněčné stěny a lokálního extrémně vysokého mechanického tlaku hyfy (Reinprecht, 1997). Druhým stádiem je fruktifikace. To znamená, že se produkují spóry, které bývají zdrojem biodegradace. Kontaktem jednotlivých prvků se rozšiřuje mycelium hub. Signálem vážného poškození hnilobou je přítomnost plodnic. Mezi hlavní kategorie hnilob, objevující se u prvků zabudovaných u dřevěných konstrukcí, jsou hnědá hniloba, bílá hniloba a měkká hniloba (Reinprecht, 1997; Unger, 2001).

Proces rozkladu dřeva je různý, záleží, je-li způsobován houbami celulózovorními, nebo lignivorními. Takzvanou destrukční hnilobu dřeva vyvolávají celulózovorní houby. Zdrojem výživy celulózovorní houby a energie je především celulózová složka dřeva. Lignin se během tohoto procesu transformuje na látky humusové povahy. Z toho důvodu napadené dřevo postupně tmavne a kostkovitě se rozpadá. Odborně se činnost celulózovorních hub označuje jako červená či hnědá hniloba a nejčastěji je způsobena houbami z rodů *Serpula* a *Coniophora* (Baier, Týn, 1996). Lignovorní houby, které vyvolávají tzv. korozivní hnilobu, využívají všechny složky dřeva (celulózu i lignin). Dřevo působením hub měkne, zesvětlí a vytvářejí se v něm nápadné komůrky a ve finálním stádiu se drobí, ale nikdy se kostkovitě netrhá. Vzhledem k bílému zabarvení dřeva je napadení lignivorními houbami označováno jako bílá hniloba dřeva (Baier, Týn, 1996).

Dřevo napadené dřevokaznou houbou nebo hmyzem prokazuje snížené fyzikální a mechanické vlastnosti. Dřevo napadené hnilobou s úbytkem hmotnosti 6 %, vykazuje pokles rázové houževnatosti v ohybu o 50-80 %, pokles v pevnosti ohybu o 20-61 %, pokles pevnosti v tlaku o 12-27 % nebo pokles tvrdosti o 18-28 %; Výsledky prezentoval Reinprecht a Štefko (2000).

### **3.4.2 Biotická degradace způsobená dřevokazným hmyzem**

Většina hmyzích škůdců, kteří přímo poškozují zpracované dřevo, patří mezi Brouky (*Coleoptera*) a Blanokřídle – pilořitkovití (*Hymenoptera – Siricidae*) se do skladů a obydlí dostávají s řezivem ještě ve vývojovém stadiu; dospělý jedinci nakladou vajíčka do dřeva zpravidla již v lese. Jiní Blanokřídle, například mravenci (*Formicidae*),

užívají dřevo k vybudování hnízd, nebo dočasnému úkrytu se v obydlích vyskytují většinou jen zřídka (Baier, Týn, 1996).

Dřevo je hmyzem poškozováno především mechanicky a to formou požerků. Znehodnocování dřeva hmyzem probíhá za účelem získání úkrytu, potravy a také matérie. Ta slouží k vytvoření sítě chráněných požerků, ve kterých si dřevokaz účelně pěstuje mycelia hub, které mu slouží jako potrava pro larvy – ambroziový hmyz (Reinprecht, 1997). Různé druhy dřevokazného hmyzu dokáží v procesu mechanicko-biochemického rozkladu dřeva polysacharidy rozložit enzymatickou cestou na vodorozpustné cukry, které dále metabolizují na látky potřebné pro svůj vývoj. Tento proces probíhá v trávicím traktu hmyzu, ve kterém se produkují celulázy, xylanázy, malanázy a jiné enzymy, případně se trávení účastní symbiotické bakterie žijící přímo v jejich střevech (Reinprecht, 1997).

Hmyz potřebuje pro svůj růst optimální podmínky, jako je teplota 20°C a vlhkost těsně nad 10 % (Reinprecht, 1997). Unger (2001) uvádí 7% a vyšší vlhkost, pro hmyz jako optimální. Pro vizuální hodnocení dřevěných prvků je výskyt hmyzu doprovázen četností výletových otvorů.

Dřevní prach nebo drť na povrchu prvku nebo v těsné blízkosti pod ním vypovídá o přítomnosti aktivního hmyzu. Tyto povrchové indikátory ovšem nehovoří o velikosti rozsahu vnitřního poškození. Intenzivní napadení, především naším nejčastějším a nejrozšířenějším dřevokazným škůdcem, tesaříkem krovovým (*Hylotrupes bajulu*, Lilnaeus), může být velmi obtížné vizuálně lokalizovat. Především z důvodu minimálního poškození viditelných ploch prvků. Vizuální hodnocení v takovém případě slouží pouze jako podklad pro další metody hodnocení za pomoci nedestruktivních přístrojů. V případě dřevokazného hmyzu červotoče proužkováného (*Anobium punctatum*, De Geer) je vizuální hodnocení dostačující, jelikož otvory na povrchu prvku obvykle korespondují s rozsáhlým vnitřním poškozením.

### **3.5 Vlhkost dřeva (vliv vlhkosti na mez pevnosti a modul pružnosti)**

Při zpracování dřeva a nenásledném užívání má velký význam vlhkost. Vlhkostí dřeva ( $w$ ) se nazývá přítomnost vody ve dřevě, která je vyjadřována podílem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu. Udává se v procentech. Vodu obsaženou ve dřevě rozdělujeme podle jejího uložení ve dřevě do tří skupin na:

- vodu vázanou v chemických sloučeninách, kterou lze ze dřeva odstranit pouze spálením,



- vodu vázanou v buněčných stěnách,
- vodu volnou, která ve dřevě po zaplnění buněčných stěn vyplňuje prázdny vnitřní prostor buněk a mezibuněčné prostory

Dřevo je navlhavý materiál, který má schopnost měnit svoji vlhkost podle vlhkosti okolního prostředí. S každou změnou relativní vlhkosti a teploty vzduchu se mění také rovnovážná vlhkost dřeva. Vlhkost dřeva v závislosti na relativní vlhkosti a teplotě vzduchu můžeme určit z nomogramu. Pokud se mění množství (vázané) vody ve dřevě, a tím i míra vlhkosti, tak dřevo v důsledku přijímání nebo odevzdávání vody (přibližně 0 až 30% podílu vody) podléhá rozměrovým změnám – sesychá nebo bobtná. Podél vláken jsou rozměrové změny velmi malé, pro naše dřeviny se udává 0,1 až 0,4%. V příčných směrech dřevo mění své rozměry mnohem více – v radiálním směru 3 až 6%, v tangenciálním 6 až 12%.

#### Zjišťování vlhkosti dřeva

- Metodou přímou
- Metodou nepřímou

Jako obecně správné se považuje pravidlo, že výrobní vlhkost se má rovnat provozní vlhkosti, resp. u některých druhů výrobků má být o 1 - 2% nižší. Tím se předejde nežádoucím deformacím v důsledku kolísání teploty a relativní vlhkosti prostředí.

Gravimetrická metoda je přímá metoda, která vychází z definičního vzorce vlhkosti podle rovnice. Tato metoda je nejpřesnější metodou určení vlhkosti dřeva a je také referenční metodou při posuzování přesnosti ostatních metod.

Pracovní postup při gravimetrické metodě spočívá ve zjištění hmotnosti vlhkého dřeva  $m_w$  a absolutně suchého dřeva  $m_0$  po jeho vysušení při teplotě  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ . Sušení se kontroluje opakovaným vážením. Dřevo se za vysušené považuje tehdy, když mezi následujícími dvěma vážením v intervalu 2 hodin se hmotnost nezmění o více než 0,02 g, resp. 1%.

Výhodou gravimetrické metody je její vysoká přesnost, k nevýhodám patří náročnost na čas, pracnost přípravy tělísek a nemožnost kontinuálního měření vlhkosti.

Z nepřímých metod je u dřeva nejčastěji využíváno měření elektro fyzikálních veličin, které vykazují určitou závislost na vlhkosti dřeva. Vlhkost dřeva výrazně ovlivňuje všechny základní elektro fyzikální veličiny dřeva, proto se všechny z těchto

vlastností mohou pro účely měření vlhkosti dřeva použít. Pod elektrickým vlhkoměrem rozumíme takový přístroj, jehož činnost spočívá v měření některé elektrické veličiny dřeva, která je výrazně ovlivňovaná vlhkostí dřeva. Vlhkoměry tedy běžně měří některou elektrickou veličinu, která však přímo nepředstavuje materiálovou charakteristiku.

S ohledem na druh elektrického napětí můžeme vlhkoměry rozlišovat na odporové s jednosměrným napětím a dielektrické se střídavým napětím. Konkrétní elektrická veličina, která slouží pro zjišťování vlhkosti je však ovlivňována i dalšími fyzikálními činiteli. Tyto můžeme rozdělit na:

- vnitřní, dané vlastnostmi materiálu (druh, hustota, anizotropie, teplota, vady dřeva);
- vnější, tvořící podmínky měření (frekvence a intenzita elektrického pole, relativní vlhkost vzduchu, chemická kontaminace dřeva).

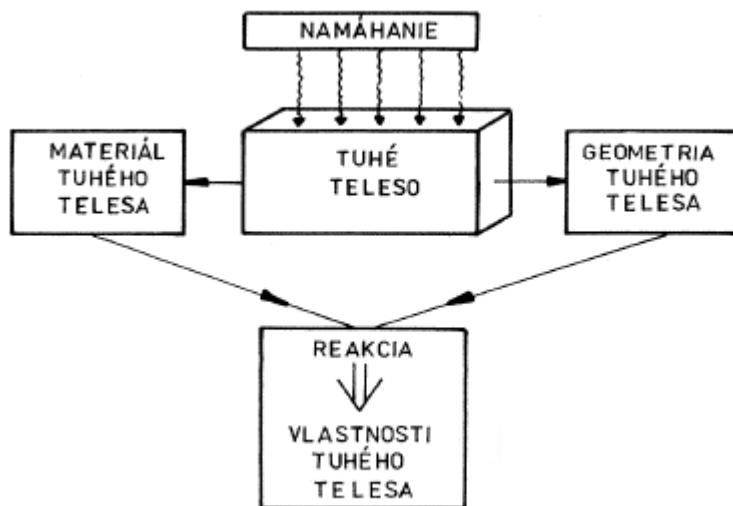
### **3.6 Mechanické namáhání**

Mechanickým namáháním rozumíme proces, při kterém nastává interakce mezi mechanickými silami anebo jiným činitelem namáhání a namáhaného tělesa, což ve výsledku zapříčiní dočasné anebo trvalé změny tvaru tohoto tělesa, viz obr. 1.

Některé druhy namáhání působí jen na povrchu tělesa, jako je například tření, mechanické, chemické namáhání. Se zřetelem na různé druhy namáhání dřeva a jejich vliv na povrch, nebo na celý objem třeba především počítat s působením více druhů namáhání současně.

Jak již bylo uvedeno, mechanické namáhání dřeva je takový stav, při kterém na dřevo působí vnější mechanické síly, které ho deformují v závislosti od míry vnitřního odporu jeho struktury. Při mechanickém namáhání je objektem dřevo, tedy tuhé těleso. Reakce dřeva na mechanické namáhání nezávisí jen od vazeb chemických složek dřeva a jejich vzájemného spojení (celulózy, ligninu, hemicelulózy), ale často v rozhodující míře od samotné geometrie tělesa.

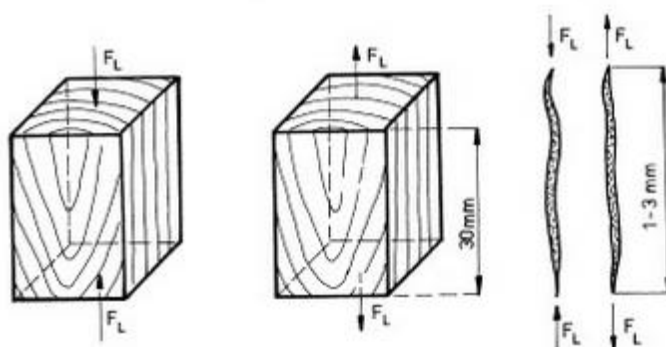
Geometrie zkušebních těles dřeva je definována geometrickým tvarem, na kterém zkoušíme mechanické vlastnosti, ale i rozměry tělesa a v některých případech i kvalitou povrchu tělesa.



Obr. 1: Schéma systému mechanického namáhání (Požgaj, 1997)

### 3.6.1 Tlak

Jakmile síla působící podél vláken je záporná, říkáme ji tlaková. V opačném případě, kdy bude působit kolmo na průřez a bude kladná, hovoříme o tahovém namáhání. Napětí a deformace jsou označeny záporným znaménkem. V prvním případě jsou vlákna natahována, ve druhém jsou stlačována. Po dosažení meze pevnosti v tlaku se vlákna začnou roztlačovat.



Obr. 2: Působení v tlaku a tahu (Požgaj, 1997)

### 3.7 Zkoušení dřeva

Zkušební tělesa mají tvar pravoúhlého hranolu se základnou  $20 \times 20$  mm a délkou ve směru vláken 30 mm. V polovině výšky zkušební tělesa se změří rozměry průřezu s přesností 0,1 mm. Zkušební těleso se vloží do lisu a rovnoměrně se zatěžuje. Při porušení vzorku se odečte maximální zatížení  $F_{max}$ .

Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken  $\sigma_w$  v N/mm<sup>2</sup> při vlhkosti zkušebního tělesa  $w$  se vypočítá dle vztahu:

$$\sigma_w = F_{\max} / a.b$$

$F_{\max}$  je maximální zatížení v N;  $a$ ,  $b$  rozměry průřezu zkušebního tělesa v mm.

Změna pevnosti dřeva má v závislosti na změně obsahu vázané vody nelineární průběh, který v intervalu 9-15 % můžeme nahradit přímkou. Při změně vlhkosti o 1 % v rozsahu vody vázané se pevnost dřeva změní průměrně o 3-4 % (výjimkou je pevnost v tahu). Přepočet na 12% vlhkost se provádí podle vztahu:

$$\sigma_{12} = \sigma_w [1 + \alpha(w - 12)]$$

$w$  - vlhkost dřeva v době zkoušení %;  $\sigma_w$  - pevnost dřeva při zkoušení N/mm<sup>2</sup>;  $\alpha$  - opravný koeficient pro daný způsob zatížení, opravný koeficient vyjadřuje vliv vlhkosti na danou vlastnost

Opravný koeficient  $\alpha$  závisí na způsobu zatížení: Tlak ve směru vláken  $\alpha = 0,04$  / Tlak napříč vláken  $\alpha = 0,035$  / Tah ve směru vláken  $\alpha = 0,01$  / Tah napříč vláken (R)  $\alpha = 0,01$  / Tah napříč vláken (T)  $\alpha = 0,025$  / Statický ohyb  $\alpha = 0,04$  / Smyk ve směru vláken  $\alpha = 0,03$ .

### 3.8 Nedestruktivní metody

Základem diagnostiky dřeva zabudovaného ve stavbách je vizuální průzkum. Umožňuje odhalit viditelné poškození dřeva. Problém nastává ve chvíli, kdy je třeba přesně definovat celkové poškození jednotlivých prvků konstrukce, tzn. identifikovat rozsah vnitřního poškození, lokalizovat přechod mezi zdravou a poškozenou částí, a určit mechanické a fyzikální vlastnosti. A právě hodnocení kvality a poškození dřeva ve stavebních konstrukcích je velice významnou činností pro určení rozsahu sanace nebo či snad dokonce úplnou výměnu konkrétního dřevěného prvku. Celkové rekonstrukce nejsou ale žádoucí, obzvláště v krovech, střepech či jiných konstrukcích historicky významných pro společnost.

Proto byla vyvinuta celá řada přístrojů a metod pro posouzení od nejjednodušších a neinvazivních, jako je vizuální posuzování, až po metody do hloubky zkoumající stav

dřevěných prvků, s odpovídající velikostí zásahu, za účelem zjištění statické fyzikálně mechanických vlastností nebo statické únosnosti daného prvku.

### **3.8.1 Vizualní posouzení**

Vizuálním hodnocením získáme informace nejen o vlastnostech a stavu materiálu, ale i o technologických postupech, dodatečných zásazích do konstrukce a také o přibližném stáří dřevěných konstrukcí. Touto metodou lze i určit druh použitého dřeva, charakteristické znaky prvku, vady dřeva, a odhadnout povrchové biotické a abiotické poškození prvku. Většinou se ale jedná pouze o subjektivní posouzení odborníka provádějícího tento průzkum. Zde ovšem nastává problém, jelikož 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.

Návrhy sanací a oprav historických dřevěných konstrukcí by měly vedle jejich funkční stabilizace a prodloužení životnosti sledovat cíl zachování co největšího objemu původního materiálu, který je nositelem celé řady cenných informací. 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, Bláha, 2005).

### **3.8.2 Akustické metody**

Akustické vlastnosti jsou vyjadřovány schopností materiálu utlumit, vést nebo zesílit zvuk. Jeho vnější příčinou je uspořádaný kmitavý pohyb molekul hmotného prostředí přenášený vzájemným působením sil molekul. Zvuk jako mechanické vlnění může být charakterizován vlnovou délkou, amplitudou vlnění, frekvencí a rychlostí šíření zvuku. Zvuk se šíří rychlostí  $c$ , která závisí na frekvenci  $f$  a vlnové délce  $\lambda$  podle vztahu  $c = \lambda f$ .

Na rozdíl od řady technických materiálů (zejména kovů) je studium šíření vln ve dřevě výrazně složitější, protože dřevo vykazuje anizotropní vlastnosti související s chemickým složením a anatomickou stavbou. Rychlost šíření zvuku je tím větší, čím je větší modul pružnosti a menší hustota dřeva. Rychlost šíření zvuku ve dřevě je tedy závislá na druhu dřeva a má také anizotropní charakter (Horáček, 2009). Poměr hodnot

rychlostí šíření zvuku ve dřevě podél a napříč vláken v radiálním a tangenciálním směru lze vyjádřit přibližně  $c_L:c_P:c_T= 15:5:3$  (Požgaj, 1997),  $14,7 : 5 : 3,95$  (Kloiber, 2007). Velikost uvedených poměrů závisí na dřevině a na poměru modulů pružnosti podél vláken a kolmo na vlákna. Rychlosti šíření zvuku se zvyšují s hustotou dřeva, avšak závislost je malá a téměř nevyužitelná. Rychlost šíření zvuku klesá s rostoucí vlhkostí dřeva.

Jak již bylo zmíněno, principem této metody je šíření akustických neboli vibračních vln ve dřevě. Přístroje pracující mimo slyšitelnou oblast zvuku. Většina komerčně dostupných přístrojů je kalibrovaná a měla by tedy, v případě výrobcem doporučené obsluhy, poskytovat porovnatelné výsledky.

Přístroje se skládají ze dvou piezoelektrických, nebo zarážecích sond, z nichž jedna plní funkci vysílače a druhá přijímače. Další součástí je pulzní generátor s displejem, který udává informace o rychlosti, či čase průchodu materiálem.

Typickým zařízením pracujícím na tomto principu je Arboristic DecayDetector je japonský nedestruktivní defektoskopický ultrazvukový přístroj, pracující na principu šíření vln – elastické deformace v materiálu (Kloiber, Kotlínová, 2007). Tento přístroj používá odlišný typ sond, které jsou ukončené gumovou čepičkou, což zajišťuje lepší kontakt s povrchem materiálu a vyrovnání různých nerovností. Tento přístroj užívá frekvenci 77kHz. Stejně jako u ostatních přístrojů lze na základě času, respektive šíření zvukové vlny určit případná přítomnost dutin, hniloby, či suků.

Pundit Plus je produkt anglické firmy a taktéž přenosný ultrazvukový přístroj. V praxi se využívá na zjišťování jakosti, kvality a technického stavu různých prvků dřevěných konstrukcí, jako jsou vazné a stropní trámy, krokve, sloupy a jiné nosné konstrukce. Přístroj je vybaven piezoelektrickými sondami pracujícími na frekvenci 54 a 150 kHz, které je možno vyměnit. Sondy se přikládají na měřeném prvku přímo proti sobě a na zlepšení kontaktu s materiálem se používá gel, vazelína, plastelína nebo jiný materiál podobného charakteru, který může zlepšit průchod akustických vln do dřeva.

Tico, zařízení švýcarské firmy užívané převážně ve stavebnictví na zjišťování kvality betonu a jiných stavebních materiálů. Zařízení pracující na frekvencích 150, 82, 54 kHz s piezoelektrickými sondami. Princip práce a výstupní veličiny je obdobný jako u jiných ultrazvukových přístrojů. Tedy měření rychlosti šíření ultrazvukových vln, nebo měření rychlosti šíření elastické deformace materiálem.

Dalším zařízením užívané především na diagnostiku stromů v parcích je Fakopp 2D a 3D vyvinuté maďarským profesorem Ferencem Divósem. Součástí přístroje jsou speciální zarážecí sondy, které zabezpečují kontakt se dřevem a přenos signálu. Toto zařízení nemá vysílací sondu, proto je nezbytné pro jeho funkci potřeba kladivo, kterým

se poklepává na jednu ze dvojice sond, dokud se na displeji nezobrazí stejný čas přechodu napěťové vlny pro každou z dvojice sond.



Obr. 3: Ultrazvukový měřicí přístroj se sondami (Kloiber)

Modifikovaný model výše popsaného přístroje Fakopp je Ultrasonic Timer, u kterého lze měnit sondy a který si budí signál automaticky po jeho zapnutí. Tudíž se nemusí jednak zarážet sondy do dřeva, čím nedochází k jeho poškození a navíc není třeba kladívko, kterým byly vyvolávány signály ve dřevě.

Na základě dřívějších experimentálních měření a jiných výsledků lze o napěťově deformačních metodách konstatovat, že akustické metody poskytují relativně rychlý, jednoduchý a dostupný pohled na jakost dřeva, ať už se jedná o dřevo živé, nebo již zpracované. Na rychlost přenosu akustické vlny má značný vliv kvalita zpracování povrchu dřeva, tvar a druh sondy a její správná orientace (Hrivňák, Kloiber, 2013). Zarážecí sondy jsou méně ovlivňovány nerovností povrchu a jeví se jako nejvhodnější pro praktické i vědecké užití, ačkoliv dochází k částečnému poškození povrchu dřeva. Co se vad dřeva týče, je měření výrazně ovlivňováno točivostí a sukovitostí dřeva, případně jeho trhlinami.

### 3.8.3 Rentgen

Nedávný vývoj nových lehkých pulsních rentgenů napájených baterií a průmyslová výroba fosforových desek pro záznam rentgenogramů výrazně zvýšily využitelnost této nedestruktivní metody pro diagnostiku stavebních konstrukcí. Nízko výkonové

rentgeny jsou velmi bezpečné a mají dostatečnou razanci pro vyšetřování dřevěných konstrukcí. (Drdácký, Jirovský 2007).

Zařízení známé jako rentgenové záření, je tvořeno proudem částic (fotonů) a vzniká při nárazu elektronů, pohybujících se vysokou rychlostí, na překážku. Při pronikání rentgenových paprsků látkou, dochází k řadě interakcí, které ovlivňují jejich průchod materiálem a záření pohlcují. Zeslabení rentgenového záření závisí na fyzikálně chemickém složení látky a částečně na její měrné hmotnosti a na tloušťce prozařovaného materiálu.

Firma EPIX přišla s inovativním zařízením pro opakovaný záznam a digitalizaci obrazu. Záznamovou desku tvoří tenká vrstva fosforových krystalů, které pohlcují a uchovávají energii, pomocí které se následně vyvolává obraz. To díky červenému laseru, který ozáří dané krystaly. Ty při přechodu z nestabilního do stabilního stavu vyzařují viditelné modré světlo díky čemuž je pomocí skeneru získáván obraz.

Dříve používaná zařízení (v ČR již od roku 1944) bylo z důvodu nákladnosti a bezpečnosti méně rozšířené. Původní velice těžká zařízení byla obtížně dopravitelná do prostor, kde byl prováděn průzkum. Tato metoda se jeví jako velice slibná, jelikož byla odstraněna většina těchto nevýhod. Hustotu, tloušťku, absorpci energie a chemické vlastnosti materiálu, to vše lze pomocí moderních rentgenových technik zjistit. Dané informace jsou získávány v reálném čase.

Radiografie neboli radioskopie v reálném čase byla vyvinuta koncem 80. let. Může být využita pro určování míst a rozsahu poškození dřeva biologickými škůdci, případně jinou degradací. Příkladem může být hledání přítomnosti hmyzu a dřevokazných hub. Viz Lang a Middleton, 1997 Radiography of Cultural Material. Významná je možnost studia provedení skrytých tesařských spojů, zejména stavu dlabů a čepů. Pro stavebně historické průzkumy je zásadní, že takové studium je možno uskutečnit i bez obnažení dřevěného prvku zakrytého pod vrstvami vápenných nátěrů nebo omítky či dokonce uloženého ve zdivu. Způsob porušení a průběh trhlin uvnitř dřevěných prvků lze sledovat rentgenováním. (Drdácký, Jirovský 2007).

### **3.9 Semi destruktivní metody**

V současnosti lze pozorovat v České republice snahu o zvýšení podílu realizace dřevěných staveb. Z toho plyne zřejmá potřeba věnovat zvýšenou pozornost dřevu jako stavebnímu materiálu, naučit se kontrolovat jeho kvalitu před zahájením stavby i již zabudovaného dřeva. Při těchto metodách se destruktivně zasahuje do dřeva, ale zásah



je tak malý, že ho lze snadno opravit. Během těchto metod nesmí být ovlivněna stabilita ani funkčnost prvku. Zkoušky lze provádět přímo na výrobku. Tímto způsobem lze zjistit defekty pod povrchem i uvnitř zkoušeného materiálu, nebo výrobku. Odhalením vad nadkritických rozměrů lze zabránit náhlému křehkému nebo únavovému porušení, které by nastalo následným provozem součásti s touto vadou.

### 3.9.1 Videoscopie

Moderní videoscopické metody nepotřebují velké otvory pro vložení video kamery, proto tak může být uvažováno s méně invazivní semi-destruktivní diagnostickou metodou, jako jsou například mikro vývrty. Otvory průměrné velikosti 10mm jsou dostatečné k přístupu videoscopického zařízení. Tyto kamery jsou na dostatečně flexibilních kabelech, které lze zavést do větších vzdáleností než jakýkoliv pevný vývrt.

Videoscopie podává informace o aktuálním stavu konstrukce, změnách materiálu a přítomnosti dutin, popřípadě rozsahu a typu dutin. Tyto náklady lze zjistit pouze ze vstupního „inspekčního“ otvoru. Ve většině případů může docházet i k takovému poškození, kdy na první pohled není patrné, že je určitý dřevěný prvek napaden.



Obr. 4: Zařízení k provádění videoscopie



Obr. 5: Pohled do útroby dřevěného prvku pomocí videoscopického zařízení

### 3.9.2 Pilodyn

Testování pomocí přístroje Pilodyn patří mezi semi-destruktivní metody, protože poškození při testovaného materiálu je zanedbatelně malé. Pilodyn je jednoduché zařízení, které nám umožňuje měřit hloubku průniku trnu o průměru 2,5 mm, vystřeleného do dřeva při konstantní energii 6J. Hloubka průniku je měřena při penetraci trnu do povrchu materiálu. Maximální hloubka průniku trnu je konstrukcí přístroje omezena na 40 mm, čímž lze zjišťovat pouze povrchové vlastnosti, či poškození dřeva. Hloubka zaražení trnu je odvislá na síle, kterou je vystřelován do dřeva (Zombori, 2000), přičemž je hloubka průniku v dobré shodě s hustotou dřeva (Kasal a kol. 2004).

Pilodyn byl vyvinutý Švýcarskou společností pro získání velkého množství dat z dřevěných telefonních sloupů, které byly napadeny měkkou hnilobou. Tento přístroj se vyrábí v několika verzích, které se liší ve velikosti zarážecí síly (standardně síla o velikosti 18 J), nebo v možnosti opakovaného zaražení u modelu 4JR. Hloubka zaražení trnu do materiálu se odečítá ze stupnice umístěné na straně materiálu.



Obr. 6: Pilodyn 6J

Görlacher (1987) určil korelační koeficienty závislé od počtu měření a druhu dřeviny ve vztahu mezi hloubkou zaražení ocelového hrotu a hustotou dřeva v rozsahu od 0,74 až 0,92, proto je nutné zkalkulování přístroje, což dokazují i výsledky (Kuklíková, 2004).

Významný vliv na výsledky získané tímto přístrojem se odvíjí od směru průniku trnu do dřeva. Bylo dokázáno, že radiální směr penetrace je lepší než tangenciální a to z důvodu pravidelného střídání jarních a letních částí letokruhů. Pokud je trn zarážen jen ve směru tangenciálním, často dochází k penetraci pouze jedné části letokruhů. To způsobuje značné zkreslení výsledků. Při měření ve směru radiálním a při odklonu vláken do 30° se výsledky liší méně než 10%. Rozdíl mezi radiálním a tangenciálním směrem je při vlhkostech dřeva vyšší jak 30% zhruba jen 5-6% , rozdíl při nižších vlhkostech je i větší jak 20% (Hrivnák et al. 2013).

V centru Lisabonu v roce 1877 byl zkoumán jakostní stav dvou trámů z borovice ze střešní konstrukce kostela. Přístroj během zkoumání in-situ prvků poskytl velice zajímavé výsledky, nicméně v porovnání s resistographem nebyly až tak hodnotné (Henriques et al. 2011). Pilodyn je proto spíše vhodnější při zkoumání zdravého dřeva, které má rovnoměrnou strukturu povrchu i uvnitř (Hrivnák et al. 2013).

### **3.9.3 Resistograph**

Jednou z nejpoužívanějších metod semi destruktivní defektoskopie je v současné době odporové mikro vrtání. Tato metoda hodnocení poskytuje informace o kvalitě materiálu, stavu konstrukčních prvků a nepřímo i o jejich únosnosti v konstrukci. Tato technika byla úspěšně použita v mnoha publikovaných pracích z průzkumů historických dřevěných konstrukcí „in-situ“ (Tampone a kol., 2002; Drdácký a kol., 2003). Z výsledků měření lze určit rozměry průřezu a zbytkový příčný průřez. Což je důležité především tam, kde je není možné změřit přímo. Dále lze přesně lokalizovat shnilé dřevo z venku neviditelné, rozložení letokruhů a přítomnost přirozených defektů (Wang a kol., 2003).

Jedná se o komerčně dostupný přístroj pracující na principu semi destruktivního testování, měřením odporu při vnikání tenkého vrtáku do dřeva. Dosah vrtání činí až 400 mm, což je teoreticky dostatečné pro většinu standartních stavebních prvků. Při vrtání do dřeva měříme odpor materiálu proti prostupu malého vrtáku s průměrem 1,5-3,0 mm.



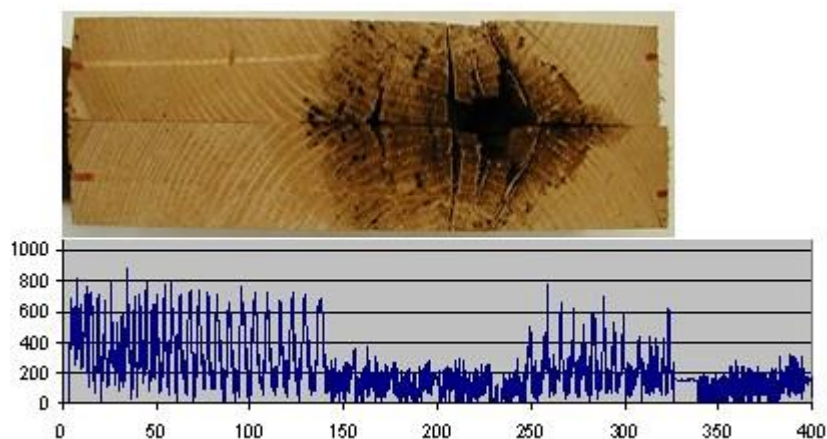
Obr. 7: Odporové mikrovrtání na zabudovaném dřevěném prvku

Odporová vrtačka, poháněná elektrickým motorem na bateriový pohon, usnadňuje použití přístroje v terénu. Vrtáky jsou dostatečně pružné, z wolframové oceli, zakončené vrtacím hrotem. Délka vrtáku se mění podle typu a výrobce. Posun při vrtání je konstantní a otáčky jsou kontinuální. Grafickým výstupem je znázornění hodnot odporu (hustotní profil, dendrogram). Záznam lze uchovávat na papírové pásce, v záznamníku, nebo v počítači v podobě elektronických dat. Vrcholky křivky vypovídají o vyšším odporu materiálu, tedy hustotě, zatímco spodní body jsou spojené s nižším odporem a hustotou.

Nejčastější zhoršení jednotlivých prvků ze dřeva bývá způsobeno vnitřním narušením bez zřetelných změn na povrchu (Brashaw a kol., 2005). Odporové vrtání umožňuje náhled na vrtané dřevo pomocí hustotního profilu. Malý odpor při vrtání nevyžaduje příliš vysoký točivý moment motoru. S tím souvisí, že malý točivý moment motoru je úměrný nižší hustotě, způsobené požerky hmyzu, trhliny a praskliny (Kasal, Antony, 2004).

Vrtání dřevěné struktury v různých směrech přináší přehled o narušení dřevěných prvků. Grafy prezentují stav dřeva v podélném a tangenciálním směru, jen v lokálních oblastech dřevěného prvku. Pro rezonanční dřevo je vyžadován vyšší točivý moment, který je způsoben vyšším odporem. Odlišné odpory při vrtání mohou objevit různé úrovně poškození. Poškozený materiál vykazuje daleko menší odpor při vrtání než dřevo zdravé. Odpor vrtání je nulový, stejně jako při posledním stádiu hniloby.

Dřevo napadené hmyzem vykazuje specifické grafické výstupy. Zřejmé vrcholky v grafu jsou způsobovány průběhem nástroje skrz materiál (Obr. 8). Ty popisují střídání zdravého dřeva a volného prostoru ve dřevě - chodbičky typické pro poškození hmyzem.



Obr. 8: průřez zkoušeným dřevěným prvkem s grafickým výstupem měření

Stejně jako většina diagnostických metod, má i tato metoda své omezení. Souvisí s provozem zařízení, které musí být při vývrtu v kolmém směru ke dřevu. Zařízení svojí konstrukcí může působit těžkopádně. Další omezení souvisí jen s lokálním charakterem vyhodnocení. Proto je doporučeno užívat Resistograph zároveň s jinou nedestruktivní metodou, tak aby se získaly odpovídající hodnoty, vypovídající příslušným mechanickým vlastnostem zkoumaných historických konstrukcí.

Resistograph je velice dobře aplikovatelný pro identifikaci a nalezení vnitřního poškození. Nevýhodou je že vyžaduje relativně dlouhý čas pro vrtání. Obzvláště v případech, kdy se jedná o zdobené povrchy, může být vícenásobné vrtání omezující. Jelikož je vyžadováno zachování původního stavu bez jakéhokoliv poškození. Vrták má malý průměr, jeho tuhost je menší, a to způsobuje, že je sice pružnější, ale může se při vrtání ohnout a následovat letokruhy. Což je důvod odchylek a nepřesností ve výstupním grafu.

Výhody a nevýhody mechanicko-odporových metod lze shrnout na základě určitých experimentálních měření a výsledků prací, ať už v laboratoři, nebo v terénu. Podávají spolehlivější a přesnější obraz o skutečném stavu dřeva oproti akustickým metodám. Jelikož jejich konstrukční řešení je uzpůsobeno k řádné stabilizaci při měření, výstupy nejsou nijak zvlášť ovlivněné kvalitou a opracováním povrchu dřeva, a velikostí přítlačné síly. Velice významnou roli hraje umístění a orientace k testovanému prvku,



z důvodu že můžeme jednak minout poškozenou část dřeva, tak i zkoušení ve špatném směru, což by značně zkreslilo výsledky. V Případě mechanicko-odporových metod, trhliny ovlivňují výsledky testů podstatně méně, nežli u akustických metod. Ke správné diagnostice je třeba určitých zkušeností k rozpoznání této vady, aby nedošlo k mylnému posouzení dřevěného prvku. Stejně jako při zarážení hrotů u akustických metod, je i zde nevýhodou poškození povrchu dřeva, hlavně pokud se jedná o historicky významný prvek. Pokud nechceme zarážení hrotů při měření výrazněji poškodit danou část dřeva, dostáváme jen informace o konkrétním místě a těsně přilehlém okolí, což se může jevit jako nedostatek této metody.

### 3.10 Roztlačování čelistí ve vývrtnu

Zařízení je navrženo k měření mechanických vlastností dřeva v tlaku užívající semi destruktivní metodu měření, v rámci kterého jsou vloženy malé zatěžovací čelisti v předvrtaném kruhovém otvoru, v němž následně probíhá měření modifikovanou tlakovou zkouškou.



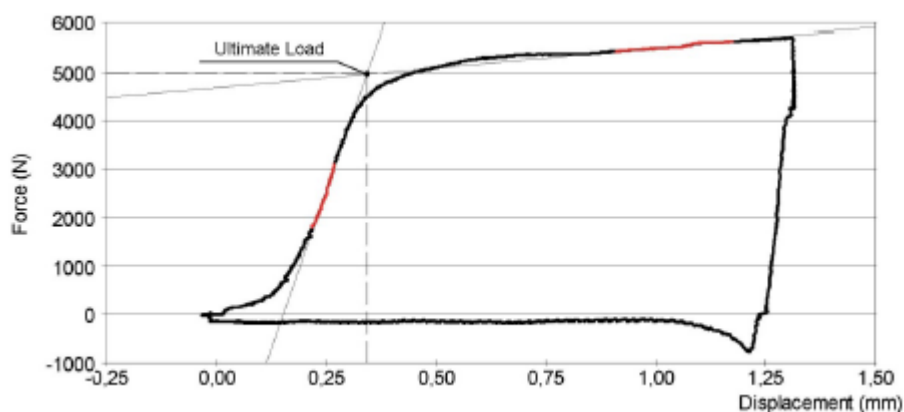
Obr. 9: Čelisti měřícího zařízení vložené do předvrtaného otvoru

Zařízení může být použito jak v laboratoři, tak i v terénu určující stav a kvalitu trámů. Zařízení zjišťuje závislost napětí na deformaci vyvolaném symetricky od sebe roztlačovanými čelisti v radiálně předvrtaném otvoru o průměru 12 mm. Samotné měření probíhá tak, že zařízení je přiloženo k testovanému elementu (běžný konstrukční element obdélníkového průřezu) pomocí válcového pláště, který umožňuje měření ve čtyřech pozicích v předvrtaném otvoru. Aretace je prováděna pomocí dvou rýhovaných šroubů, pro pozice (hloubka vysunutí čelistí) 5-25 mm, 35-55 mm, 65-85 mm, a 95-115 mm.



Obr. 10: Pohled na měřící zařízení s vysunutými čelistmi.

Když je zařízení přiloženo ke zkoušenému elementu, čelisti jsou roztahovány pomocí akumulátorové vrtačky, která otáčí hřídeli. Ta přes planetkovou převodovku, pomocí šnekového převodníku a hřebenu přitahuje táhlo, na jehož konci je bronzový klín, který svým pohybem vyvolá roztažení čelistí. Maximální délka roztažení zatěžovacích čelistí je 1,5 mm na obě strany. Zaoblené čelisti jsou 5 mm široké a 20 mm dlouhé. Úhel klínu, po kterém kloužou čelisti je  $15^\circ$ . Síla čelistí je průběžně nahrávána. Je kalibrována na skutečnou sílu zatěžovacích čelistí a přibližně odpovídající měřené vzdálenosti pohybujících se čelistí. Signály jsou přenášeny bezdrátově na přenosný počítač, kde jsou zpracovávány.



Obr. 11: Pracovní diagram zkoušky roztlačovacím zařízením.

### 3.11 Mechanické namáhání

Rozlišují se podle působícího napětí, které vzniká v důsledku vnějších sil. Napětí definujeme jako velikost vnitřní síly, která je vztažena na jednotku plochy tělesa podle vztahu

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

kde  $F$  – vnější síla (N) a  $S$  – plocha tělesa ( $\text{m}^2$ ); kromě základní jednotky Pa ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ ) se zpravidla používá odvozená jednotka MPa ( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ).

### 3.11.1 Pružnost dřeva

Vratná deformace dřeva působením vnějších sil, dřevo se ale po jejich působení vrací do původního tvaru. Modul pružnosti vyjadřuje napětí, při němž se v mezích pružnosti mění pevnostní parametry dřeva, udává se v MPa. Modul pružnosti  $E$  se mění v závislosti na druhu dřeviny, na vlhkosti, na anizotropii, na vadách dřeva a na objemové hmotnosti. Zkouší se podle normy ČSN EN 408. Určí se ze vztahu

$$E = \frac{\sigma_{\dot{u}}}{\varepsilon_{\dot{u}}} \quad (\text{Pa})$$

Kde  $E$  je modul pružnosti v (Pa),  $\sigma_{\dot{u}}$  je mez úměrnosti (lineární část pracovního diagramu napětí-deformace),  $\varepsilon_{\dot{u}}$  normálové namáhání.

### 3.11.2 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva charakterizuje odolnost dřeva vůči jeho trvalému porušení. Kvantitativně se pevnost vyjadřuje napětím, při kterém se poruší soudržnost tělesa - napětím na mezi pevnost  $\sigma_p$ . Pevnosti dřeva se zjišťují prostřednictvím zkoušek, kde se sleduje síla v okamžiku porušení tělesa. Pevnost v tlaku se zkouší podle ČSN 49 0110 a ČSN 49 0112.

### 3.11.3 Faktory ovlivňující pevnost a pružnost dřeva

Při posuzování změn vlastností dřeva platí, že se stoupající vlhkostí do meze hygroskopie se pružnostní a pevnostní vlastnosti dřeva snižují a vlhkost nad mezí hygroskopie (voda volná) mechanické vlastnosti dřeva neovlivňuje (Horáček, 2009). Vliv vody vázané sledujeme hlavně při užití dřeva na konstrukční účely a technologického zpracování dřeva. Dřevěné konstrukce bývají během své životnosti často vystaveny různým povětrnostním podmínkám a rovnovážná vlhkost se pohybuje v rozsahu 9 až 22%. Při změně vlhkosti o 1% v rozsahu vody vázané se pevnost dřeva změní průměrně o 3–4% (Horáček, 2009).

Přepočet mechanické vlastnosti dřeva zjištěné při libovolné vlhkosti v intervalu 5–25 % na vlastnost při vlhkosti 12% (odpovídá zkušebním postupům podle technických norem) se provádí podle vztahů:



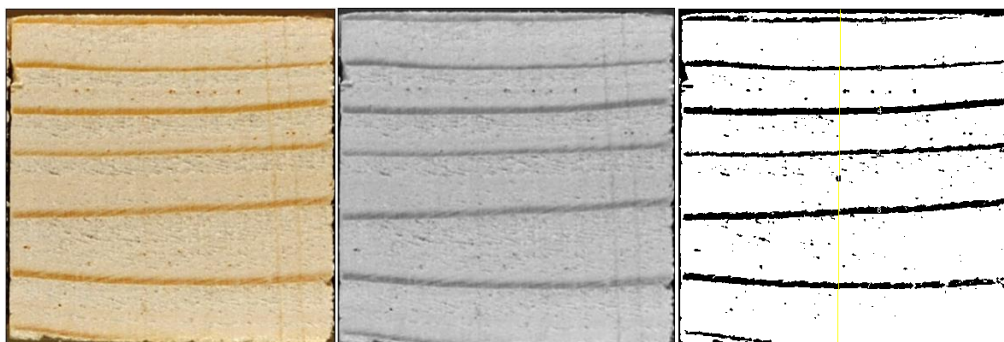
$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100$$

Kde:  $m_1$  hmotnost zkušební tělesa ve stavu vlhkém v [g],  $m_2$  hmotnost zkušební tělesa po vysušení v [g],  $w$  vlhkost dřeva v [%]. Výsledek zkoušky vlhkosti se uvede s přesností na 1,0 %.

### 3.11.4 Stanovení podílu letního dřeva obrazovou analýzou

Obrazová analýza představuje nástroj, pomocí kterého je možné převést informace obsažené v obraz do numerické formy.

Zjednodušeně si lze přiblížit obrazovou analýzu a její postupy jako soubor po sobě následujících kroků vedoucí k přeměně obrazových vjemů do číselné podoby. Prvním krokem je získání obrazu v digitální podobě, následovaný jeho zpracováním do formy, která nejvíce vyhovuje plánovaným účelům. Dalším krokem může být diskriminace, jejímž výsledkem je binární obraz, obsahující pouze dvě barvy - černou a bílou, viz Obr.: 12.



Obr.: 12 Zpracování obrazu pro analýzu LD – fotografie, stupně šedi, binární obraz

V takto zpracovaném obraze je možné po jeho úpravě metodami matematické morfologie již poměrně snadno měřit a na základě těchto měření provádět výpočty. Při těchto krocích se digitální záznam mění a zjednodušuje, jak dokládá klesající velikost původního obrazu po jednotlivých krocích zpracování. Konečným výsledkem může být datový soubor s výsledky provedených výpočtů zabírající v porovnání s původním snímkem zlomek paměti počítače.

Letokruhy jsou tvořeny ročními přírůstky dřeva. Jeden letokruh je tvořen jarním a letním přírůstkem. U některých dřev je rozdíl v barvě jarního a letního dřeva velmi výrazný s rychlým přechodem (u jehličnatých stromů). V našem podnebném pásu pracuje kambium tak, že se jeho činnost zastaví před zimním obdobím a začne pracovat opět na

jaře. Na jaře většinou vzniká světleji zbarvená část letokruhů-jarní dřevo a v létě vzniká vnější tvrdší a tmavší část- letní dřevo.

Jarní dřevo slouží hlavně k vedení vody a letní dřevo má funkci mechanickou. Experimentální práce z oblasti výzkumu letního dřeva potvrzují, že zvýšený podíl letního dřeva zlepšují jeho mechanické vlastnosti (Požgaj, 1997). V průběhu jednoho roku vznikne jeden letokruh. V některých výjimečných případech se může stát, že v určitém roce v některé části kmene nevznikne žádný letokruh, nebo naopak vzniknou letokruhy dva.

## **4 Materiál a metodika**

### **4.1 Použité normy**

Vlastnosti dřeva a výrobků ze dřeva se zjišťují podle přesně definovaných postupů příslušných zkušebních norem, kde jsou přesně stanoveny rozměry zkušebních těles, požadavky na vlhkost a teplotu okolního prostředí a způsob zatěžování.

Parametry pevnosti a tuhosti se musí určovat na základě zkoušek pro druhy zatížení, kterým bude materiál v konstrukci vystaven, nebo na základě srovnání s podobnými druhy dřeva a tříd či materiálů na bázi dřeva, nebo na základě prověřených vztahů mezi různými vlastnostmi.

Pevnost v tlaku, tedy odpor, který klade dřevo vnější síle, jež se snaží dřevo stlačit. Pevnost v tlaku se zkouší podle ČSN 49 0110 a ČSN 49 0112.

Pružnost dřeva – vratná deformace dřeva působením vnějších sil, dřevo se ale po jejich působení vrací do původního tvaru. Modul pružnosti vyjadřuje napětí, při němž se v mezích pružnosti mění pevnostní parametry dřeva, udává se v MPa. Modul pružnosti se mění v závislosti na druhu dřeviny, na vlhkosti, na anizotropii, na vadách dřeva a na objemové hmotnosti. Zkouší se podle normy ČSN EN 408.

Princip stanovení pevnosti v tlaku ve směru vláken dle ČSN 49 0110, kde principem zkoušky je zatěžování zkušebního tělesa a odečet maximálního zatížení při jeho porušení v tlaku.

### **4.2 Odběr zkušebních těles**

Výsledky nedestruktivního zkoušení vlastností dřeva jsou vždy jen orientační, pro jejich zpřesnění by měly být provedeny průkazné zkoušky. Průkazné zkoušky slouží k přímému stanovení některých fyzikálně mechanických vlastností.

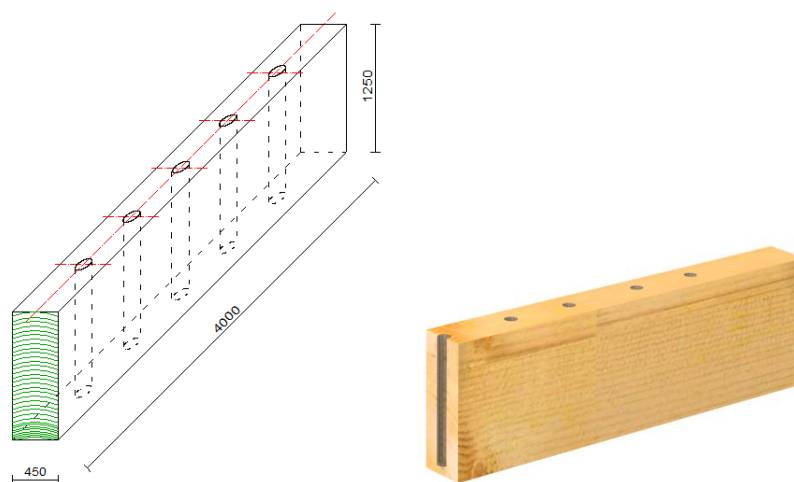
Referenční příčné rozměry zkušebních těles při stanovení mechanických vlastností konstrukčního dřeva musí být 150 mm. Alternativně lze stanovovat mechanické vlastnosti na malých bezvadných tělesech, nebo na tělesech konstrukčních rozměrů. V rámci této práce byly definovány dvě skupiny vzorků ze smrkového dřeva.

První skupina se skládala ze vzorků odebraných z míst přilehlých k jednotlivým polohám měření, ve kterých se měřilo nově zkonstruovaným přístrojem (skupina 2). V místě měření v dané hloubce hranolu, byly nařezány vždy dva standardní vzorky velikosti 20x20x30 mm, odpovídající normě ČSN EN 480. Pevnost v tlaku podél vláken zjišťovaná na vzorcích podle normy byla následně korelována s výsledky měření pomocí nového přístroje, tak aby byly splněny požadavky na měření tlakové pevnosti dle normy ČSN 49 0110 a ČSN 49 0112 pevnost v tlaku. V polovině výšky zkušebního tělesa byly změřeny rozměry průřezu s přesností 0,1 mm.



Obr. 13: Směry a roviny zkušebních tělísek (Požgaj, 1997)

Ve druhé skupině byly vzorky vyřezány v rozměrech 400×125×45 mm. A to z důvodu několikanásobného měření v různých hloubkách tělesa a různých vlhkostech tak jak je patrné na Obr. 14.



Obr. 14: Schéma odběru vzorků (vlevo) a navrtání pro následné zkoušení roztahujících se čelistí (vpravo)

### 4.3 Použité pomůcky

K měření standardních tělísek byl využit univerzální zkušební stroj Zwick Z050 s posuvem 10 mm/min, pomocí kterého můžeme uskutečnit zkoušky a testování standardních vzorků destruktivními testy podle ČSN EN (Obr. 18). Na spodním pohyblivém příčnicku jsou umístěna tenzometrická čidla, která nám zaznamenávají velikost působící síly na zkoušená tělesa s využitím předpisu průběhu zkoušky a vyhodnocení výsledků softwarem TestXpert. Deformace byla snímána pomocí extenzometrů, které vždy přiklopili k tělísku z obou stran.

Všechny vzorky byly zváženy pomocí digitální váhy na dvě desetinná místa. Rozměry tělísek byly změřeny pomocí digitálního měřidla také na dvě desetinná místa.

Ke klimatizování tělísek byla použita klimatizační komora, kde byla všechna tělíška (malá i velká) klimatizována na 12% vlhkost a to při teplotě 20 °C a 65 % relativní vlhkosti vzduchu. Malá tělíška byla po určité době, kdy se jejich vlhkost neměnila vyjmuta a zkoušena na univerzálním zkušebním stroji Zwick Z050 v prostém talku. Obdobně tomu bylo se vzorky většího průřezu, do kterých byl vyvrtán otvor o průměru 12 mm, a byla provedena zkouška pomocí roztahování čelistí ve čtyřech hloubkových úrovních, tak jak je popsáno výše.

Po provedení zkoušky roztlačováním, byly tyto vzorky uloženy zpět do klimatizační komory a klimatizovány na vlhkost 18 %, při teplotě vzduchu 20 °C a relativní vzdušné vlhkosti 85 %. Po dosažení požadované vlhkosti vyjmuty a opět vyvrtány otvory pro zkoušení opět ve čtyřech hloubkových úrovních. V poslední fázi byly vzorky klimatizovány při teplotě 20 °C a vzdušné vlhkosti 95 %, na vlhkost dřeva 24 %. Určení teplot a relativní vzdušné vlhkosti bylo určeno ze vztahu:

$$RVD(\%) = \frac{1,800}{W} \left[ \frac{Kh}{1 - Kh} + \frac{K_1Kh + 2K_1K_2K^2h^2}{1 + K_1Kh + K_1K_2K^2h^2} \right]$$

Kde  $h$  je relativní vlhkost a parametry  $W$ ,  $K$ ,  $K_1$  a  $K_2$  závisí na teplotě.

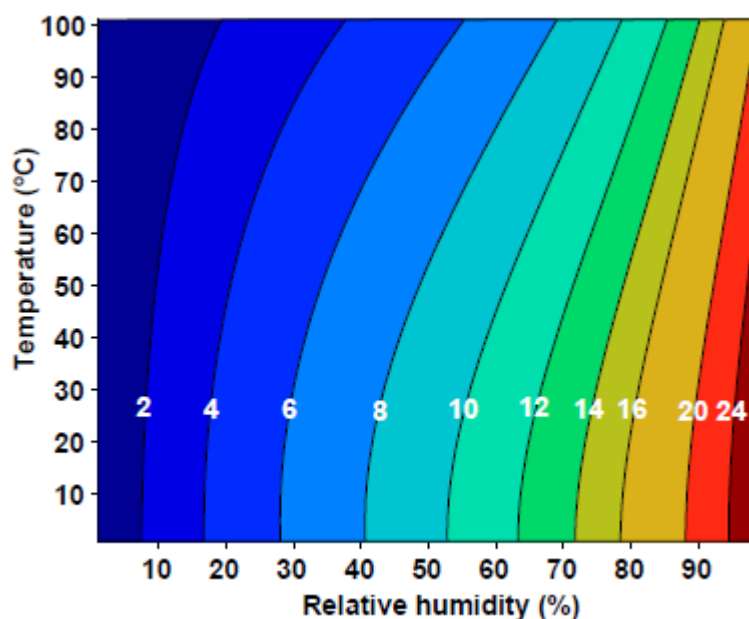
$$\text{Pro teplotu } T \text{ ve } ^\circ\text{C} \quad W = 349 + 1,29T + 0,01357T^2$$

$$K = 0,805 + 0,000736T - 0,00000273T^2$$

$$K_1 = 6,27 - 0,00938T - 0,000303T^2$$

$$K_2 = 1,91 + 0,0407T - 0,000293T^2$$

Kde je RVD (rovnovážný obsah vlhkosti) definován jako takový obsah vlhkosti, který ve dřevě ani nepřibývá a ani neubývá. Vztah mezi EMC, relativní vlhkostí vzduchu a teplotou je znázorněn v nomogramu na Obr. 15.



Obr. 15: Nomogram závislosti rovnovážné vlhkosti dřeva, teploty a relativní vzdušné vlhkosti vzduchu (Wood handbook, 2010)

#### 4.4 Zařízení pro roztlačování ve vývrtnu

Ověření tvrzení mechanických vlastností užitím měření pomocí semi-destruktivního zařízení bylo provedeno na dvaatřiceti 40 cm dlouhých trámciích získaných z Norského Smrku (*Picea abies* L. Karst.), Běžně využívaných v historických konstrukcích v České Republice.

Průřez trámů byl 40 × 125 mm. Po postupném vysušení všech šesti trámků a jejich klimatizace na 12 % obsahu vlhkosti, byly vyvrtány díry o průměru 12 mm. Jedna díra pro každou vlhkost (12 %, 18 % a 24 %). Vrty byly provedeny pouze v radiálním směru a vzdálenost mezi otvory byla 100 mm. Díry byly vyvrtány skrz celý trámek, což umožnilo provést měření pomocí čelistí ve všech čtyřech vrstvách: vrstva 1 (5-25 mm), vrstva 2 (35 -55 mm), vrstva 3 (65-85 mm), vrstva 4 (95-115 mm). Hloubky vrstev jsou dány díky konstrukci měřicího zařízení.

Měřicí část zařízení byla následně vložena do radiálního otvoru testovaného kusu dřeva. Čelisti byly roztahovány rovnoběžně s vlákny. V Otvorech jsou zřejmé otisky čelistí, což také poukazuje na vzdálenost mezi jednotlivými vrstvami měření napříč prvků. Ve výsledku bylo měřeno 384 pozic (32 trámků, vždy díra se čtyřmi hloubkovými pozicemi pro jednu vlhkost) užitím nově vyvinutého zařízení.

Mechanické vlastnosti byly stanoveny užitím záznamu měřených dat ve formě napětově-deformačního diagramu se záznamem zaznamenávané síly užití k roztlačování čelistí. Osa  $x$  reprezentuje pohyb čelistí v průběhu roztlačování, osa  $y$  zobrazuje sílu nezbytnou pro roztahování čelistí. Maximální síla ( $F_{max}$ ) – mez kluzu, byla stanovena z průsečíku tečen elastické a plastické části deformačně napětového diagramu. Konvenční tlakové zatížení ( $CSc(L)$ ), bylo určeno z podílu mezního zatížení a plochy roztlačujících čelistí. Modul pružnosti nemůže být určen přímo z diagramu, modul deformace (Mez pevnosti) byl stanoven použitím tečny křivky přiložením k lineární části silového působení a deformace viz Obr. 11.



Obr. 16: Roztlačovací zařízení připojeno na akumulátorovou vrtačku.

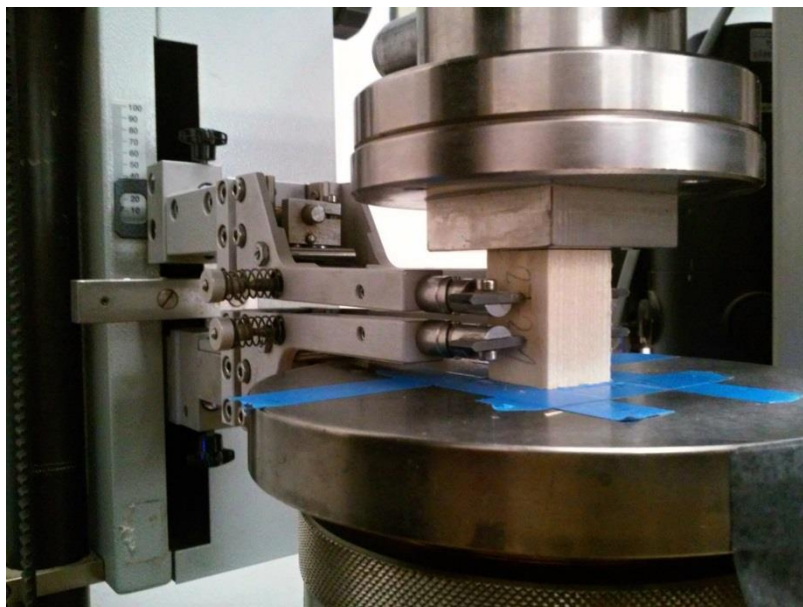


Obr. 17: Nástroj zajišťující kolmost při vrtání kruhového otvoru (vlevo), roztlačovací zařízení čelistmi vložené do otvoru a připravené k měření (vpravo)



## 4.5 Zkouška v tlaku

Postup zkoušky na univerzálním zkušebním stroji probíhal po seřízení tenzometrických snímacích hrotů, tak aby rozdělovali zkušební tělísko přesně na třetiny. Dále byla v programu TestXpert nastavena rychlost posuvu (10 mm/min) a určeny veličiny, které měly být měřeny.



Obr. 18: Měření standardních tělísek ve zkušebním stroji Zwick Z050

Před samotným zatěžováním tělísek byla tato tělíska zvážena a změřena digitálním posuvným měřítkem. Naměřené hodnoty byly vloženy do programu, který pomocí změřených veličin spočítá hustotu. Tělesa byla vložena mezi čelisti, a vahou 5 kg zatížena, tak aby nedošlo k jejich posuvu při přimknutí tenzometrických hrotů. Následně byla spuštěna zkouška, která trvala cca 60 sekund, při které došlo k rovnoměrnému zatěžování zkušebního tělesa až do chvíle jeho porušení – usmýknutí jednotlivých vrstev. Ze záznamu zkoušky byl z lineární části zatěžování stanoven modul pružnosti pomocí tangenty ke křivce diagramu napětí – deformace.

## 4.6 Statistické vyhodnocení

Abychom ověřili funkci nového zařízení, musíme jím naměřené výsledky statisticky vyhodnotit a porovnat s měřením referenčních vzorků standardními laboratorními metodami, viz výše. Pro samotné statistické vyhodnocení využíváme parametrické testy.

Základní otázkou, kterou bychom si měli při parametrickém testování experimentálních dat položit, je otázka, zdali se dva výběry shodují ve svých středních hodnotách, nebo zdali sledovaný výběr má určitou konkrétní hodnotu průměru (tj. zda pochází ze souboru s touto konkrétní střední hodnotou. Další otázkou kladenou při parametrickém testování mohou být hypotézy týkající se rozdílu rozptylů mezi dvěma soubory při hodnocení vlivu pokusných měření na variabilitu sledované veličiny.

Pro použití parametrických testů je nutno splnit předpoklad normality dat sledovaných veličin. Mezi parametrické testy se řadí především Studentův t-test pro testování rozdílu dvou středních hodnot a F-test pro testování rozdílu dvou rozptylů.

#### **4.6.1 Studentův t-test**

Studentův t-test je nejčastěji používaným parametrickým testem - používá se pro testování rozdílu 2 středních hodnot. Podle statistické významnosti testovaného rozdílu středních hodnot usuzujeme na účinnost aplikovaného pokusného měření ve sledovaném experimentu.

Dvoj výběrový *t*-test (porovnání dvou výběrových souborů) používá se pro hodnocení experimentů, kde neznáme střední hodnotu základního souboru, a porovnáváme pouze 2 soubory výběrových dat. Tato data mohou být představována buď dvěma měřeními provedenými opakovaně u jedné skupiny vzorků, nebo dvěma nezávislými skupinami měření („nepárový pokus“ neboli „nezávislé výběry“) z výsledku předpokládané nulové hypotézy vyhodnotíme t-testem ( $TK > KH$ ;  $p < 0,05$  nulová hypotéza zamítnuta – shodnost rozptylů obou souborů není shodný).

#### **4.6.2 F- test (test rozdílu dvou rozptylů)**

Testem rozhodujeme, zda pokusný zásah má vliv na proměnlivost (rozptyl) zkoumané náhodné veličiny v souboru. Je důležitý i pro porovnání přesnosti dvou metod měření (např. srovnání přesnosti 2 přístrojů).

Výpočet F-testu vychází z dat dvou výběrových souborů, které jsou předmětem srovnávání - obvykle pokusný a kontrolní soubor. O každém z těchto souborů předpokládáme, že pochází ze souboru s normálním rozdělením. Dle výsledku F-testu zvolíme typ t-testu (párový, se stejnými rozptyly, s různými rozptyly). Pokud  $TK > KH$ , zamítáme nulovou hypotézu - rozdíl rozptylů není stejný.

### **4.7 Korelační analýzy**

Korelační analýza se zabývá mírou závislosti náhodných dat. Standardním výstupem korelační analýzy je koeficient popisující těsnost vztahu mezi studovanými veličinami.



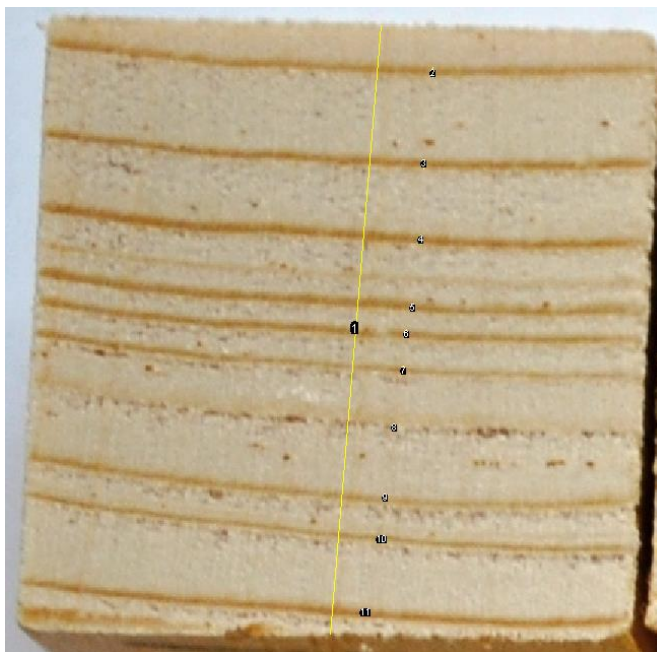
#### 4.8 Analýza rozptylu (Anova)

Anova je statistický test, který testuje nulovou hypotézu o shodě středních hodnot pro více než dva výběry. Jako příklad použití můžeme uvést vliv různých stupňů vlhkosti na pevnost dřeva, nebo odběr vzorků dřeva z určité dřeviny, kdy je třeba zjistit, zdali se fyzikálně mechanické vlastnosti liší v závislosti na umístění části, z které byly odebrány. Tyto uvedené příklady spojuje vliv jednotlivých úrovní určitého faktoru na danou měřenou veličinu.

ANOVA s opakovanými měřeními se používá pro uspořádání takových dat, kdy do zkoumání určitého vlivu faktoru (faktorů) reprezentovaného několika úrovněmi vstupuje do tohoto faktoru ještě zkoumání vlivu např. časového, tedy kdy jednotlivé pokusné jednotky (vzorky, pokusná zvířata, lidé, stromy,...) jsou měřeny opakovaně, tj. pro každou úroveň uvažovaného faktoru a pro každého měřeného jedince máme k dispozici krátkou časovou řadu měření.

#### 4.9 Stanovení podílu letního dřeva obrazovou analýzou

V našem případě jsme nejprve nafotili příčné řezy referenčních vzorků digitálním fotoaparátem a za využití softwaru ImageJ a přídatných modulů byl následně určen podíl letního dřeva. Určení podílu letního dřeva bylo postaveno na měření radiálního přírůstu letokruhů, tedy na přímce kolmo protínající letokruhy daného vzorku, která byla dále dána do poměru s celkovou šířkou letního dřeva na daném vzorku, viz Obr. 19.

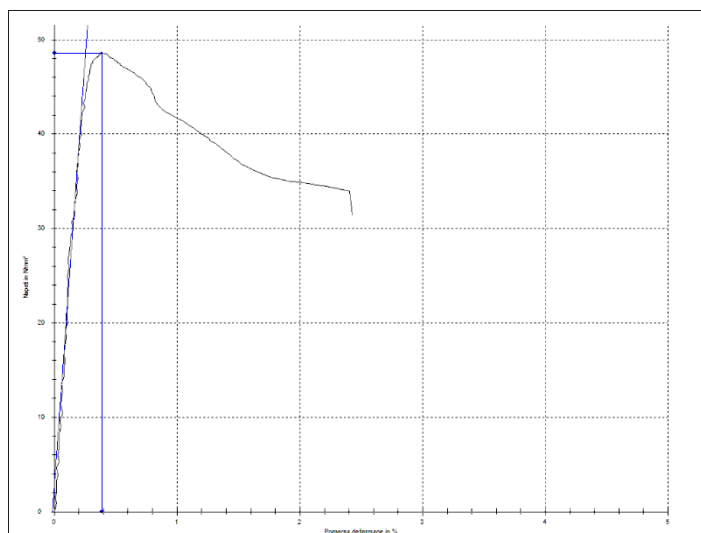


Obr. 19: Princip měření letního dřeva na zkušebních vzorcích

## 5 Výsledky měření

Průběh zkoušek je znázorněn v pracovních diagramech – závislost napětí na poměrné deformaci. Průběh deformace, jak je patrné z grafu pro jedno konkrétní měření (Graf 1), je u všech těles v prvotní fázi téměř lineární. Z této lineární oblasti pružné deformace (cca 24 %) je vypočítána hodnota normálového napětí dle vztahu:

$$\sigma = \frac{F}{S} [MPa].$$



Graf 1: Napěťovo-deformační průběh zkoušky jednoho z referenčních vzorků.

Popisná statistika pro podíl letního dřeva, mez pevnosti a hustotu je pro všechny referenční vzorky uvedeno v Tabulka 1.

Tabulka 1: Popisná statistika - Přehled vybraných veličin referenčních vzorků

Podíl letního dřeva		Mez pevnosti		Hustota	
Stř. hodnota	20.13	Stř. hodnota	44.10	Stř. hodnota	450.13
Chyba stř. hodnoty	0.94	Chyba stř. hodnoty	0.59	Chyba stř. hodnoty	5.04
Medián	18.63	Medián	43.21	Medián	445.75
Modus	21.25	Modus	---	Modus	432.00
Směr. odchylka	10.25	Směr. odchylka	6.49	Směr. odchylka	55.22
Rozptyl výběru	105.05	Rozptyl výběru	42.10	Rozptyl výběru	3049.63
Špičatost	30.79	Špičatost	-0.49	Špičatost	-0.76
Šikmost	4.35	Šikmost	0.45	Šikmost	0.20
Max-Min	94.77	Max-Min	29.66	Max-Min	245.50
Minimum	5.23	Minimum	30.83	Minimum	330.50
Maximum	100.00	Maximum	60.49	Maximum	576.00
Součet	2415.59	Součet	5291.48	Součet	54016.05
Počet	120.00	Počet	120.00	Počet	120.00

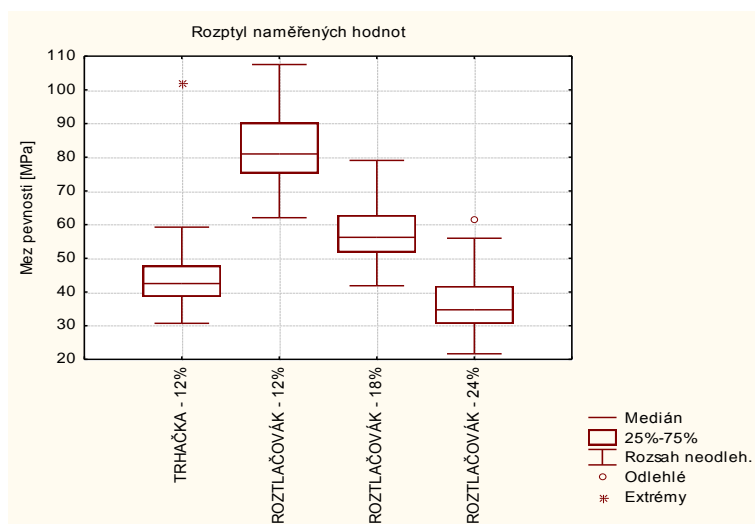
Jak bylo výše zmíněno, bylo provedeno celkem 384 měření pomocí roztlačovacího zařízení (32 vývrtů ve čtyřech úrovních a třech vlhkostech). Pomocí konvenční tlakové zkoušky bylo změřeno 258 vzorků. Vzhledem ke dvěma nevydařeným pokusům jsme nakonec započítali pouze 360 jednotlivých měření na roztlačovacím zařízení. Pro každou vrstvy byly měřeny dva vzorky, které byly zprůměrovány. To znamená, že v závěru bylo započítáno 3 x 120 hodnot pro jednotlivé veličiny.

Naměřené hodnoty pomocí roztlačovacího zařízení pro jednotlivé vlhkosti jsou prezentovány níže pomocí popisné statistiky a krabicových grafů.

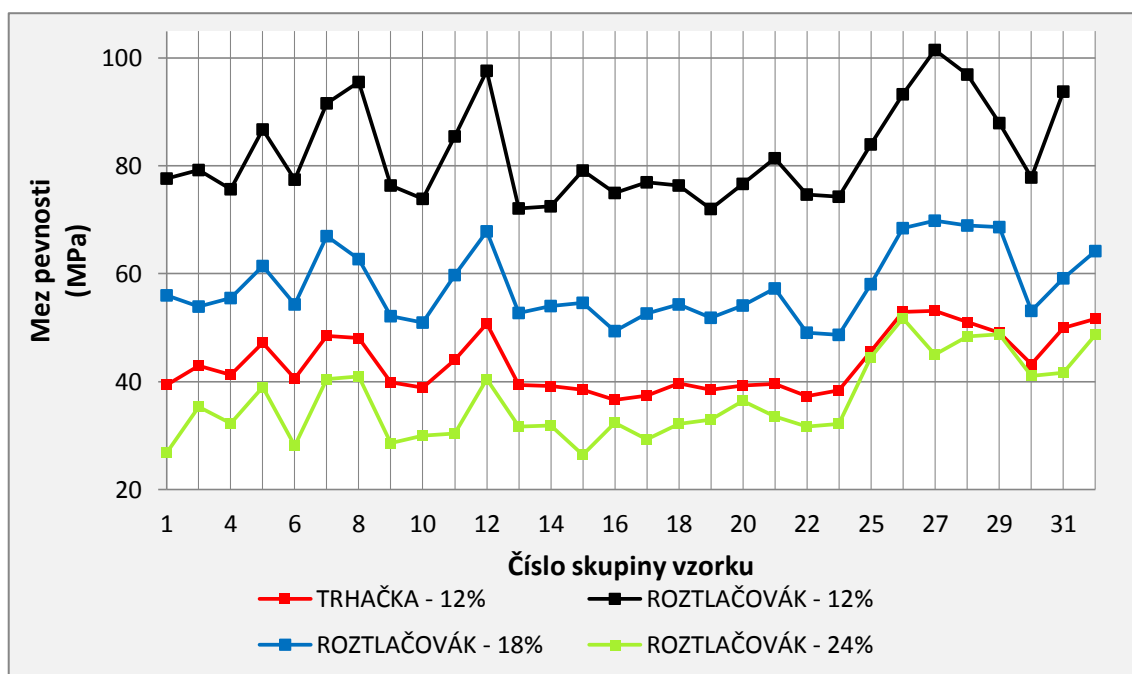
Tabulka 2: Popisná statistika hodnot Meze pevnosti

	TRHAČKA - 12%	ROZTLAČOVÁK - 12%	ROZTLAČOVÁK - 18%	ROZTLAČOVÁK - 24%
Stř. hodnota	43.387	82.570	57.676	36.407
Chyba stř. hodnoty	0.560	0.942	0.731	0.711
Medián	42.455	80.972	56.231	34.733
Modus	47.225	---	---	43.070
Směr. odchylka	6.130	10.322	8.008	7.788
Rozptyl výběru	37.582	106.542	64.135	60.650
Špičatost	-0.548	-0.565	-0.163	0.047
Šikmost	0.385	0.382	0.496	0.606
Max - Min	28.540	45.471	37.179	40.018
Minimum	30.710	62.051	41.880	21.674
Maximum	59.250	107.522	79.059	61.692
Součet	5206.380	9908.370	6921.165	4368.893
Počet	120.000	120.000	120.000	120.000
Hladina spolehlivosti (95.0%)	1.108	1.866	1.448	1.408

Grafická prezentace naměřených hodnot meze pevnosti pro všechny tři vlhkostní stupně ve formě krabicových grafů, je uvedeno na Graf 2.



Graf 2: Krabicový graf rozptylů hodnot měřených při různých vlhkostech v porovnání s trhačkou při 12 % vlhkosti

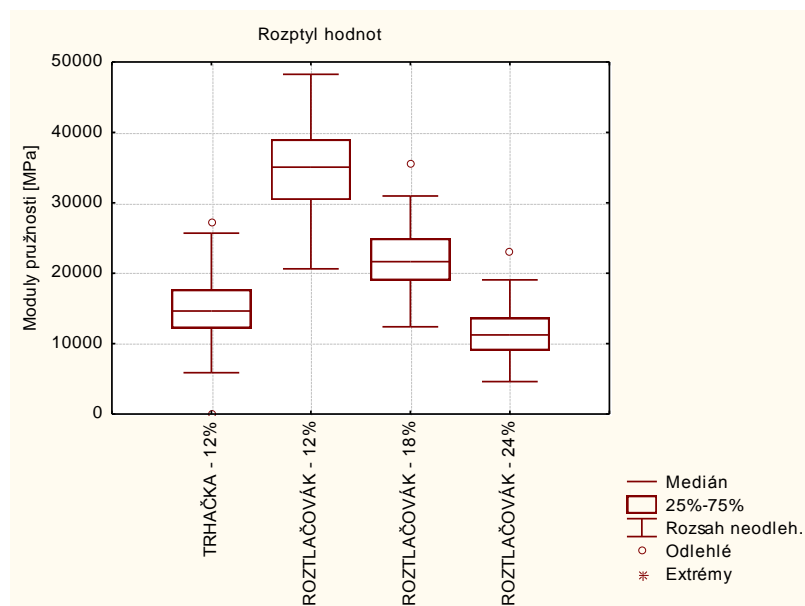


Graf 3: Graf vizuálního porovnání hodnot meze pevnosti pro všechny tři vlhkostní stavy

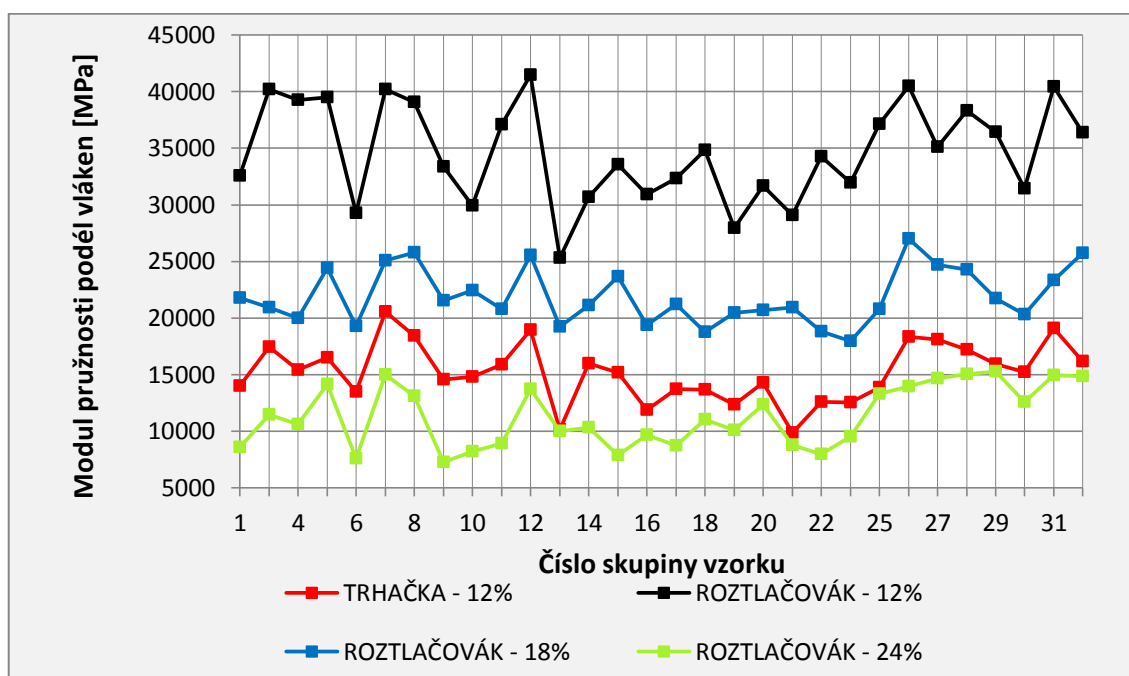
Graf 3. (Průměrné hodnoty mezi pevnosti jednotlivých skupin prvků) hovoří o několika skutečnostech. Například z grafů vyplývá, že rozsahy hodnot změřených pro jednotlivé vzorky se liší. Dále můžeme říci, že průběhy jednotlivých spojnic jsou si podobné, z čehož vyplývá, že se zde dá očekávat celkem silná souvztažnost-korelace. To dokazuje i korelační Tabulka 4, viz dále.

Tabulka 3: Popisná statistika hodnot modulu pružnosti a modulu deformability

	TRHAČKA - 12%	ROZTLAČOVÁK - 12%	ROZTLAČOVÁK - 18%	ROZTLAČOVÁK - 24%
<b>Stř. hodnota</b>	15204.77	34670.45	21921.14	11325.81
<b>Chyba stř. hodnoty</b>	403.00	532.96	385.04	323.43
<b>Medián</b>	14670.34	35061.33	21650.31	11239.64
<b>Modus</b>	---	---	---	---
<b>Směr. odchylka</b>	4414.69	5838.33	4217.92	3543.04
<b>Rozptyl výběru</b>	19489461.13	34086069.06	17790865.63	12553139.86
<b>Špičatost</b>	0.06	-0.43	-0.28	-0.02
<b>Šikmost</b>	0.55	-0.03	0.22	0.28
<b>Max - Min</b>	21321.98	27616.03	23034.34	18486.03
<b>Minimum</b>	5871.18	20631.88	12401.07	4617.60
<b>Maximum</b>	27193.16	48247.91	35435.41	23103.63
<b>Součet</b>	1824572.77	4160453.46	2630536.26	1359096.87
<b>Počet</b>	120.00	120.00	120.00	120.00
<b>Hladina spolehlivosti (95.0%)</b>	797.99	1055.32	762.42	640.43



Graf 4: Krabicový graf rozptylů hodnot modulů deformability měřených při různých vlhkostech v porovnání s trhačkou při 12 % vlhkosti



Graf 5: Graf vizuálního porovnání hodnot meze pevnosti pro všechny tři vlhkostní stavy

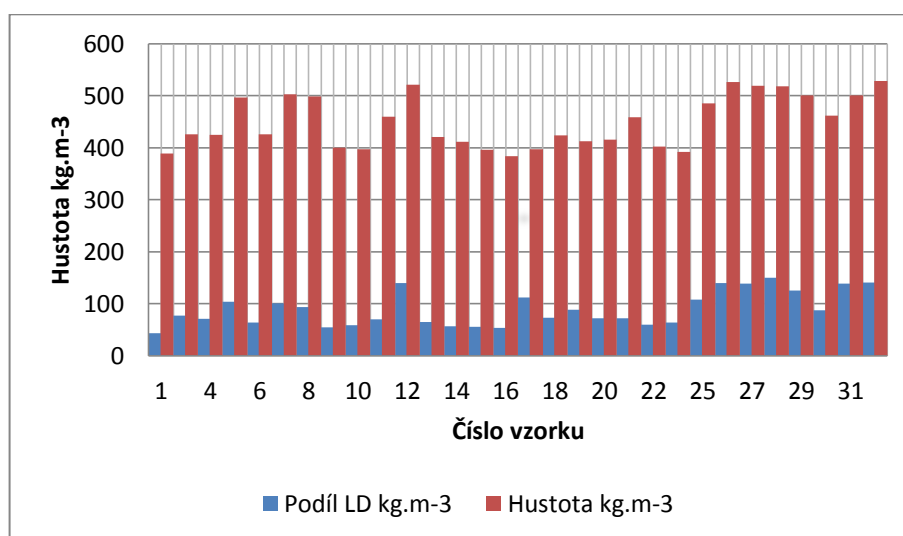
Dle výsledků statistického porovnání testem ANOVA pro jednotlivé veličiny (mez pevnosti, modul pružnosti a modulů deformability) vyplývá, že rozptyl naměřených hodnot se liší statisticky významně ( $F \gg F_{krit}$ ;  $742,2 \gg 2,62$ ). To je patrné jak z krabicových grafů, tak i z Graf 5 výše. Spojnice bodů naměřených hodnot (modulů pružnosti a meze pevnosti) má obdobný průběh jak pro konvenční zkušební stroj „trhačku“ tak pro nově vyvinuté zařízení „roztlačovák“. Naměřené hodnoty z obou zaříze-

ní byly vzájemně porovnávány, aby se zjistila jejich vzájemná závislost. Jak je patrné z Tabulka 4 níže, hodnoty mají vysokou závislost nejen v porovnání k referenčním vzorkům z „trhačky“ tak i mezi sebou při různých vlhkostech a k podílu letního dřeva.

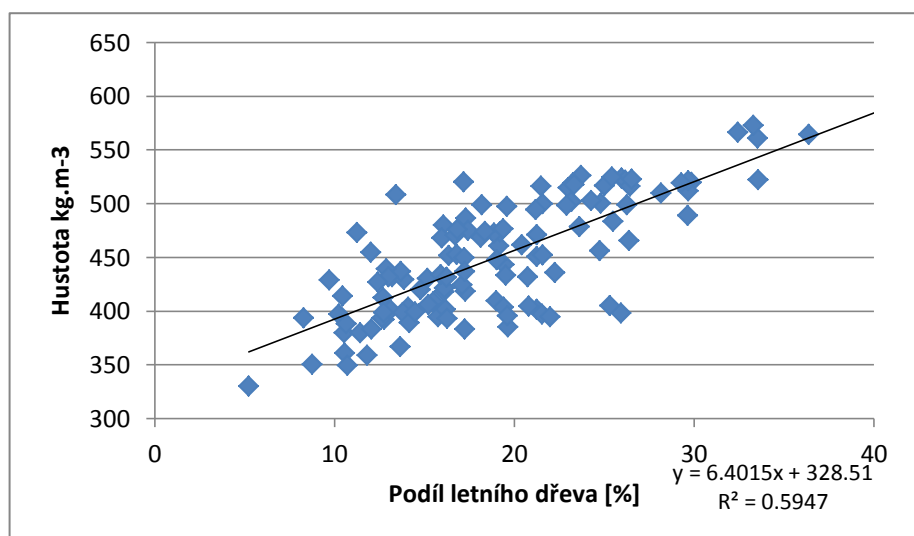
Tabulka 4: Korelační tabulka mezi modulem pružnosti měřeného pomocí Zwick Z050 a modulem deformability obdržným z roztlačovacího zařízení

	Podíl LD - %	Trhačka - 12%	Roztlačovák - 12%	Roztlačovák - 18%	Roztlačovák - 24%
Podíl LD - %	1	0.5212	0.5142	0.5809	0.7565
Trhačka - 12%	0.5212	1	0.8242	0.7680	0.6767
Roztlačovák - 12%	0.5142	0.8242	1	0.6141	0.6398
Roztlačovák - 18%	0.5809	0.7680	0.6141	1	0.6213
Roztlačovák - 24%	0.7565	0.6767	0.6398	0.6213	1

Tím se dostáváme k dalšímu faktoru a tím je vliv podílu letního dřeva na měřených veličinách. Obecně lze říci, že se zvyšujícím se obsahem letního dřeva stoupá pevnost dřeva, v našem případě mez pevnosti i modul pružnosti. To nám potvrzuje i graf 8 a 9. Odchytky hodnot projevující se jako špičky v grafu lze odůvodnit právě změnou podílu letního dřeva. Pro lepší názornost byl sestrojen Graf 6, z kterého jsou patrné vzorky s vyšším podílem letního dřeva respektive vzorky s vyšší hustotou. Jmenovitě to jsou vzorky číslo 5,7,8, 12, 25 – 29, 31 a 32; s hustotou blížíící se, nebo převyšující  $500 \text{ kg/m}^3$ . Pro potvrzení byl sestrojen ještě Graf 8, kde je jasně patrné, že se zvyšujícím podílem letního dřeva zvyšuje pevnost dřeva u všech námi měřených pokusů.

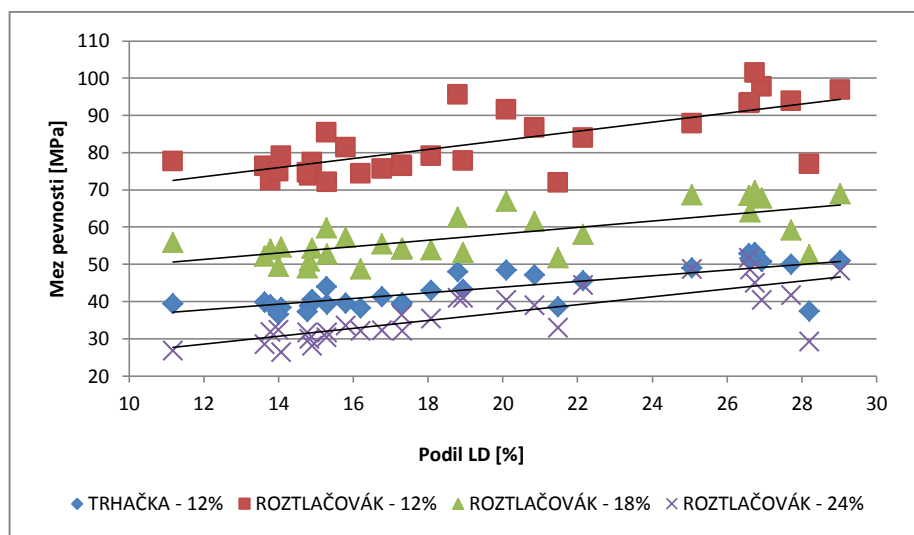


Graf 6: Hustota dřeva vzorků, s podílem letního dřeva, které bylo nutné pro tento graf přepočíst na objemovou hmotnost



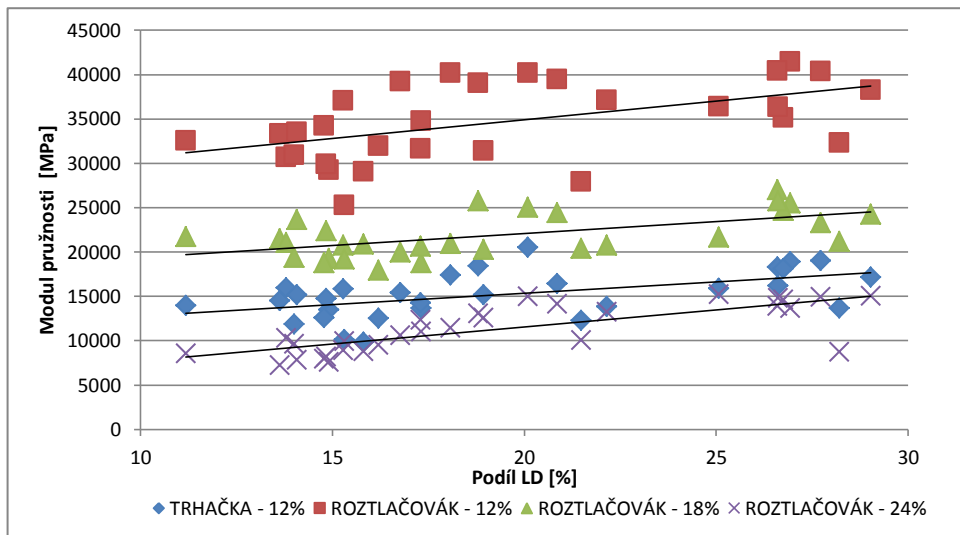
Graf 7: Vliv podílu letního dřeva na hustotu

Z Graf 7 vyplývá, že se zvyšujícím podílem letního dřeva, stoupá i hustota dřeva, což dokazuje i korelační koeficient, který nabývá hodnoty 0,751 což lze klasifikovat jako vysokou závislost.

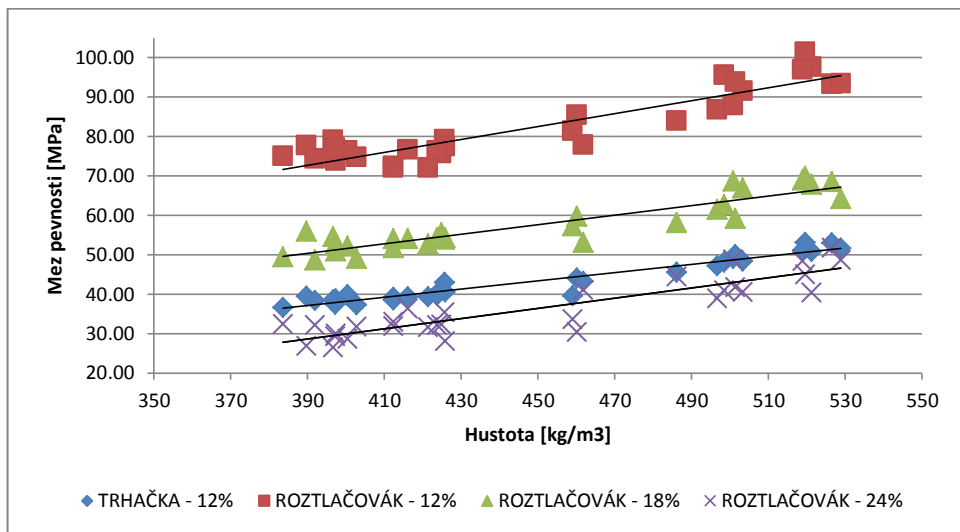


Graf 8: Vliv podílu letního dřeva na mez pevnosti

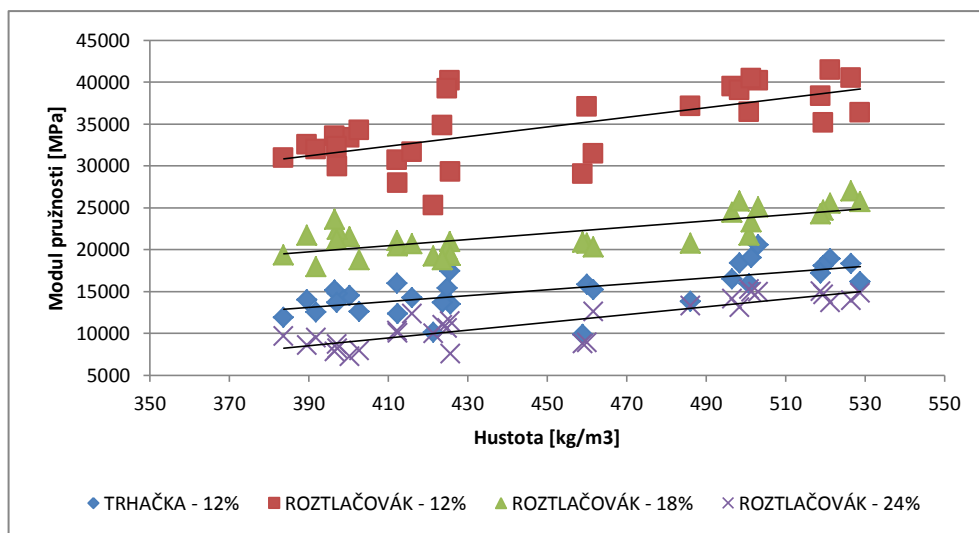
Dále byly sestrojeny grafy, které znázorňují vztah zvyšujícího se podílu letního dřeva a meze pevnosti respektive modulu pružnosti a modulu deformability. Jak je patrné v Graf 8, spojnice trendu znázorňuje zvyšující se mez pevnosti při zvyšujícím se podílu letního dřeva u všech měřených pokusů. Stejně tomu je i v případě Graf 9, kde se modul pružnosti i moduly deformability zvyšují s rostoucím podílem letního dřeva.



Graf 9: Vliv podílu dřeva na modul pružnosti



Graf 10: Vliv hustoty dřeva na mez pevnosti



Graf 11: Vliv hustoty dřeva na modul pružnosti a modul doformability



Jak je výše popsáno, že se zvyšujícím se podílem letního dřeva roste i hustota dřeva. Graf 10 a Graf 11 tuto závislost jasně znázorňují. Tato skutečnost odráží citlivost nově vyvinutého zařízení, jelikož univerzální zkušební stroj Zwick Z050 reaguje na změny hustoty obdobně.

## 6 Diskuze

Hodnoty získané z univerzálního zkušebního stroje Zwick Z050 odpovídají dle statistického vyhodnocení normálnímu rozdělení. Průměrná hustota námi měřených tělísek ze smrkového dřeva je kolem  $450 \text{ Kg/m}^3$ . Horáček (2009) uvádí hustotu pro smrkové dřevo při 12 % vlhkosti také  $450 \text{ Kg/m}^3$ , Požgaj (1997), uvádí v rozsahu  $350\text{--}400 \text{ Kg/m}^3$ .

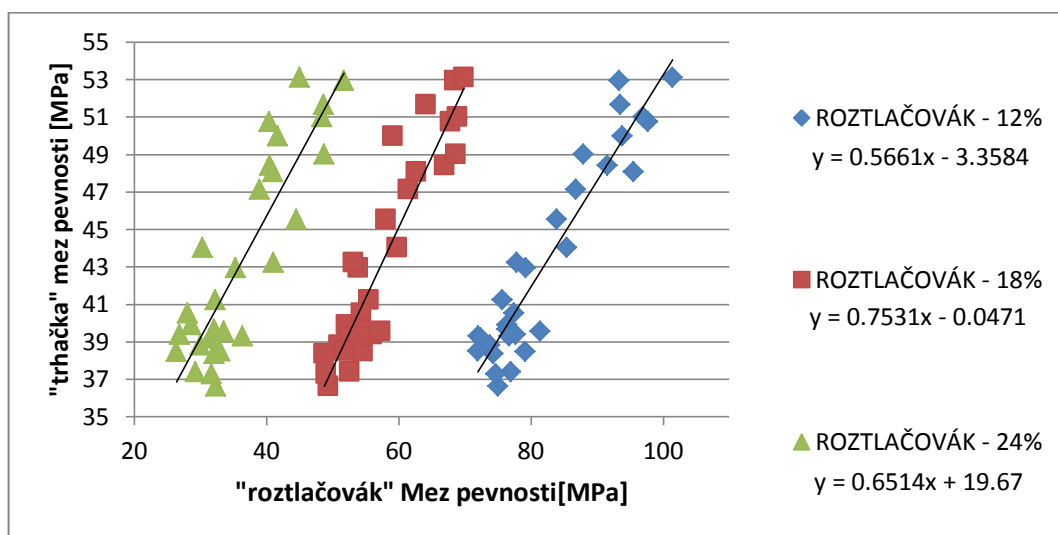
Jelikož v našem případě pracujeme se dřevem jako konstrukčním materiálem, je pro nás velice rozhodujícím činitelem pro posouzení kvality daných dřevěných prvků pevnost a moduly pružnosti dřeva. Námi naměřené hodnoty konvenční meze pevnosti na trhače jsou  $43,4 \text{ MPa}$  pro mez pevnosti a  $15204,8 \text{ MPa}$  pro modul pružnosti.

Dle Horáčka (2009) a Matoviče (1993), je průměrná pevnost při 12% vlhkosti stanovena na  $44,4 \text{ MPa}$ , Požgaj (1997) uvádí  $31,1 \text{ MPa}$ . Hodnoty modulů pružnosti v tlaku ve směru vláken se dle literatury pohybují od  $11\,000 \text{ MPa}$  do  $15\,000 \text{ MPa}$  (Požgaj, 1997; Matovič, 1993; Horáček, 2009). Podíl letního dřeva, který jsme zjistili pomocí optické metody, má vliv nejen na hustotu dřeva, tak i na jeho pevnost. Průměrný obsah letního dřeva u vzorků je 20,13 %. Požgaj (1997) uvádí průměrnou hodnotu 17,8 %, tj. výčet naměřených dat pro referenční vzorky ze Zwicku Z050.

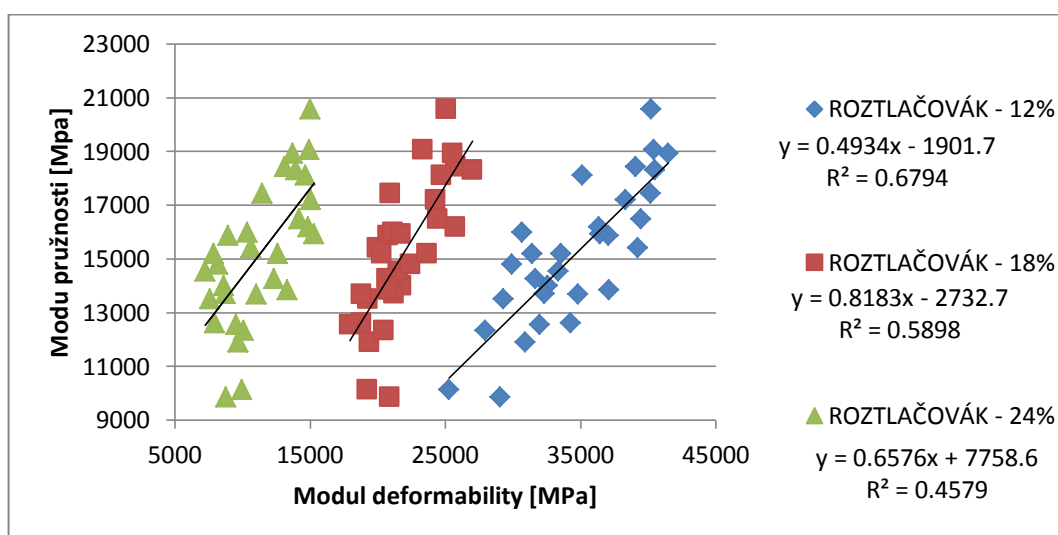
Naměřená data pro „roztlačovák“ byly podrobeny statistickému vyhodnocení – data odpovídají normálnímu rozdělení, nicméně rozptyl naměřených dat byl vyšší. Průměrné hodnoty mezí pevnosti jsou  $82,6 \text{ MPa}$  pro 12 %,  $57,7 \text{ MPa}$  pro 18 % a  $36,4 \text{ MPa}$  pro 24 %. Dle statistických testů jsou rozptyly těchto hodnot významně odlišné a jsou významně ovlivňovány vlhkostí. Pro určení vztahu měření pomocí roztlačováku byla sestavena korelační Tabulka 4, která naznačuje, v jaké závislosti jsou data měřená při různých vlhkostech vůči trhače. Hodnoty v rozmezí 0,87 – 0,94 hovoří o velmi vysoké závislosti.

Při měření roztlačovacím zařízením nemůžeme hovořit o modulu pružnosti, ale o tzv. „modulu deformability“, který byl definován autory zařízení z ÚTAM AVČR v Telči. Je nutné hovořit o modulu deformability z toho důvodu, že měření ve vývrtu neodpovídá standardním zkouškám, které vyžadují měření pravoúhlých tělísek přesně daných rozměrů v jednoosém namáhání. Jelikož tlačné plochy umístěné na čelistích jsou zaoblené, dochází ke složitějšímu stavu napjatosti, u kterého by stanovení modulu pružnosti bylo velmi náročné. Proto hovoříme o modulu deformability. Průměrné hodnoty zjištěné při vlhkostech 12 %, 18 % a 24 % jsou  $34670,4 \text{ MPa}$ ,  $21921,1 \text{ MPa}$  a  $11325,8 \text{ MPa}$ . Rozptyly hodnot spadají do normálního rozdělení, opět s vyšším rozptylem. Při zkoumání vztahu hodnot modulu pružnosti univerzálního zkušebního stroje a

„roztlačováku“, zjišťujeme opět celkem vysokou těsnost, která se pohybuje v intervalu od 0,67 do 0,82; viz Tabulka 4. Pokud bychom tedy chtěli získat rámcovou představu o naměřených hodnotách z tohoto zařízení, lze tyto hodnoty dosadit do rovnic sestavených z rovnice trendu, viz Graf 12 pro mez pevnosti ze Zwick Z050 a roztlačováku a Graf 13 pro moduly pružnosti a modul deformability. Po dosazení do daných rovnic dostaneme s určitou přesností hodnoty odpovídající normativním hodnotám.



Graf 12: závislost naměřených hodnot mezi pevnosti roztlačováku a trhačky



Graf 13: závislost naměřených hodnot modulu pružnosti a modulu deformability

## 7 Závěr

Roztlačovací zařízení je navrženo k měření mechanických vlastností dřeva užívající nedestruktivní metodu měření postavené na aplikaci malých zatěžovacích čelistí v předvrtaném kruhovém otvoru. Zařízení může být použito jak v laboratoři, tak i v terénu určující stav a kvalitu dřevěných prvků. Zařízení poskytuje modifikovaný pracovní diagram, tj. závislost napětí na deformaci, jež je vyvolána symetricky od sebe roztlačovanými čelistmi v předvrtaném otvoru o průměru 12 mm.

Výhodou tohoto zařízení je možnost měření v různé hloubce odpovídající požadovaným rozměrům na běžně měřených konstrukcích. Vezmeme-li v úvahu, že zařízení umožňuje měřit v hloubce až 115 mm, respektive při dodržení radiálního směru vrtání, můžeme daný dřevěný prvek provrtat celý a získat hodnoty z průřezu až 230 mm. Tak získáme konkrétní představu o mechanickém stavu daného prvku, tedy pokud nám to prostorové možnosti pro manipulaci se zařízením dovolí.

Nespornou výhodou je pohon přes akumulátor, při jehož vybití je možná okamžitá výměna. Nemusí se tedy složitě zajišťovat externí zdroj napájení, který by např. v případě měření v krovech překážel z důvodu často velkého množství jak vertikálních tak i vodorovných prvků. Obdobně je to i s přenosem dat, který je zajišťován pomocí bezdrátové technologie Bluetooth, tudíž nás při práci neomezuje žádná kabeláž, ať už se jedná o zdroj energie, nebo přenos dat.

Předmětem pokusu bylo zjistit vliv vlhkosti na konvenční pevnost v tlaku podél vláken na nově vyvinutém roztlačovacím zařízení. Provedené zkoušky při různých vlhkostech potvrdili, že se změnou vlhkosti dochází ke změně pevnosti dřeva s celkem vysokou závislostí. Dále jsme zjistili, že zařízení se se zvyšujícím obsahem podílu letního dřeva vhodně adaptuje a poskytuje odpovídající hodnoty mechanických vlastností. Jinak řečeno, se zvyšujícím se obsahem letního dřeva dochází ke zvyšování pevnosti dřeva.

Byla zjištěna silná korelační závislost naměřených mezí pevnosti konvenčního zkušebního stroje „trhačky“ a nově vyvinutým zařízením „roztlačováku“. Silná závislost byla rovněž u modulů pružnosti a modulu deformability.

Lze namítat, že při vyvrtání 12 mm otvoru jde již o poměrně značný zásah do konstrukce. Obzvláště jedná-li se o historicky cenné dřevěné prvky. V současné době bohužel ale neexistuje metoda, která by nám poskytla přesné údaje o mechanických vlastnostech zabudovaných prvků ve formě pevnosti v tlaku podél vláken, která, jak dobře víme, velmi koreluje s ohybovou tuhostí dřevěných prvků. Vezmeme-li v úvahu velikost zá-

sahu do konstrukce s hodnotou dat, kterou se nám pomocí této metody podaří získat, je toto zařízení nedocenitelné, zvláště v těch případech, kde je snaha o co největší zachování kvalitního a historicky cenného dřeva, např. v historických konstrukcích, které se v našich podmínkách mohou datovat až do doby gotiky.

## Summary

The thesis aim is to determine the mechanical properties of wood with use of prototype device and compare it with a universal testing machine. The results of experiments were statically evaluated and also compared with known values. The experiments are performed according to standards for testing the mechanical properties of raw wood.

The prototype device was tested at three levels of moisture content of wood. We found that the influence of moisture is statistically significant, so the device is capable to capture change of moisture content in measurement. Furthermore, we found a strong correlation between the measured strength at universal testing machine and conventional strength obtained by newly developer device. Strong correlation was also found for the modulus of elasticity and modulus of deformability.

We further found that the device is sensitive enough to capture an increase of the proportion of latewood, so it suitably adapts and provides adequate mechanical properties for measurement *in situ*.

The advantage of this device is that it allows measurement in different depths corresponding to the desired dimensions for structures commonly found in practice. With help of the device we can obtain values of the structural elements up to 230 mm wide, but we have to keep the radial direction.

The indisputable advantage is its power through the battery and wireless data transfer via Bluetooth, which increases efficiency of work in situ.

It may seem that a 12 mm hole is quite significant intervention into the structure, however, currently there is no method that would give us accurate data on the mechanical properties of in-built elements in the form of compressive strength along the fiber, which exhibits highly correlation with bending stiffness of timber.

There are many semi-destructive techniques that can be used in situ, but, nonetheless, none of them provides data of similar values. With respect to it, the intervention may be considered as insignificant change of timber properties in constructions including historical ones that are culturally valuable.

## 8 Přehled literatury

BAIER, Jiří a Zdeněk TÝN. Ochrana dřeva. Vyd. 3., přeprac. a dopl., v Gradě vyd. 1. Praha: Grada, 1996, 92 s. ISBN 80-7169-275-1.

BUCUR, Voichita. Nondestructive characterization and imaging of wood. Berlin: Springer, 2003, x, 354 s. ISBN 3-540-43840-8

DRÁPELA, Karel a Jan ZACH. *Statistické metody I.: pro obory lesního, dřevařského a krajinného inženýrství*. Vyd. 1. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1999, 135, [16] s. ISBN 80-715-7416-3

DRÁPELA, Karel a Jan ZACH. *Statistické metody II: (pro obory lesního, dřevařského a krajinného inženýrství)*. Vyd. 1. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2000, 144, [8] s. ISBN 80-715-7474-0

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]. Dostupné z WWW: <[http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl\\_gtr190.pdf](http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf)>.

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

KOTLÍNOVÁ, Mária. Nondestructive testing of wood. Vyd. 1. Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce, 2008, 39 s. ISBN 978-80-87154-14-4.

POŽGAJ, A.: Štruktúra a vlastnosti dreva. 2 vydanie. Bratislava: Príroda, 1997. 485 s. ISBN 80-07-00960-4.

RÅBERG, U. EDLUND, M. L., TERZIEV, N. LAND, C.J.: Testing and evaluation of natural durability of wood in above ground conditions in Europe – an overview. In. The Japan Wood Research Society 2005. Vol. 51 Článek dostupný na z WWW: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10086-005-0717-8>

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

ROSS, R., PELLERIN, R.: Non-destructive testing for assessing wood members in structures: A Review. Gen. Tech. Rep. FFPL-GTR-70 (rev.). Madison, WI: U.S. Department of agricultur, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1994. Dostupné z WWW: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr70.pdf>>

BODIG, J. -- JAYNE, B A. Mechanics of Wood and Wood Composites. Malabar: Krieger Publish.Comp., 1993. 21 s. ISBN 0-89464-777-6.

SIAU, John F. Wood: Influences of moisture on physical properties. Virginia: Virg.Polytech.Institute&State University, 1995, 7,227 s. ISBN 0-9622181-0-3.

UNGER, A., SCHNIEWIND, A.R., UNGER, W.: Conservation of Wood Artifacts. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2001. Článek dostupný z WWW: [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-06398-9\\_6](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-06398-9_6)

ZABEL, A.R., MORELL J.J.: Wood mikrobiology. Decay and Its Prevention. London, 1992.



## 9 Použité normy

- ČSN EN 326 *Odběr vzorků, nařezávání a kontrola - Část 1: Odběr vzorků, nařezávání zkušebních těles a vyjádření výsledků zkoušky*
- ČSN EN 408 *Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*
- ČSN 49 0110 *Dřevo. Medza pevnosti v tlaku v smere vláken*
- ČSN 49 0112 *Zjišťování fyzikálních a mechanických vlastností přírodního dřeva*

## 10 Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obr. 1: Schéma systému mechanického namáhání (Požgaj, 1997) .....	19
Obr. 2: Působení v tlaku a tahu.....	19
Obr. 3: Ultrazvukový měřicí přístroj se sondami .....	23
Obr. 4: Zařízení k provádění videoscopie.....	25
Obr. 5: Pohled do útrob dřevěného prvku pomocí videoscopického zařízení .....	25
Obr. 6: Pilodyn 6J .....	26
Obr. 7: Odporové mikrovrtání na zabudovaném dřevěném prvku .....	28
Obr. 8: průřez zkoušeným dřevěným prvkem s grafickým výstupem měření.....	29
Obr. 9: Čelisti měřicího zařízení vložené do předvrtaného otvoru.....	30
Obr. 10: Pohled na měřicí zařízení s vysunutými čelistmi. ....	31
Obr. 11: Pracovní diagram zkoušky roztlačovacím zařízením. ....	31
Obr.: 12 Zpracování obrazu pro analýzu LD – fotografie, stupně šedi, binární obraz...	33
Obr. 13: Směry a roviny zkušebních tělísek .....	35
Obr. 14: Schéma odběru vzorků (vlevo) a navrtání pro následné zkoušení roztahujících se čelistí (vpravo).....	35
Obr. 15: Nomogram závislosti rovnovážné vlhkosti dřeva, teploty a relativní vzdušné vlhkosti vzduchu. ....	37
Obr. 16: Roztlačovací zařízení připojeno na akumulátorovou vrtačku. ....	38
Obr. 17: Nástroj zajišťující kolmost při vrtání kruhového otvoru (vlevo), roztlačovací zařízení čelistmi vložené do otvoru a připravené k měření (vpravo).....	38
Obr. 18: Měření standardních tělísek ve zkušebním stroji Zwick Z050.....	39
Obr. 19: Princip měření letního dřeva na zkušebních vzorcích.....	41

### Tabulky

Tabulka 1: Popisná statistika - Přehled vybraných veličin referenčních vzorků .....	42
Tabulka 2: Popisná statistika hodnot Meze pevnosti .....	43
Tabulka 3: Popisná statistika hodnot modulu pružnosti a modulu deformability .....	44
Tabulka 4: Korelační tabulka mezi modulem pružnosti měřeného pomocí Zwick Z050 a modulem deformability obdržným z roztlačovacího zařízení.....	46

### Grafy

Graf 1: Napětovo-deformační průběh zkoušky jednoho z referenčních vzorků. ....	42
--	----

Graf 2: Krabicový graf rozptylů hodnot měřených při různých vlhkostech v porovnání s trhačkou při 12 % vlhkosti.....	43
Graf 3: Graf vizuálního porovnání hodnot meze pevnosti pro všechny tři vlhkostní stavy .....	44
Graf 4: Krabicový graf rozptylů hodnot modulů deformability měřených při různých vlhkostech v porovnání s trhačkou při 12 % vlhkosti.....	45
Graf 5: Graf vizuálního porovnání hodnot meze pevnosti pro všechny tři vlhkostní stavy .....	45
Graf 6: Hustota dřeva vzorků, s podílem letního dřeva, které bylo nutné pro tento graf přepočítat na objemovou hmotnost .....	46
Graf 7: Vliv podílu letního dřeva na hustotu .....	47
Graf 8: Vliv podílu letního dřeva na mez pevnosti.....	47
Graf 9: Vliv podílu dřeva na modul pružnosti .....	48
Graf 10: Vliv hustoty dřeva na mez pevnosti .....	48
Graf 11: Vliv hustoty dřeva na modul pružnosti a modul doformability .....	48
Graf 12: závislost naměřených hodnot mezí pevnosti roztlačováku a trhačky.....	51
Graf 13: závislost naměřených hodnot modulu pružnosti a modulu deformability .....	51

# 11 Příloha

Výčet průměrných naměřených hodnot z jednotlivých skupin vzorků

Číslo skupiny vzorků	Podíl LD	Hustota	TRHAČKA - 12%		ROZTLAČOVÁK - 12%		ROZTLAČOVÁK - 18%		ROZTLAČOVÁK - 24%	
			$S_{C(L)}$	$MOE_{C(L)}$	Conventional Strength - $CS_{C(L)}$	Modulus of Deformity - $MOD_{C(L)}$	Conventional Strength - $CS_{C(L)}$	Modulus of Deformity - $MOD_{C(L)}$	Conventional Strength - $CS_{C(L)}$	Modulus of Deformity - $MOD_{C(L)}$
	%	$kg.m^{-3}$	MPa	MPa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
1	11.17	389.63	39.40	14002.64	77.67	32553.33	55.96	21755.21	26.82	8607.35
3	18.08	425.63	42.96	17444.52	79.19	40202.08	53.86	20948.90	35.35	11460.00
4	16.77	424.88	41.24	15410.35	75.68	39241.35	55.49	19994.57	32.25	10619.05
5	20.85	496.63	47.15	16480.70	86.77	39490.50	61.45	24433.85	38.96	14167.03
6	14.90	425.76	40.53	13508.21	77.43	29277.62	54.35	19291.62	28.05	7617.36
7	20.09	503.25	48.42	20573.11	91.57	40214.65	66.93	25071.89	40.49	14998.43
8	18.80	498.50	48.09	18429.28	95.56	39060.18	62.72	25779.80	40.98	13104.41
9	13.62	400.38	39.89	14552.12	76.38	33349.15	52.14	21520.76	28.61	7259.40
10	14.83	397.25	38.82	14794.24	73.85	29927.15	50.95	22419.55	29.96	8204.71
11	15.28	460.13	44.03	15865.22	85.44	37077.46	59.75	20789.60	30.34	8922.93
12	26.92	521.25	50.75	18937.78	97.68	41479.01	67.85	25528.43	40.41	13698.21
13	15.30	421.38	39.32	10135.96	72.06	25289.40	52.71	19228.51	31.65	9980.48
14	13.79	412.25	39.19	15987.85	72.47	30693.80	54.03	21112.31	31.86	10341.30
15	14.08	396.63	38.49	15190.81	79.14	33542.00	54.59	23652.33	26.39	7857.09
16	14.00	383.63	36.63	11900.75	75.02	30926.54	49.39	19398.45	32.37	9691.69
17	28.20	397.13	37.41	13707.83	76.99	32316.45	52.58	21211.57	29.30	8743.57
18	17.31	423.75	39.68	13686.96	76.36	34827.61	54.30	18784.40	32.13	11047.20
19	21.48	412.38	38.52	12335.87	71.98	27951.44	51.80	20444.09	32.96	10084.31
20	17.30	416.00	39.29	14271.63	76.69	31671.82	54.09	20681.37	36.36	12350.19
21	15.80	459.00	39.57	9861.43	81.42	29076.05	57.25	20911.76	33.57	8794.27
22	14.78	402.75	37.29	12611.89	74.71	34271.59	49.02	18817.29	31.66	7955.37
24	16.19	391.88	38.35	12548.87	74.32	31964.03	48.70	17952.61	32.11	9523.16
25	22.15	486.13	45.55	13855.47	83.94	37125.23	58.08	20773.30	44.51	13299.00
26	26.59	526.50	52.95	18321.69	93.33	40484.39	68.49	27021.78	51.69	13936.46
27	26.75	519.63	53.12	18115.59	101.44	35136.10	69.85	24717.94	45.03	14671.83
28	29.02	518.88	51.01	17209.34	96.95	38314.00	68.90	24280.16	48.36	15058.10
29	25.06	500.88	49.03	15926.14	87.90	36421.90	68.65	21717.72	48.75	15284.67
30	18.94	461.75	43.25	15208.14	77.85	31440.46	53.14	20305.46	41.03	12595.38
31	27.72	501.38	49.99	19076.15	93.81	40421.39	59.15	23335.57	41.67	14946.49
32	26.62	528.88	51.67	16192.68	93.47	36366.66	64.14	25753.27	48.62	14858.42
Průměr	19.41	450.13	43.39	15204.77	82.57	34670.45	57.68	21921.14	36.41	11322.60
max	29.02	528.88	53.12	20573.11	101.44	41479.01	69.85	27021.78	51.69	15284.67
min	11.17	383.63	36.63	9861.43	71.98	25289.40	48.70	17952.61	26.39	7259.40
Var. Rozp	27.5927	2427.56	28.0777	6630016	77.760998	18501849.4	42.5044769	5840603.33	51.2093975	7020227.27
sm. Odch	5.25288	49.2702	5.29884	2574.88	8.8182197	4301.37762	6.51954576	2416.73402	7.15607417	2649.57115
Míra spolehlivosti	1.87968	17.6308	0.06066	921.393	3.2927773	1539.19993	2.33294662	864.801272	2.5607212	948.119437

Korelační tabulka mezi pevností z univerzálního zkušebního stroje Zwick Z050 a roztláčovacího zařízení.

	Podíl LD - %	Trhačka - 12%	Roztláčovák - 12%	Roztláčovák - 18%	Roztláčovák - 24%
Podíl LD - %	1	0.7576	0.7273	0.6900	0.7785
Trhačka - 12%	0.7576	1	0.9421	0.9265	0.8797
Roztláčovák - 12%	0.7273	0.9421	1	0.9179	0.7727
Roztláčovák - 18%	0.6900	0.9265	0.9179	1	0.7916
Roztláčovák - 24%	0.7785	0.8797	0.7727	0.7916	1

Statistické vyhodnocení jedno faktorovou Anovou pro mez pevnosti a modul pružnosti a deformability.

Jednofaktorová anova pro mez pevnosti						
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>		
TRHAČKA - 12%	120	5206.38	43.3865	37.58167		
ROZTLAČOVÁK - 12%	120	9908.37	82.56975	106.542		
ROZTLAČOVÁK - 18%	120	6921.165	57.67638	64.13451		
ROZTLAČOVÁK - 24%	120	4368.893	36.40744	60.65039		
ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	149737.2	3	49912.41	742.4444	4.76E-179	2.623637
Všechny výběry	32000.12	476	67.22713			
Celkem	181737.4	479				
Jednofaktorová anova modul pružnosti/deformability						
<i>Výběr</i>	<i>Počet</i>	<i>Součet</i>	<i>Průměr</i>	<i>Rozptyl</i>		
TRHAČKA - 12%	30	456143.193	15204.77	6858637		
ROZTLAČOVÁK - 12%	30	1040113.36	34670.45	19139844		
ROZTLAČOVÁK - 18%	30	657634.066	21921.14	6042003		
ROZTLAČOVÁK - 24%	30	339677.887	11322.6	7262304		
ANOVA						
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	9.44E+09	3	3.15E+09	320.3562	6.041E-56	2.682809
Všechny výběry	1.14E+09	116	9825697			
Celkem	1.06E+10	119				