

# Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra základního zpracování dřeva



## **Porovnání radiálního a tangenciálního ohybu dřeva modřínu a smrku při statickém a dynamickém zatížení**

Diplomová práce

Autor: Bc. Petr Morávek

Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

Praha 2020

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „ Porovnání radiálního a tangenciálního ohybu dřeva modřínu a smrku při statickém a dynamickém zatížení“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou v práci citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetí osoby.

V Praze dne: \_\_\_\_\_

### **Poděkování**

Tímto chci poděkovat vedoucímu práce Ing. Vlastimilu Borůvkovi, PhD. za vedení při vypracovávání této diplomové práce a za přínosné rady. Dále bych chtěl poděkovat České zemědělské univerzitě v Praze za poskytnutí prostoru a vybavení k měření dat potřebných k vypracování.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se věnuje porovnání radiálního a tangenciálního ohybu při statickém a dynamickém zatížení u smrkového a modřínového dřeva. V práci je vyhodnocena stavba dřeva a jeho relevantní vlastnosti. Vyhodnocuje se statická a dynamická pevnost v ohybu a vliv stavby na ní. Výsledky jsou porovnány s dostupnou literaturou. V práci byly porovnány výsledky vybraných zkoušek – rázová houževnatost, ohybová pevnost, ultrazvuk a zvuk. Práce obsahuje výsledky měření, které vykazují statisticky významný rozdíl pouze u rázové houževnatosti u obou dřevin. Rázová houževnatost je vyšší u radiálního směru oproti tangenciálnímu, u ohybové pevnosti nebyl prokázán statisticky významný rozdíl.

## **SUMMARY**

This diploma thesis deals with the comparison of radial and tangential bending under static and dynamic load of spruce and larch wood. The wood structure and its relevant properties are evaluated. The static and dynamic bending strength and the influence of the structure on it are evaluated. The results are compared with available literature. The results of selected tests - impact strength, bending strength, ultrasound and sound were compared. The work contains the results of the measurements and they show a statistically significant difference only in the impact strength of both woody species. The impact strength is higher in the radial direction compared to the tangential one; no statistically significant difference was found in the bending strength.

## **Klíčová slova**

dřevo modřínu a smrku, pevnost v ohybu, přerážecí práce, ultrazvuk, anizotropie, variabilita vlastností

## **Keywords**

larch and spruce wood, bending strength, breaking work, ultrasound, anisotropy, variability of properties

# OBSAH

1	ÚVOD.....	8
2	CÍL PRÁCE.....	10
3	<b>ROZBOR PROBLEMATIKY.....</b>	<b>11</b>
3.1	Zkoumaná dřevina.....	11
3.1.1	Smrk ztepilý.....	12
3.1.2	Modřín opadavý.....	14
3.2	Vybrané vlastnosti.....	16
3.2.1	Šířka letokruhů.....	17
3.2.2	Hustota.....	18
3.2.3	Vlhkost.....	19
3.2.1	Pružnost dřeva.....	20
3.2.2	Pevnost dřeva.....	21
3.2.3	Houževnatost dřeva.....	22
3.2.1	Nedestruktivní zkoušky vlastností.....	24
3.3	Problematika řezů a směrů ve dřevě.....	26
4	<b>METODIKA.....</b>	<b>30</b>
4.1	Příprava vzorků.....	30
4.2	Stanovení hustoty.....	32
4.3	Stanovení šířky letokruhů.....	32
4.4	Ověřování homogenity vzorků v lati.....	34
4.5	Stanovení rázové houževnatosti.....	38
4.6	Stanovení ohybové pevnosti.....	40
4.7	Stanovení vlhkosti.....	43
4.8	Vyhodnocení dat.....	44
5	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE.....</b>	<b>46</b>
5.1	„Homogenita“.....	47
5.2	Rázová houževnatost a ohybová pevnost.....	54
5.3	Doprovodné vlastnosti.....	57
6	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>67</b>

<b>ZDROJE</b> .....	69
<b>NORMY</b> .....	76
<b>SEZNAM GRAFŮ</b> .....	76
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	76
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	78
<b>PŘÍLOHA</b> .....	79

# 1 ÚVOD

V současné době se dřevo využívá v různých odvětvích průmyslu jako je stavebnictví, výroba aglomerovaných materiálů, nábytkářská výroba a mnoho dalších. Velké zastoupení má masivní dřevo, které je díky svým vlastnostem jedinečné. Po mechanické i estetické stránce je nenahraditelným materiálem, jeho vlastnosti jsou ovšem v různých směrech odlišné. Dřevo je heterogenní materiál, používaný pro svoji dostupnost a obnovitelnost a je jedním z mála materiálů, který je možné obnovovat po velmi dlouhou dobu. Další výhodou dřeva je, že v průběhu růstu váže uhlík do své struktury a udržuje ho až do úplného rozložení. Dřevo se získává ze vzrostlých stromů, které díky fotosyntéze vytváří kyslík důležitý pro život na zemi. Pomocí pěstebních metod je možné ovlivnit konečný vzhled a vlastnosti produktů (řeziva). Dřevěný materiál je zdrojem pro širokou škálu výrobků kolem nás, a proto je nutné ho dále poznávat a zjišťovat jeho vlastnosti. Poznání vlastností dřeva může vést k rozšíření jeho využití pro potřeby lidského rozvoje a prosperity.

V práci bude rozebírána problematika rozdílných mechanických vlastností ve dvou směrech, v tangenciálním a radiálním. Dále se bude práce skládat ze tří hlavních částí, přičemž první část bude obsahovat teoretický rozbor problematiky a popis dvou zkoumaných dřevin pro objasnění jejich stavby a vlastností získaných ze zdrojové literatury. Ve druhé části bude popsána metodika, která byla použita při měření. Třetí část práce bude obsahovat výsledky měření se statistickým vyhodnocením.

V práci se budou zkoumat vybrané vlastnosti u smrkového a modřínového dřeva. Vzorky pro měření budou vyrobeny z jedné radiální fošny vysoké kvality pro každou dřevinu tak, aby bylo dosaženo ideálního odklonu vláken a paralelnosti vzorků pro jednotlivé zkoušky. Pro odpovídající výsledky v práci je nutné, aby vzorky měly stejné, nebo co nejpodobnější vlastnosti (hustota, vlhkost, šířka letokruhů). Pro vyhodnocování budou důležité jednotlivé faktory, které se u dřeva vyskytují a mohou ovlivňovat jeho vlastnosti jako je umístění vzorku v lati, strana fošny, pozice apod.



Cílem práce bude posouzení ohybu statickou a dynamickou zkouškou u tangenciálního a radiálního směru ve dřevě. Dále bude posuzována struktura dřeva z důvodu zjišťování podobnosti mechanických vlastností mezi jednotlivými směry tak, aby výsledky byly porovnatelné. Výsledky získané měřeními budou následně vyhodnoceny a porovnány s dostupnou literaturou.

## **2 CÍL PRÁCE**

V této diplomové práci je cílem rozbor problematiky, a to jak relevantních vlastností dřeva, tak i jeho stavby. Vyhodnocovat se bude statická a dynamická pevnost v ohybu modřínového a smrkového dřeva a posuzovat se budou faktory stavby dřeva (struktury) s ohledem na vybrané vlastnosti (veličiny). Účelem práce je porovnání zjištěných výsledků s odbornou literaturou a utvoření vlastního názoru ohledně zkoumané problematiky.

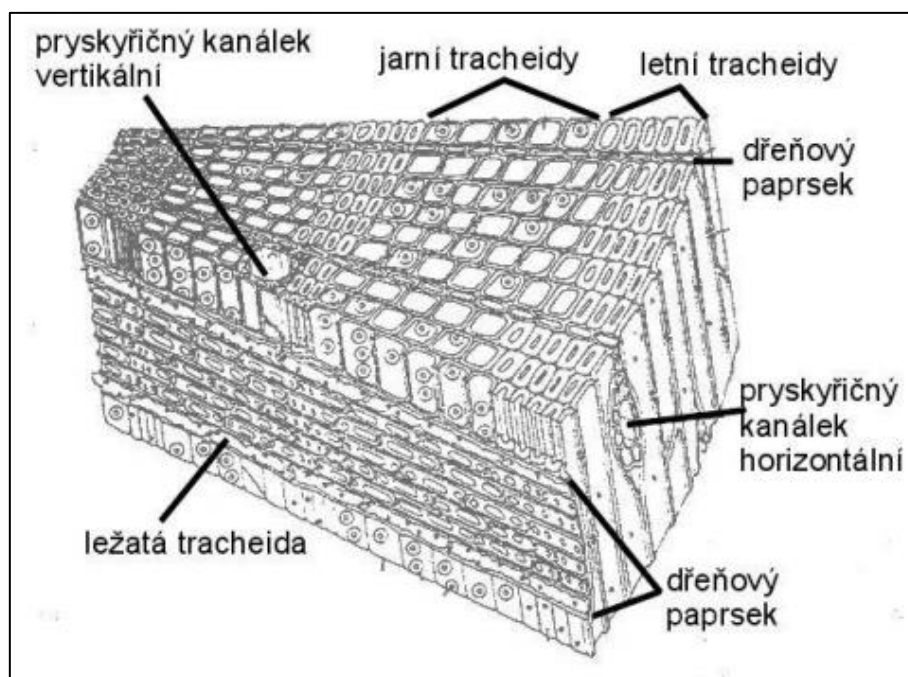
## 3 ROZBOR PROBLEMATIKY

### 3.1 Zkoumaná dřevina

Pro diplomovou práci byly zvoleny dvě jehličnaté dřeviny, a to smrk ztepilý (*Picea abies*) a modřín opadavý (*Larix decidua*). Jedná se v prvním případě o dřevinu s vyzrálým dřevem a ve druhém o jádrovou dřevinu s rozdílnými mechanickými vlastnostmi. Vybrány byly pouze jehličnaté dřeviny rostoucí v České republice, které mají v lokálním i globálním průmyslu velký význam a jsou hojně využívané. Stavba jehličnatých dřevin je oproti listnatým dřevinám jednodušší z důvodu jejich dlouhého výskytu na zemi od počátku vegetace. (Mikroskopická stavba jehličnatých dřevin 2013)

Jehličnaté dřevo je tvořeno dvěma typy buněk: parenchymatickými (zásobní a vodivá funkce) a cévicemi (tracheidy). Anatomická stavba je jednodušší, tracheidy představují 90–94 % stavby dřeva a zbylou část tvoří parenchymatické buňky zajišťující výživu. Tracheidy jsou protáhlé buňky s různými konci (vidličkovité, oblé, špičaté apod.) podle jejich funkce ve dřevě v částech letního a jarního dřeva. Jejich uložení je vertikální a vytvářejí diagnostické znaky dřevin, v nichž jsou uspořádány v radiálních pravidelných řadách a jsou ovlivněny růstovými podmínkami stromu. V letním dřevě mají hlavně mechanickou funkci a dále také ovlivňují mechanické vlastnosti různých dřevin. Naopak v jarním dřevě mají převážně vodivou funkci a jsou tvořeny širokým lumenem. Výměnu látek mezi jednotlivými tracheidami zajišťují tečky a dvojtečky (otvory mezi buňkami). Tečky jsou otvory vzniklé při růstu buněk, ovlivňující průchod látek a jejich impregnovatelnost, z převážné části působí v tangenciálním směru. Některé jehličnaté dřeviny obsahují pryskyřičné kanálky a dřeňové paprsky (jednovrstevné nebo vícevrstevné), které jsou tvořené parenchymatickými buňkami. Jsou dobrým rozpoznávacím znakem pro určování dřevin jak na makroskopické, tak mikroskopické hladině. Místo, ve kterém se kříží horizontální parenchymatické

buňky s vertikálními tracheidami se nazývá křížové pole. (Mikroskopická stavba jehličnatých dřevin 2013)



Obrázek 1 Stavba jehličnatých dřevin (Lauš 2013)

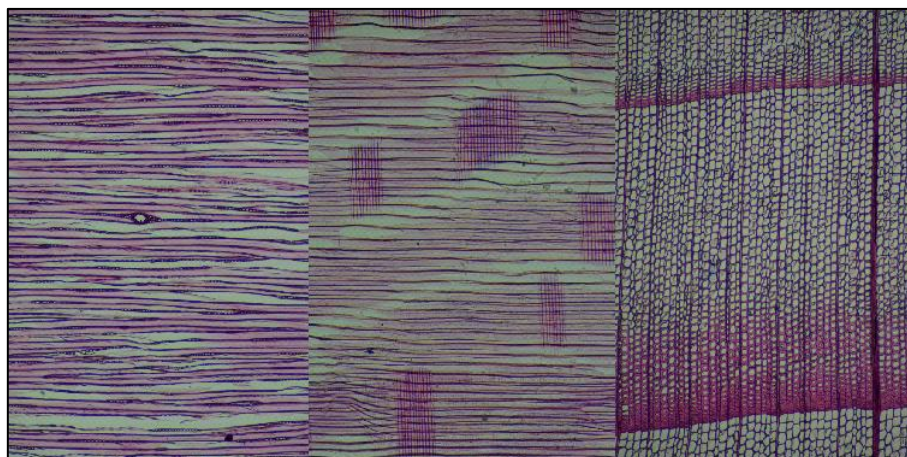
### 3.1.1 Smrk ztepilý

Smrk ztepilý, pod latinským názvem známý jako *Picea abies*, je jehličnatá dřevina vyskytující se ve střední a jihovýchodní Evropě. Patří do čeledi borovicovitých dřevin a je jednou z nejrozšířenějších. Patří ke stále zeleným dřevinám s rovným kmenem a kuželovitou korunou. Kůra je světle hnědá a hladká, u starších stromů se mění na šedohnědou až červenohnědou. Na povrchu je kůra šupinovitá a rozpukaná, jehlice smrku jsou čtyřhranné se zašpičatělými konci o délce 10-25 mm o průměru 1 mm. Kvete v období od dubna do června, plodem je hnědá šiшка dlouhá až 15 cm. Dospělý strom dorůstá výšky kolem 50 metrů a může se dožít až 200 let v ideálním prostředí pro růst. (Smrk ztepilý, 2019, Björn 2013)



**Obrázek 2** Makroskopické řezy smrku ztepilého (lexikon, 2019)

Smrk patří do skupiny dřevin s vyzrálým dřevem, u kterých se po pokácení vyskytuje odlišný odstín na obvodu kmene, barevná změna v průběhu sušení zmizí a na konečný estetický vzhled nemá vliv. Dřevina obsahuje pouze bělovou část a stavba dřeva je ovlivněna změnami ročních období a tvoří kruhové útvary od dřeně směrem k obvodu, které jsou složeny z jarního a letního dřeva. Jarní dřevo vzniká během jarního období, kdy dřevina nejvíce nabývá na objemu a z tohoto důvodu jsou jarní letokruhy nejširší se světlou barvou. Letní dřevo vzniká během letních měsíců, díky pomalejšímu růstu má větší hustotu a je tvrdší, dále má tmavší barvu s ostře ohraničenou hranicí, na které je odlišena tmavá a světlá část letokruhu. Celkově má dřevo barvu bílou až žlutou s mírným odleskem na povrchu. Pryskeřičné kanálky jsou přítomné a výskyt podélného parenchymu je ojedinělý, nebo úplně chybí. Epitelové buňky jsou tlustostěnné a malé, dřevné paprsky jsou heterocelulární, stavba příčných tracheid je hladká a zvlněná. Hustota smrkového dřeva je při absolutní vlhkosti přibližně  $470 \text{ kg/m}^3$ . Tvrdost smrkového dřeva se pohybuje okolo 26 MPa. Dřevo je měkké, ale díky stavbě je dostatečně pevné, pružné a trvanlivé. Obrábění probíhá bez problémů v závislosti na ostrosti nástroje. (Lexikon 2019, Smrk ztepilý 2019)



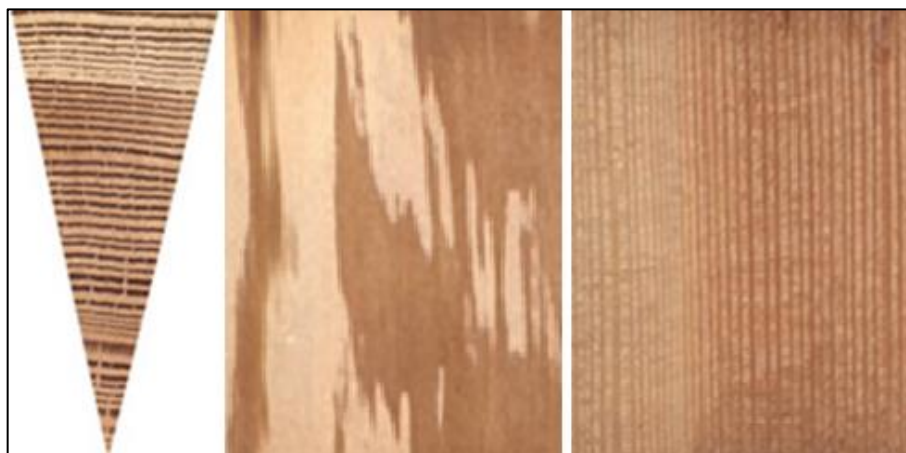
**Obrázek 3** Mikroskopická stavba smrku ztepilého (foto Martin Lexa)

Smrk patří k nejrozšířenějším dřevinám a pro jeho široké uplatnění je implementován v širokém spektru odvětví. Smrky jsou vysazovány nejčastěji jako monokultury, nebo také jako okrasné dřeviny v zahradách a parcích. Jeho nevýhodou při růstu je nízká retence vody a nízká odolnost vůči kalamitám (kůrovec, vichřice aj.). (Smrk ztepilý 2019)

### **3.1.2 Modřín opadavý**

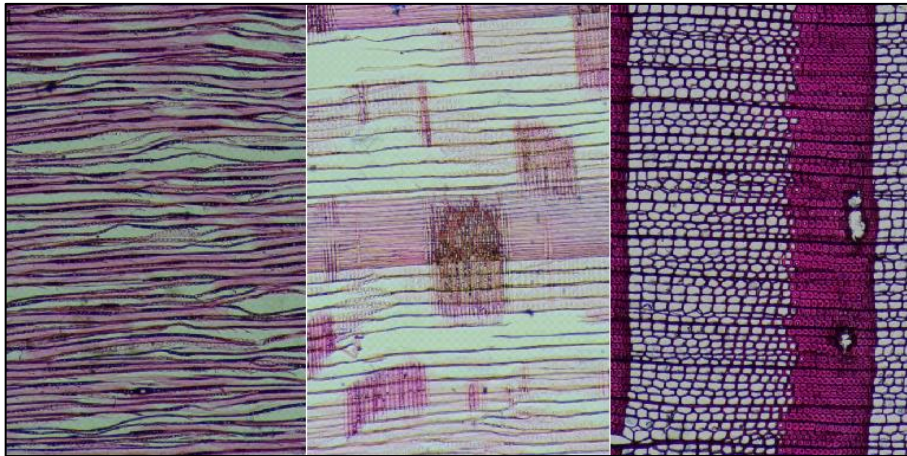
Modřín opadavý, s latinským názvem *Larix decidua*, je jehličnatá dřevina s jádrovým dřevem. Patří do čeledi borovicovitých, vyskytuje se v oblasti střední Evropy a jeho příbuzné druhy se vyskytují na severní polokouli. Koruna modřínu je řídká, štíhlá, kuželovitého tvaru a na zimní období opadávají jehlice z celého stromu. *Larix* je jedinou u nás rostoucí jehličnatou dřevinou, která se na zimu zbavuje jehličí a během zimy není zelená. Jehlice jsou dlouhé 3 cm a vyskytují se ve svazcích po 30 až 40 kusech na jeden trs. Semenáček modřínu vyrůstá na kúlovitém hlavním kořenu, v průběhu růstu zakrní a je nahrazen větvemi postranních kořenů. Borka na povrchu kmene je v mládí žlutohnědá a v průběhu let se mění na červenohnědou podélně rozpukanou. Plodem jsou šišky menšího rozměru, mají hnědou barvu s délkou až 4 cm a strom kvete v období od dubna do června. Stanoviště jeho růstu musí být na slunném místě s hlinitou nebo vápenatou půdou, přičemž se může objevit i na kamenité a mírně vlhké půdě. Dřevina se

dožívá až 70 let a dorůstá do výšky až 50 metrů. Průměr kmene může mít v dospělosti cca 1,5 metru. (Lexikon 2019, Modřín opadavý 2019, Guan 2011)



**Obrázek 4** Makroskopické řezy modřínu opadavého (Lexikon 2019)

Dřevo modřínu je ceněno pro jeho vlastnosti a vzhled, patří mezi pružné a velmi trvanlivé dřeviny. Jeho typickým znakem je široká část jádra a úzká běl přes několik letokruhů u obvodu kmene. Má výraznou kresbu z důvodu velké barevné odlišnosti mezi jarními a letními letokruhy. Barva běle je nažloutlá a jádro má tmavě červenou až nachovou barvu s mírným odleskem. Typickým znakem jsou také drobné tmavé suky s velkou četností a obsah pryskyřice je nižší, než jaký má borovice. Hustota modřínu při nulové vlhkosti se pohybuje okolo  $560 \text{ kg/m}^3$  a tvrdost se pohybuje kolem  $43,5 \text{ MPa}$ . Dřevo je středně tvrdé a dobře se opracovává různými druhy obráběcích nástrojů. Modřínové dřevo je hojně využíváno jako obkladový materiál ve stavebnictví, dále se také může využívat jako konstrukční prvek. Jeho využití na konstrukční prvky je nižší než u smrku z důvodu jeho vyšší ceny. Modřín opadavý se dále také využívá v nábytkářství. (Lexikon 2019, Modřín opadavý 2019, Holtmeier 1995)



**Obrázek 5** Mikroskopická stavba modřínu opadavého (foto Martin Lexa)

Na mikroskopické úrovni je stavba modřínového dřeva zřetelná a jde vidět ostré ohraničení letokruhů s rozdílem mezi stavbou jarních a letních tracheid. Dřevo má díky letním tracheidám výraznou barvu letního dřeva. Dřeňové paprsky jsou složeny z parenchymatických buněk uložených na ležato. Typ dřeňových paprsků je heterocelulární, buněčná stěna příčných tracheid je tenká, hladká a zvlněná. Nejvíce viditelné jsou na radiálním řezu a tvoří přibližně 8,8 % objemu dřeva. U modřínového dřeva se hojně vyskytují ztenčeniny ve formě dvojteček, které se vyskytují vedle sebe jako párové dvojtečky. Pryskyřičné kanálky tvoří 8-12 tlustostěnných epitelových buněk. Na tangenciální rovině jsou také viditelné horizontální kanálky v dřeňových paprscích. (Haniko 2009)

### 3.2 Vybrané vlastnosti

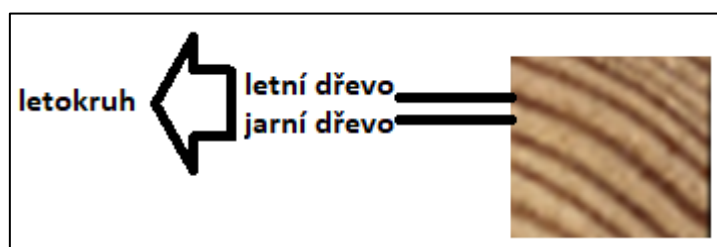
Do této diplomové práce byly vybrány vlastnosti, na kterých je možné vyhodnotit rozdíly v jednotlivých směrech dřeva tak, aby byly porovnatelné. Ve vybraných vlastnostech jsou také základní vlastnosti dřeva, které neodmyslitelně patří ke každému zkoumání dřevěných či kompozitních materiálů, jedná se o hustotu, vlhkost, šířku a podíl letního dřeva. V práci jsou porovnávány pružnostní a pevnostní vlastnosti dřeva obou zkoumaných dřevin (smrku ztepilého a modřínu opadavého) při namáhání v ohybu. Dřevo je charakteristické svými vlastnostmi i heterogenní stavbou, která se v průběhu materiálem mění. Masivní dřevní materiál



je také jedním z těch, u kterých se mění jeho vlastnosti s okolním prostředím. Každá dřevina má rozdílné vlastnosti, a proto při výrobě musíme zvolit na daný výrobek tu vhodnější z nich.

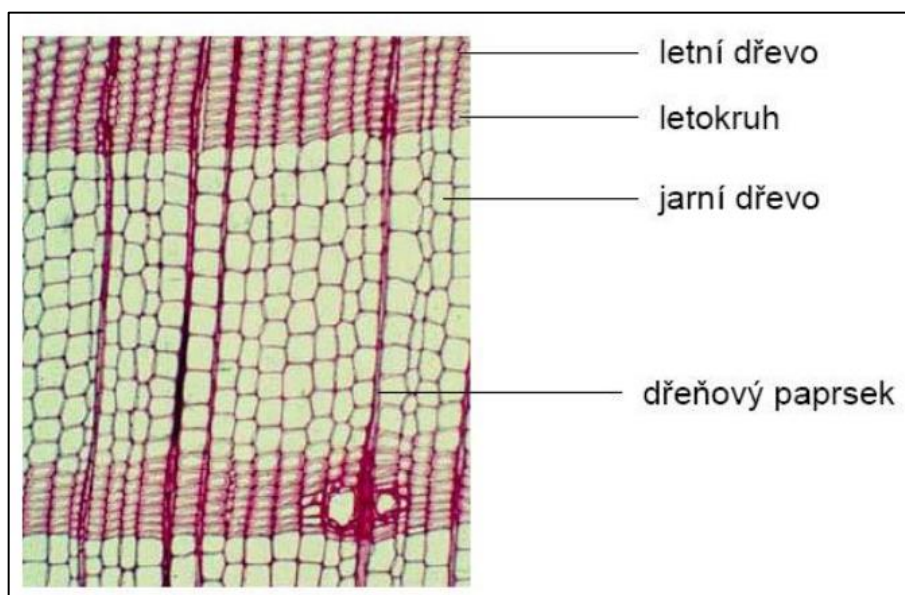
### 3.2.1 Šířka letokruhů

Šířka letokruhu se dá popsat jako roční přírůst dřeva za jedno vegetační období, které se skládá z jarního a letního přírůstu dřeva. Dřevo nabývá na objemu pomocí dělivého pletiva (kambia), které je nejproduktivnější v jarním období. Dělivá pletiva se vyskytují na vnějším okraji dřeva v bělové části, mezi bělovým dřevem a lýkem. Vzhled, zbarvení, výraznost a další vlastnosti letokruhu nám také ovlivňují druh dřeviny. Jehličnaté dřeviny mají výraznější letokruhy oproti listnatým dřevinám, a to díky jejich stavbě. Jarní dřevo v podstatě začíná růst na počátku vegetačního období a má světlejší barvu oproti letnímu dřevu, které roste v pozdějším období růstu a je ovlivněno nižším přísunem živin pro růst. U jádrových dřevin se také na jednom letokruhu předěluje jádrová část s bělovou, pokud se nejedná o nepravé jádro, které přesahuje několik letokruhů. Letokruhy jsou ovlivněny vegetačním pásmem, ve kterém dřevina roste, a ročními klimatickými změnami (jaro, léto, podzim a zima). Šířka jednotlivých letokruhu je ovlivněna také orientací a podmínkami růstu na stanovišti. Pokud má dřevina dostatek živin a potřebných podmínek pro růst, tak je letokruh širší hlavně v jarní části. Jestliže je strom při růstu často namáhán, tak převládá podíl letního dřeva, což vede ke zlepšení mechanických vlastností. V oblastech subtropických pásem jsou letokruhy ovlivněny pouze monzuny a náhlými změnami klimatických podmínek. U dřevin rostoucích v subtropickém pásmu jsou rozdíly mezi letokruhy minimální.



Obrázek 6 Části letokruhu

Z jednotlivých letokruhů je složeno dřevo tak, že narůstají kolem pomyslné osy kmene (dřeně) v kruzích. Podle podmínek růstu se mění jejich šířka, tvar a barva. Jednotlivé vrstvy nám vytvářejí kuželovité nárůsty a postupně tvoří celý kmen stromu. Dále nám také ovlivňují kresbu vzniklou po rozřezání kmene na řezivo. Na jednotlivých řezech se díky nim mění kresba, podle směru řezu na základní plochy s radiální, tangenciální a příčnou kresbou. Radiální plocha je plocha vzniklá přeříznutím kulatiny v ose (ve dřeni) a tvoří tzv. radiální kresbu (souvislé pruhy). Tangenciální plocha vzniká přeříznutím kulatiny mimo osu kmene a tvoří eliptickou kresbu podle úhlu a umístění řezu. Poslední plocha je příčná a vytváří se přeříznutím kmene kolmo na jeho osu, tvoří kruhovitou kresbu zvětšující se od dřeni směrem k obvodu kmene. Jednotlivé směry ve dřevě nám ovlivňují vlastnosti, protože dřevo se řadí mezi heterogenní materiály (v různých směrech, různé vlastnosti). (Deslauriers 2003)



**Obrázek 7** Mikroskopická stavba letokruhu (Dřevo 2019)

### 3.2.2 Hustota

Hustota je měřitelná vlastnost každého materiálu a zjišťuje se jako hmotnost na objemovou jednotku. Pokud se mění její hodnota oproti standartní, tak je považována za chybnou a odlišnost musí být odstraněna, jelikož ovlivňuje vlastnosti. Heterogenní materiály mohou mít odlišnou hustotu v průřezu, z tohoto

důvodu se uvádí přibližná hodnota, a při zatřídění se určuje rozmezí, ve kterém se může pohybovat. Hustota každého materiálu je důležitá pro porovnávání jednotlivých vlastností, protože ovlivňuje naměřené hodnoty. (Slezingerová 2002)

Hustotu u dřeva ovlivňuje mnoho faktorů jako je anatomická stavba, druh dřeviny, orientace výřezu v kmeni a další. Je také ovlivňována podmínkami prostředí jako je vlhkost a teplota, proto se měření hustoty provádí za předem stanovených laboratorních podmínek. Pro vlastnosti dřeva se využívá hodnota zjišťovaná za normovaných podmínek, což je relativní vlhkost vzduchu 65 % a teplota 20 °C, tyto hodnoty nám drží absolutní vlhkost dřeva na cca 12 %. Základními jednotkami jsou  $\text{kg/m}^3$  a  $\text{g/cm}^3$ . Tato veličina se dále používá pro výpočty u některých mechanických zkoušek. Na základě těchto hodnot se dřeviny rozdělují podle hustoty na dřeviny s nízkou hustotou (pod  $550 \text{ kg/m}^3$ ), se střední hustotou (v rozmezí  $550$  až  $750 \text{ kg/m}^3$ ) a s vysokou hustotou (nad  $750 \text{ kg/m}^3$ ). Za dřevinu s nejnižší hustotou je považována balza, která má hustotu přibližně  $130 \text{ kg/m}^3$  a za nejhustší dřevinu je pokládán guajak, který má hustotu přibližně  $1350 \text{ kg/m}^3$ . (Slezingerová 2002, Karlman 2005)

### 3.2.3 Vlhkost

Vlhkost dřeva je podíl vody k hmotnosti dřeva, mění se v závislosti na okolním prostředí a podmínkách, ve kterých se dřevo nachází. Je také měřitelnou hodnotou, která se používá pro praktické využití, zejména při prodeji řeziva konečným odběratelům.

Voda ve dřevě se může vyskytovat v různých formách a podle toho se dělí na jednotlivé druhy. Prvním druhem vody je voda chemicky vázaná ve sloučeninách, kterou lze ze dřeva odstranit pouze spálením a zjišťuje se za pomoci chemických analýz, její obsah je cca 1-2 % ze sušiny. Pro mechanické a fyzikální vlastnosti nemá významný vliv, a proto je zanedbatelná. Dalším druhem vody je voda vázaná (hygroskopická) nacházející se v buněčných stěnách a je vázaná pomocí vodíkových můstků na hydroxylové skupiny OH části celulózy a hemicelulózy. Tento druh se vyskytuje u dřevin samostatně s vlhkostí do cca 30 % (BNV – bod nasycení vláken), má velký vliv na mechanické a fyzikální

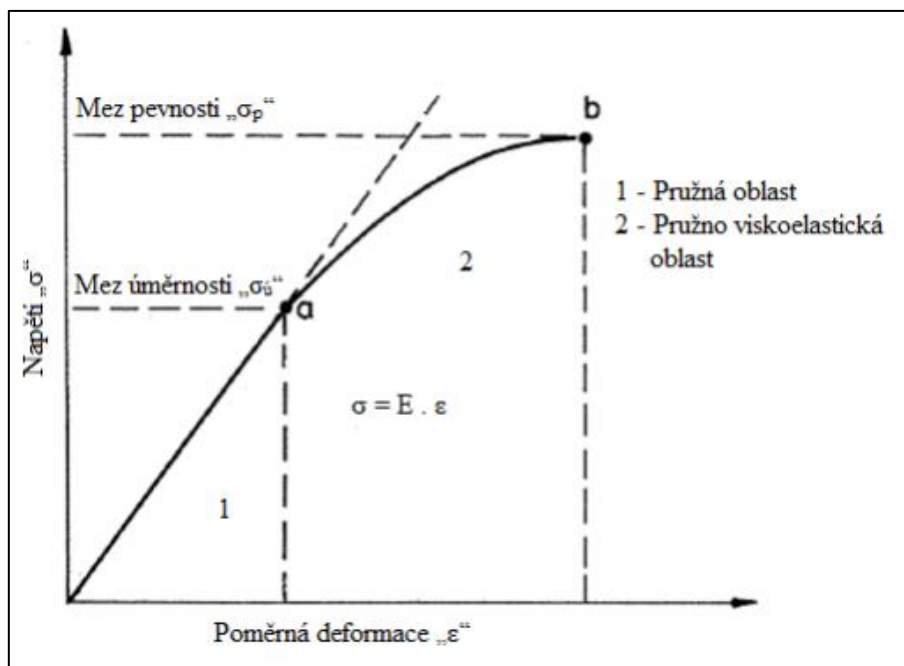
vlastnosti dřeva, také nám ovlivňuje jeho bobtnání a sesychání. Posledním druhem vody ve dřevě je voda volná (kapilární), která vyplňuje lumeny (dutiny v buňkách) a mezibuněčné prostory. Na mechanické a fyzikální vlastnosti má podstatně menší vliv než voda vázaná. Ve dřevě se vyskytuje nad BNV a při sušení se odstraňuje jako první. (vlhkost dřeva 2019, Martensson 1992)

### 3.2.1 Pružnost dřeva

Pružnost dřeva je schopnost dřeva vrátit se po uvolnění zatížení do původního stavu. Pružnost lze definovat také jako schopnost dosáhnout původních rozměrů po odstranění vnějších sil působících na materiál. Při překonání určité hranice je dřevo nenávratně poškozeno a pružnost nefunguje. Pružnost se využívá při různých technologických procesech, které závisí na pružnostních vlastnostech materiálu, jako je ohýbání či lisování. Vlastnost se také využívá při navrhování různých typů konstrukcí staveb. Dřevo různých dřevin má jinou pružnost, a to ovlivňuje její použití a zpracování v praktických situacích. Pro svoje pružnostní a pevnostní vlastnosti je dřevo velmi hojně využíváno ve stavebnictví, jeho velkou výhodou

je, že při překonání jeho maximální únosnosti začíná praskat, a tím varuje před případnou katastrofou jakou je například pád celé dřevěné konstrukce (dříve významné pro výrobu důlních vzpěr a tunelů při těžbě uhlí či jiného nerostného materiálu).

Po odlehčení se deformace vrací v závislosti na napětí po jiné křivce, než při jeho zatěžování (nazýváme hysteréze). Proces návratu do původního stavu lze podle termo-dynamiky považovat za adiabatický z důvodu, že se mění i jeho objem. Při zjišťování se vychází z napětovo-deformačního diagramu, na kterém se pružnost vyskytuje v lineární části grafu (obrázek 8). Pružnost můžeme kvalifikovat za pomoci těchto charakteristik: modulu pružnosti ( $E$ ), Poissonovými čísly ( $\mu$ ), mez úměrnosti ( $\sigma_u$ ) a energií pružné deformace ( $W_p$ ). (Green 1999, Požgaj 1993, Goodman 1970)



Obrázek 8 Napětově deformační diagram (Brüstl 2016)

### 3.2.2 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva se dá popsat jako odolnost dřeva proti trvalému porušení deformací. U dřeva se určuje za pomoci experimentů a vyjadřuje se jako maximální napětí před porušením, avšak dřevo je heterogenní materiál, a proto se nedá určit přesná hodnota z globálního hlediska. Určuje se v různých směrech a je ovlivněna jak stavbou, tak podmínkami, při kterých je zjišťována. Pro zjišťování pevnosti dřeva se využívají různé metody a způsoby zkoušení. Jednotlivé metody se také mohou lišit velikostí a tvarem vzorků, na kterých se zkoušky provádějí. Pevnost dřeva můžeme rozdělit podle stavu napjatosti (jednoosé a víceosé), způsobu zatížení (tah, tlak, krut, smyk a ohyb), časového průběhu (statické nebo dynamické) a účinků zatížení na dřevo (nedestruktivní nebo destruktivní způsob). Podle směru působení síly na letokruhy můžeme rozdělit pevnost ve směru vláken nebo kolmo na vlákna (radiální nebo tangenciální směr). Při zkoušce se zjišťuje maximální síla dosažená při porušení vzorku. (is.mendelu 2019)

S touto vlastností souvisí ohybová pevnost dřeva, která bude dále vyhodnocována. V práci bude sledována pevnost dřeva při ohybu v obou směrech kolmo na vlákna. Ohybová pevnost se měří jako prostý nosník, který leží na podporách a je namáhán

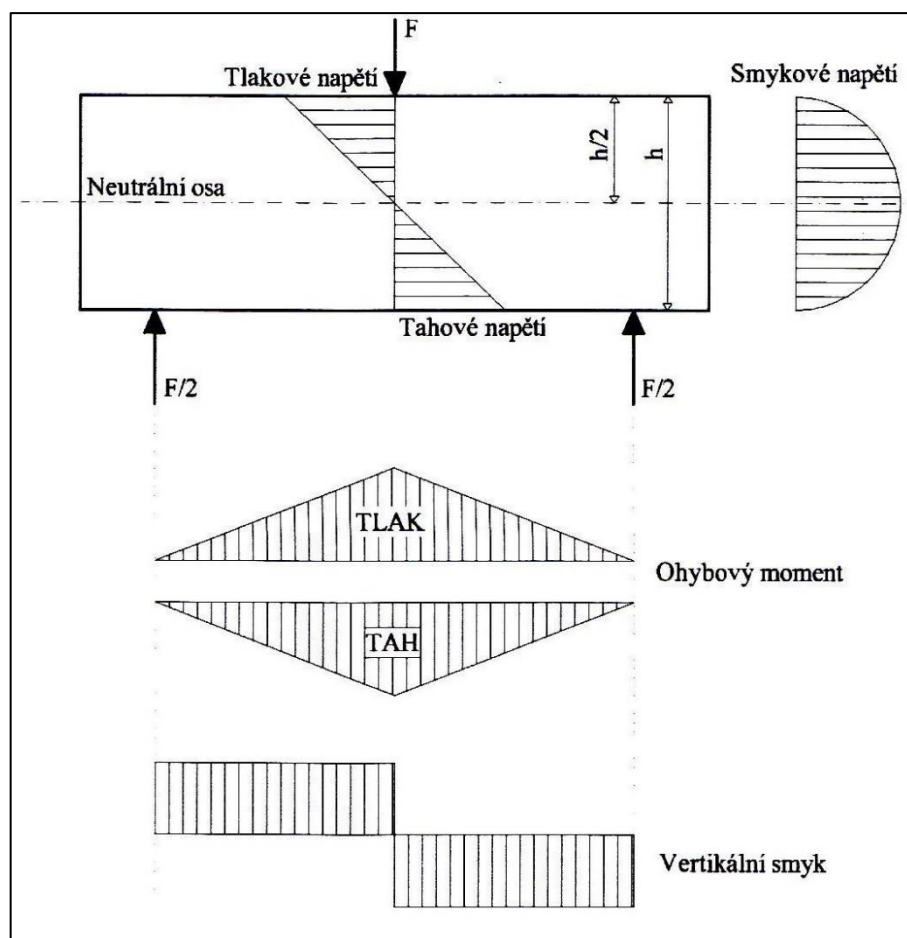
buď na jednom (tříbodový ohyb), nebo na dvou (čtyřbodový ohyb) místech. Nejčastěji se v literatuře vyskytují údaje měření, při kterých se zkoumá namáhání v tangenciálním směru (tangenciální ohyb). V literatuře je udáváno, že rozdíl ve směrech namáhání se vyskytuje zejména u jehličnatých dřevin (v tangenciálním směru je pevnost o 10-12 % vyšší oproti radiálnímu směru) a u listnatých dřevin udává, že rozdíl je prakticky zanedbatelný (max. 2-4 %). Těleso je při zatěžování ohýbáno a na vrchní straně je namáháno na tlak, přičemž přibližně uprostřed je neutrální osa, na které se mění tlakové napětí na tahové a na spodní straně jsou vlákna namáhána pouze na tah. Ve dřevě dojde během zkoušky k prvotnímu poškození v tlakové zóně při překročení maximální meze pevnosti. Podle lomu, který vznikne, se dá popsat houževnatost dřeviny (křehké dřeviny mají hladký lom a houževnaté dřeviny mají vláknitý lom). Ohybovou pevnost lze u dřeva zjišťovat tříbodovým, nebo čtyřbodovým ohybem. Pevnost dřeva je také ovlivněna vzdáleností podpěr a velikostí tělesa. (is.mendelu 2019, Wood 1970)

Při namáhání tělesa na ohyb vzniká tahové a tlakové napětí, toto napětí je znázorněno na obrázku 9. Těleso má tzv. neutrální osu, ve které se mění tahové napětí na tlakové. Nad osou je tlakové napětí a pod osou tahové.

### **3.2.3 Houževnatost dřeva**

Houževnatost dřeva je mechanická vlastnost, která se vyjadřuje množstvím energie spotřebované na vznik plastické deformace. Je to mechanická práce potřebná pro porušení dřeva. Houževnatost dřeva se s rostoucí prací potřebnou pro překonání plastické deformace zvyšuje a při krátkodobém zatížení vzniká deformace pružná v čase. Houževnatost dřeva je významně ovlivněna strukturou dřeva. Tuto vlastnost také ovlivňuje směr, ve kterém síla působí. Tento druh namáhání se nejčastěji zjišťuje v radiálním či tangenciálním směru. Dalšími faktory ovlivňujícími houževnatost dřeva je rychlost zatížení, stav napjatosti, teplota dřeva a množství

vody vázané v buněčných stěnách. Vztah mezi deformací a napětím je do meze úměrnosti modelován podle Hookovy pružiny. (Požgaj 1993)



**Obrázek 9** Průběh ohybového momentu a napětí při zatížení ohybem (Borůvka 2016)

V praktickém použití má houževnatost dřeva vliv na křehkost lomové části a při zpracování může ovlivňovat ohýbání a lisování dřeva. Pokud je dřevo málo houževnaté, je možné ho použít na dílce vyráběné ohýbáním či lisováním. (Požgaj 1993)

S houževnatostí dřeva souvisí rázová houževnatost dřeva, což je schopnost dřeva absorbovat práci vytvořenou rázovým ohybem (náhlé zatížení a přeražení). Cílem rázové houževnatosti je zjišťování práce potřebné k přeražení tělesa. Práci potřebnou na přeražení tělesa vyjadřujeme jako práci na jednotku plochy ( $J/cm^2$ ). Houževnatost dřeva lze také vyhodnotit podle lomu vzniklého při přeražení tělesa. Čím štrapatější lom, tím je dřevo houževnatější. Křehké dřevo má schodovitý lom s hladším a tupým povrchem. (Požgaj 1993)

### 3.2.1 Nedestruktivní zkoušky vlastností

Jedná se o zjišťování fyzikálních a mechanických vlastností u materiálů bez poškození jejich stavby, či struktury. Nedestruktivní zkoušky jsou založeny na zkoumání elektrických, elektromagnetických, akustických a tepelných vlastností u různých materiálů a vycházejí z porovnávání s destruktivními metodami. Nedestruktivní zkoušky se v praxi využívají pro kvalitativní zatřídování řeziva a výrobků ze dřeva, také lze tento druh zkoušek použít pro prokázání paralelnosti vzorků vzájemným porovnáním výsledných hodnot. Některé druhy těchto zkoušek se používají pro zjišťování vad či odchylek vzniklých při výrobě materiálů a podle nich se také materiál může roztrdit do jednotlivých kvalitativních skupin. Největší výhodou těchto zkoušek je, že během testování se neporuší materiál a také to, že mohou být prováděny u stojících stromů přímo na stanovišti kde dřevina roste. Naopak velkou nevýhodou je, že pro porovnání výsledků je potřeba provést také destruktivní zkoušky na výběru materiálu pro porovnání. (Borůvka 2016)

Prvním způsobem nedestruktivní zkoušky je vizuální kontrola povrchu materiálu, která se provádí pouze zrakem a je závislá na oku osoby provádějící hodnocení, vidí pouze významné odchylky od růstu stromu jako jsou suky, trhliny, hniloba a další. Je to jedna z prvních zkoušek využívaných v minulosti, zejména pro zatřídění materiálu podle kvality. Pro kvalifikované výsledky však tato metoda není přesná, protože je závislá na oku a zkušenosti osoby provádějící kontrolu. Vizuální kontrola se provádí zejména při zatřídování materiálu na pile. Významnější metoda pro zjišťování vlastností nedestruktivním způsobem je metoda ultrazvuku. Tato metoda je založena na měření času průchodu vlny skrz materiál. Ultrazvuk je frekvence, která je vyšší než 20 000 Hz a pro lidské uši je neslyšitelná. Rozsah frekvence, který se používá pro měření průchodu dřevěným materiálem je 20-50 kHz, tento rozsah je použit z důvodu velkého útlumu ve dřevě. Pomocí této metody je možné vypočítat dynamický modul pružnosti. Šíření vlny je ovlivněno směrem vláken (směrem ve dřevě), vadami a dalšími růstovými anomáliemi. Poměry šíření vlny ve dřevě jsou přibližně 15:5:3 (podélný, radiální a tangenciální směr), z toho vyplývá, že kolmo na vlákna je šíření výrazně nižší



z důvodu anatomické stavby. Na šíření vlny má významný vliv také druh dřeviny, vlhkost, hustota a vady dřeva. Při porušení ideální stavby dřeva se doba průchodu vlny výrazně zvýší a tím lze detekovat vady. Pro ultrazvuk se používají metody přímého a nepřímého zkoušení. Přímá metoda vychází z umístění snímačů na protilehlé plochy, nepřímá metoda spočívá v umístění snímačů na stejnou plochu a z měření času průchodu. Ultrazvuk je nejvhodnější metoda zjišťování kvality při laboratorním zkoumání bez potřeby destrukce materiálu. (Borůvka 2016)

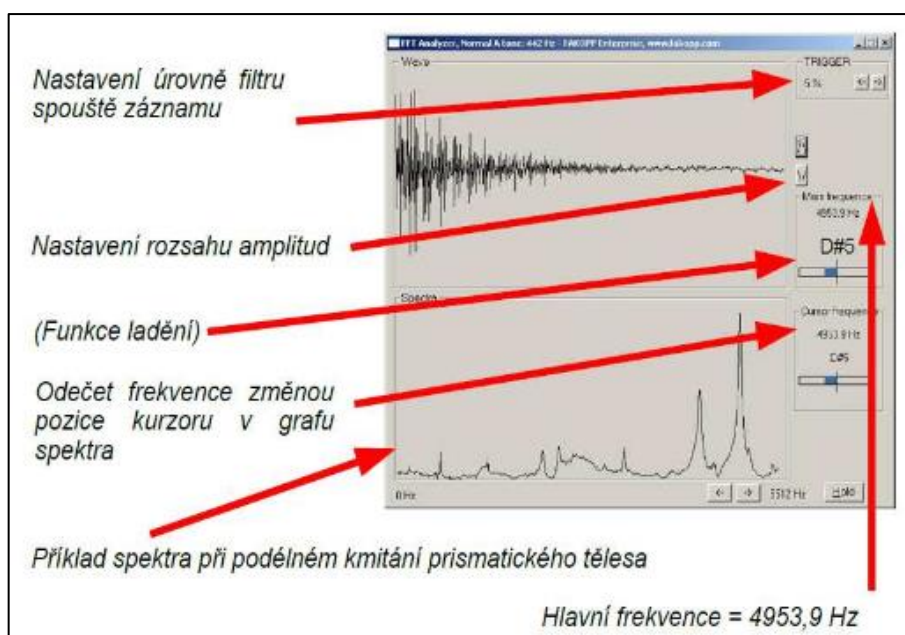
Dalším nedestruktivním způsobem zjišťování homogenity dřeva jsou akustické vlastnosti, kterými lze poznat výskyt vad podle času průchodu zvuku skrze materiál. Dřevo je jedinečný materiál, který je schopen zvuk zesilovat, rezonovat a charakteristicky intonovat. V praktickém využití dřeva však nejde nalézt identickou stavbu dřeva z důvodu velké variability a heterogenity materiálu.



**Obrázek 10** Ultrasonic Timer

U akustických vlastností je základní jednotkou rychlost šíření zvuku a velikost vlny, která projde skrze materiál. U vlny se měří její délka, a ta je přímo úměrná frekvenci. Rychlost šíření má anizotropní charakter a v každém směru dřeva se šíří jiným charakterem. Ve směru podél vláken se energie přenáší za pomoci řetězců celulózy silněji než napříč vlákny. V průměru je rychlost šíření zvuku na hodnotě

4 500 m/s v podélném směru. Rychlost šíření se s rostoucí vlhkostí snižuje, z důvodu rozdílné, ve které se zvuk šíří rychlostí pouhých 1 485 m/s. Rychlost prostupu zvuku je také závislá na druhu a hustotě dřeviny (rozdílná stavba dřevin). S rostoucí hustotou se zvyšuje rychlost šíření zvuku skrze materiál. Při měření této vlastnosti je potřeba udržovat okolní prostředí bez výrazných rušení. Tato vlastnost se využívá zejména při výrobě hudebních nástrojů, u kterých je velmi důležitá pro kvalitu a čistotu zvuku. (De Oliveira 2006, Zatloukal 2018)

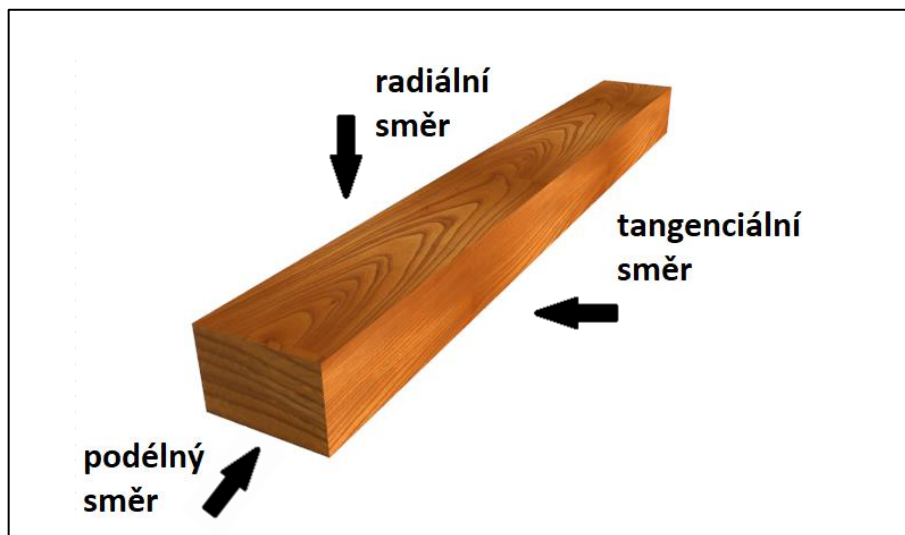


Obrázek 11 Program FFT Analyzátor s popisem (Kundera 2014)

### 3.3 Problematika řezů a směrů ve dřevě

Problematika řezů a směrů ve dřevě je v této diplomové práci významným faktorem, který ovlivňuje výsledky měření v jednotlivých směrech, a proto je zde řešena a popsána. Podle uspořádání stavby dřeva lze jednotlivé řezy kmenem stromu rozdělit na příčný, tangenciální a radiální řez (viz obrázek 12). Od směrů lze odvodit řezy ve dřevě, které jsou důležité pro porovnávání vlastností dřeva, jelikož v různých směrech jsou vlastnosti rozdílné. Řezy jsou také důležité pro estetický vzhled výrobků vyrobených z masivního dřeva a určují se podle

orientace a umístění osy řezu na letokruhy, či biologickou osu kmene (dřeň), která se vyskytuje na jeho středu. (Čunderlík 2009, Bucur 1988)



Obrázek 12 Směry ve dřevě

### Příčný řez

Jedná se většinou o první řez, který provádíme již při těžbě dřeva v lese, a je veden kolmo na biologickou osu kmene. Letokruhy tvoří soustavu kružnic, které od středu směrem k obvodu zvětšují svůj průměr, a tím vytvářejí terčovitý vzhled povrchu. U jehličnatých dřevin jsou rozdíly mezi letokruhy výrazné a jejich hranice jsou snadno rozpoznatelné. S řezem dřeva souvisí i jeho směr, u příčného řezu se kolmo na něj vyskytuje směr podélný. (Čunderlík 2009)

Mikroskopická stavba na příčném řezu je typická radiálně uspořádanými příčně přerezanými cévicemi. Tangenciální šířka cévic je nezávislá na poloze v letokruhu a je konstantní. Radiální šířky cévic jsou od začátku letokruhu směrem k obvodu postupně menší a menší. Tloušťka buněčných stěn se mění v průřezu jednotlivých letokruhů, směrem k obvodu se zvětšuje. Struktura čtyř až šestihranných cévic je občas přerušena pruhy parenchymatických buněk tvořících jednotlivé dřeňové paprsky. Dřeňové paprsky jsou tvořeny jako jednořadé, ale u některých dřevin mohou mít i více řad. Na příčném řezu jsou u jehličnatých dřevin také přerežány pryskyřičné kanálky, které tvoří největší útvary na řezu. Pryskyřičný kanálek je tvořen epitelovými buňkami (oválné, tenkostěnné a tlustostěnné), které vyplňují

prázdný prostor. Kanálky jsou za běžných podmínek orientovány zejména v letním dřevě, ale za zhoršených podmínek růstu se mohou objevovat i v jarním dřevě (také jsou známé jako traumatické kanálky). (Čunderlík 2009)

## **Radiální řez**

Radiální řez je veden ve směru vláken biologickou osou kmene. Tímto řezem vzniká povrch, na kterém jsou viditelné rovnoběžné pruhy. Pruhy vytvářejí letokruhy, které mají rozdílnou barvu u jarního a letního dřeva. (Čunderlík 2009)

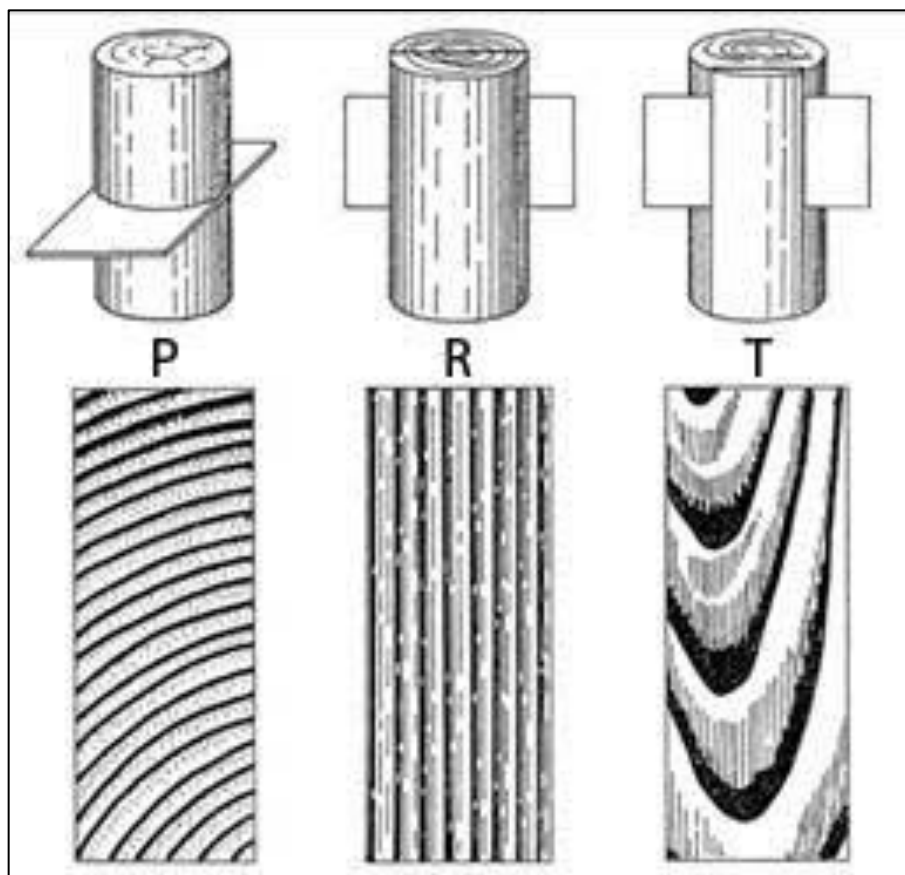
Podélné řezy kmenem se vyznačují podélným přerezáním cévic. Na mikroskopické struktuře dřeva je stavba do jisté míry podobná. Pro rozlišování mezi tangenciálním a radiálním řezem je možno se orientovat podle dřevových paprsků, které jsou viditelné pod mikroskopem. Rozlišujeme radiální řez podle délky dřevového paprsku. Na radiálním řezu jsou viditelné podélně přerezané letní a jarní cévice, zejména na koncích přerezaných tracheid jsou dvojtečky zřetelně viditelné. Dvojtečky jsou orientovány z větší části v jarních cévicích. Na radiálním řezu jsou dobře viditelné přerezané parenchymatické buňky vyskytující se v dřevových paprscích. Výjimečně lze pozorovat na paprscích i epitelové buňky tvořící pryskyřičné kanálky. V místě, kde se paprsky kříží s ostatními buňkami lze pozorovat tzv. křížové pole. (Čunderlík 2009)

## **Tangenciální řez**

Podobný jako radiální řez je tangenciální, který je oproti radiálnímu vedený mimo osu kmene a vytváří rozdílnou kresbu. Plocha vzniklá tímto řezem vytváří fládrový vzhled, což jsou paraboly z letokruhů. Vzniká z důvodu stavby stromu, kdy letokruhy narůstají jako kuželovité vrstvy. Tangenciální směr je veden kolmo na radiální plochu. (Čunderlík 2009)

Typickým znakem tangenciálního řezu jsou podélně přerezané cévice a příčně přerezané dřevové paprsky. Vzhled na mikroskopické úrovni je ovlivněn tím, zda se řez vyskytuje na jarním nebo letním dřevě. Na řezu jsou dobře viditelné tečky a dvojtečky. Na tomto řezu je také možno dobře vidět dřevový paprsek, na kterém lze spočítat počet řad a vrstev parenchymatických buněk. Dobře jsou viditelné

horizontální pryskyřičné kanálky u víceřadých dřevných paprsků. Výjimečně je možné pozorovat podélné pruhy dřevního parenchymu složeného z krátkých parenchymatických buněk. (Čunderlík 2009)



**Obrázek 13** Řezy ve dřevě (makroskopická stavba dřeva 2013)

## 4 METODIKA

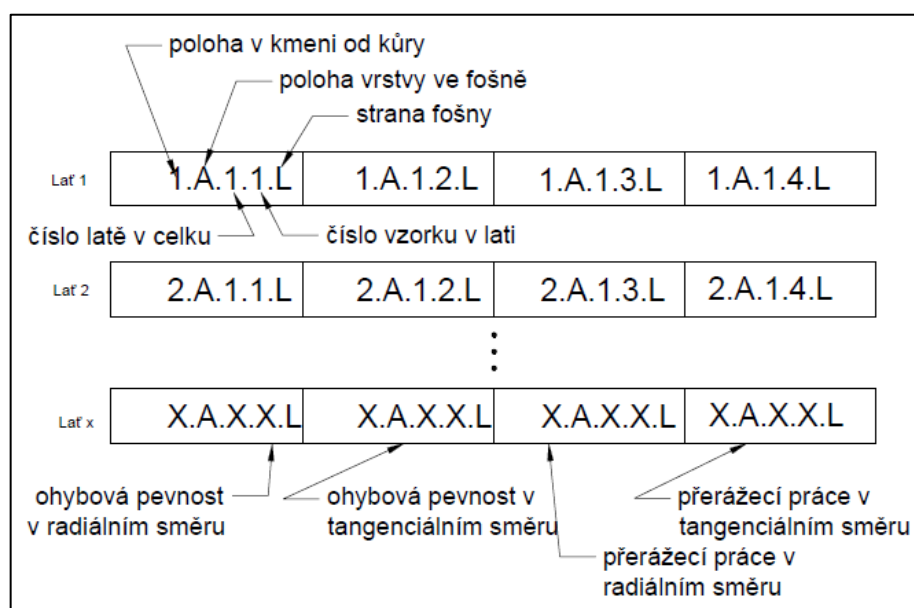
Výroba vzorků pro zjišťování vlastností byla prováděna autorem této práce na České zemědělské univerzitě v dílně dřevařského pavilonu. Měření bylo prováděné na vzorcích v laboratořích ČZU za laboratorních podmínek dle stanovených norem a dodržování BOZP.

Jednotlivá měření probíhala v souladu s normami určenými pro daný typ zkoušek. Měření byla prováděna dle časových možností autora a v závislosti na volných termínech jednotlivých zkušebních prostředků (přístrojů na měření). Před měřením na laboratorních zařízeních byly metodika a postup měření prokonzultovány s vedoucím práce Ing. Vlastimilem Borůvkou PhD. Výrobu vzorků si autor realizoval sám a určoval si požezové schéma přivezených fošen tak, aby dosáhl co možná nejpodobnějších vlastností jednotlivých vzorků. Na výrobu byly do dílny dovezeny fošny vysoké kvality radiálního řeziva a následně zde byly zpracovávány. Výroba vzorků probíhala z jedné fošny pro každou dřevinu zvlášť proto, aby bylo dosaženo co nejvíce podobných podmínek pro měření (podobnost stavby). K výrobě bylo dřevo vysušeno na truhlářskou kvalitu, aby se po vyhotovení vzorků významně nezměnil jejich průřez. Po výrobě se vzorky uložily do klimatizační komory, kde byly za stálých podmínek 20 °C a 65 % relativní vzdušné vlhkosti uloženy několik týdnů, z důvodu sjednocení podmínek pro výzkum. Vyhotoveny byly ze dvou dřevin, smrku ztepilého a modřínu opadavého dle zadání této diplomové práce.

### 4.1 Příprava vzorků

Příprava vzorků probíhala v truhlářské dílně dřevařského pavilonu na České zemědělské univerzitě a materiálem na výrobu byly neohraněné fošny o tloušťce 55 mm v surovém stavu od pily, po vysušení v komorové sušárně. Fošny měly standartní délku cca 4 metry na délku. V první fázi se fošny zakrátily na tři stejně dlouhé menší výřezy, které se označily tak, abychom věděli, jak jdou za sebou

ve směru od kořenové části stromu směrem vzhůru. Dále se neohraněné fošny osámovaly z obou stran. Dalším krokem bylo podélné rozříznutí ve středu pro lepší manipulaci při navazujících pracích. Po podélném dělení se z fošen vymanipulovaly za pomoci hoblování a podélného rozřezávání jednotlivé latě, které byly označeny pro přesné určení polohy v kmeni (značení je znázorněno na přiloženém obrázku 14). Z latí se nakonec vyřezávaly jednotlivé vzorky o předem daných rozměrech (příčný průřez 20x20 mm a délka 300 mm) dle požadavků jednotlivých zkoušek, které se předem vybraly pro daný výzkum. Z každé latě byly vyhotoveny čtyři skupiny vzorků a ty se označily pomocí kódu (viz obr. 14).



Obrázek 14 Kódování vzorků

Označování probíhalo přímo na dílně pro přesnost popisu jednotlivých vzorků. Pro přesné kódování byl vytvořen pětimístný kód 1A11R (poloha v kmeni od kůry, vrstva, číslo latě za sebou, pořadové číslo v lati, strana fošny). Z modřínové fošny bylo vytvořeno čtyřicet osm vzorků ve čtyřech sériích a ze smrkových fošen se vytvořilo čtyřicet šest vzorků ve čtyřech sériích. První skupina byla určena na ohybovou pevnost v radiálním směru a druhá skupina pro tangenciální ohyb, třetí a čtvrtá skupina byla určena na měření přerážecí práce. Toto rozložení bylo vybráno z důvodu dodatečného porovnávání mezi jednotlivými výsledky pro každou skupinu.

## 4.2 Stanovení hustoty

Hustota je jednou ze základních veličin získaných při výzkumu materiálů a používá se pro jejich vzájemné porovnávání. Pro výpočet hustoty je důležité znát rozměry a hmotnost vzorku. V diplomové práci se rozměry tělesa zjišťovaly za pomoci posuvného měřítka s napojením na počítač a dále pomocí automatického vyplňování hodnot do počítačového programu. Hmotnost se měřila na laboratorních vahách od firmy Kern také s napojením na PC. Hustota byla vypočítána jako podíl hmotnosti k objemu vzorku. Hustota se podle normy ČSN 49 0108 měří při absolutní vlhkosti dřeva 12 %, z tohoto důvodu byly vzorky klimatizovány v klimatizační komoře. Výsledek výpočtu se udává podle vstupních hodnot nejčastěji v  $\text{g/cm}^3$ , nebo  $\text{kg/m}^3$ . Počítá se podle vzorce (1) uvedeného v normě.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

$\rho$  – hustota dřeva ( $\text{kg/m}^3$ ),

$m$  – hmotnost  $v$  (kg),

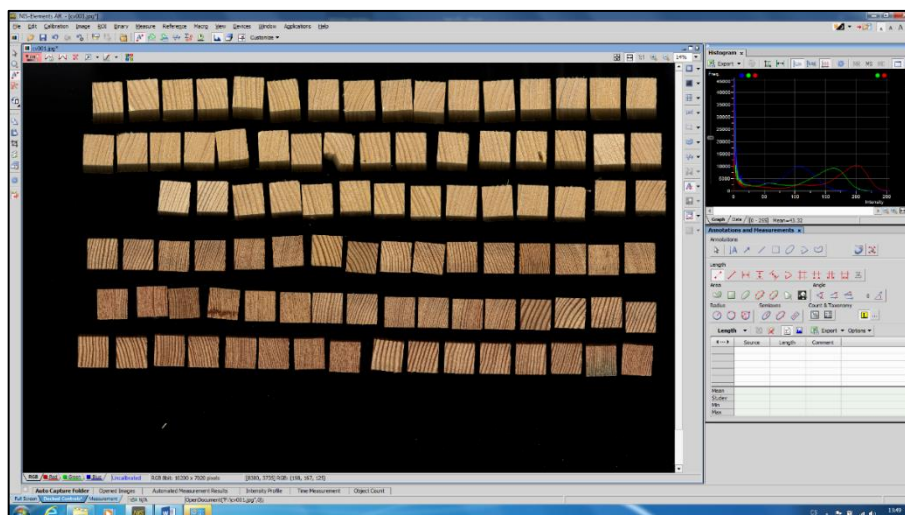
$V$  – objem ( $\text{m}^3$ ).

(ČSN 49 0108)

## 4.3 Stanovení šířky letokruhů

Šířkou letokruhu se rozumí šířka jedné vrstvy, o kterou dřevo nabude během jednoho vegetačního období. Šířka letokruhu a podíl jarního a letního dřeva může ovlivňovat vlastnosti dřeva, proto je důležité tyto parametry zjišťovat a využívat při vyhodnocování dat, jako faktory. V ideálním případě by měla být šířka letokruhu s podílem letního a jarního dřeva ve všech letokruzích stejná, tento stav se ale v praxi vůbec nevyskytuje, a proto se musí tento faktor řešit u zkoumání dřeva individuálně.





Obrázek 15 Vyhodnocovací program NIS - Elements AR

Šířka letokruhů se zjišťovala na malých vzorcích určených ke stanovení vlhkosti, z důvodu lepší manipulace při umisťování vzorků na plochu skeneru. Malé vzorky byly vyřezány ze vzorků určených na zjišťování přerážecí práce tak, aby jejich poloha byla u cca středu dlouhých latí. Celá skupina vzorků byla umístěna na skenovací plochu skeneru čelními konci v dostatečných odstupech pro lepší vizuální orientaci při ručním vyhodnocování, dále byly řazeny podle kódů napsaných na všech tělesech. Pozice vzorků na skeneru podle kódu byly důležité pro výsledné porovnávání dle umístění v kmeni. Po naskenování čelních konců se scan (obrázek ve formátu) vložil do vyhodnocovacího programu NIS – elements AR (obr. 15), který je určený pro obrazovou analýzu založenou na kvalitě skenování obrázku (v této práci 600 dpi). V programu se ručně hledaly hranice letokruhů a za pomoci kurzoru byly označovány autorem hranice jednotlivých letokruhů. Výsledné hodnoty byly zpracovány za pomoci počítačového programu a vzorec pro přepočítání z pixelu na milimetry. Vzorec pro výpočet šířky letokruhu (2) je uveden níže.

$$s = \frac{\bar{X} * 25,4}{dpi} \quad (2)$$

$s$  – šířka letokruhu v (cm),

$\bar{X}$  – průměrná hodnota (px),

$dpi$  – kvalita obrázku (dpi).



**Obrázek 17** Sken čelních konců smrkových vzorků



**Obrázek 16** Sken čelních konců modřínových vzorků

## 4.4 Ověřování homogenity vzorků v latí

Ověřování homogenity se provádělo z důvodu vyhodnocení stavby vzorků tak, aby bylo možné naměřené hodnoty mezi sebou porovnat na základě co možná nejpodobnějších vlastností u všech zkušebních těles. Podobnost stavby zkoumaných vzorků je důležitá i pro samotné vyhodnocování výsledků, na které má stavba dřevin významný vliv.

### Metoda s využitím ultrazvuku

Měření času průchodu ultrazvukových vln bylo použito u vzorků z důvodu zjišťování jejich paralelností neboli podobných vlastností. Měření probíhalo na principu měření času průchodu ultrazvukového impulsu iniciovaného do materiálu. Princip měření je založen na vyvození impulsu, přičemž ve stejný okamžik se spustí časovač, který zaznamenává čas jeho průchodu. Měření probíhá na přístroji Fakopp (obr. 18), který je opatřen dvěma piezoelektrickými snímači

napojenými na zařízení pomocí kabelu. Piezoelektrické snímače se rozlišují podle tvaru na snímače, které se přikládají na plochu a na snímače určené na čelní konce. Pro zjišťování paralelnosti byly v této práci použity oba způsoby měření. Při prvním způsobu se vzorky dlouhé 300 mm ukládaly na pěnové podložky, které zajišťovaly odizolování od stolové desky. Piezoelektrické snímače krychlového tvaru se přikládaly na čelní konce a na přístroji se odečítaly hodnoty času průchodu skrze materiál. Druhý způsob byl podobný jako první, vzorky se ukládaly na pěnové podložky a snímače trojúhelníkového tvaru se přikládaly na plochy vzorků. Měření probíhalo na vzorcích opatřených ryskami, které byly od středu vzdáleny 60 mm (vzdálenost mezi ryskami 120 mm). Měření probíhalo na tangenciální a radiální ploše z důvodu jejich porovnávání mezi sebou. Hodnoty se zapisovaly ručně do tabulky vytvořené v počítačovém programu. Dále byl vypočítán čas, za který projde zvuk skrze zkušební těleso přes vzorec (3) uvedený níže. (UltraSonic 2017)

$$v = \frac{1000*d}{t} \quad (3)$$

$v$  – rychlost prostupu zvuku (m/s),

$d$  – vzdálenost sond od sebe  $v$  (mm),

$t$  – čas průchodu zvuku ( $\mu$ s).



**Obrázek 18** Metoda měření ultrazvuku Fakopp

Metodou zjišťování času průchodu vlny skrze materiál je možné pomocí výpočtu vyhodnotit také dynamický modul pružnosti. Dynamický modul pružnosti se vyhodnocuje nedestruktivním způsobem, vychází z výpočtu času průchodu skrze materiál a hustoty jednotlivých vzorků. Měření probíhá ve stále stejné vzdálenosti tak, abychom mohli použít data k porovnání mezi sebou. Výpočet dynamického modulu pružnosti může být proveden za pomoci vzorce (4). (Kloiber 2006)

$$E_{dyn,w} = \frac{\rho \cdot v^2}{1000000} \quad (4)$$

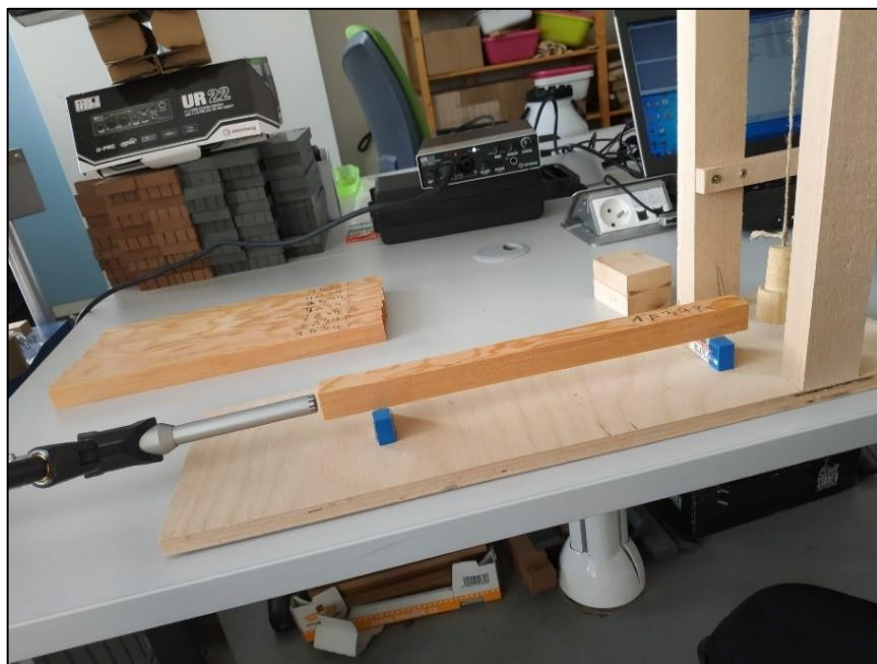
$E_{dyn,w}$  – dynamický modul pružnosti (MPa),

$\rho$  – hustota dřeva ( $\text{kg/m}^3$ ),

$v$  – rychlost prostupu zvuku (m/s).

## Metoda s využitím zesilovače

Výsledky této metody byly zjišťovány za účelem porovnávání jednotlivých vlastností pro paralelnost vzorků podobně jako u metody Fakopp. Tato metoda spočívá ve zjišťování rychlosti průchodu zvuku skrze prizmatické vzorky pomocí frekvence kmitů. Měření probíhalo pomocí aparatury (obr. 19) vytvořené za účelem zjišťování této veličiny, která se skládala z kyvadlové konstrukce, což je rám, který je upevněn na podložku. Na rámu se pohybovalo válcové těleso, které vyvozuje při nárazu na čelní konec vzorku zvuk a ten prochází skrze vzorek k mikrofonu se zesilovačem. Vzorek byl z důvodu odizolování uložen na gumové podpěry, pokaždé na stejnou pozici kvůli porovnávání výsledků. Na druhý konec vzorku byl umístěn mikrofon snímající zvuk procházející skrze vzorek. Mikrofon byl napojen na zesilovač, který převáděl vlny do počítače. V počítači byl instalován program pro FFT Analýzu (Fast Fourier Transformation – Rychlá Fourierova Transformace) a v něm se opisovala hodnota maximální šířky amplitudy vzniklé po nárazu tělesa (zjišťování frekvence). Na měření tělesa byla použita aparatura: mikrofon BEHRINGER ECM 8000 + stativ, zesilovač Steinberg UR 22 (obr. 20), program FFT Analyzer a dřevěná konstrukce vyrobená autorem práce. (Kundera 2014)



Obrázek 19 Aparatura na měření metodou zesilovače



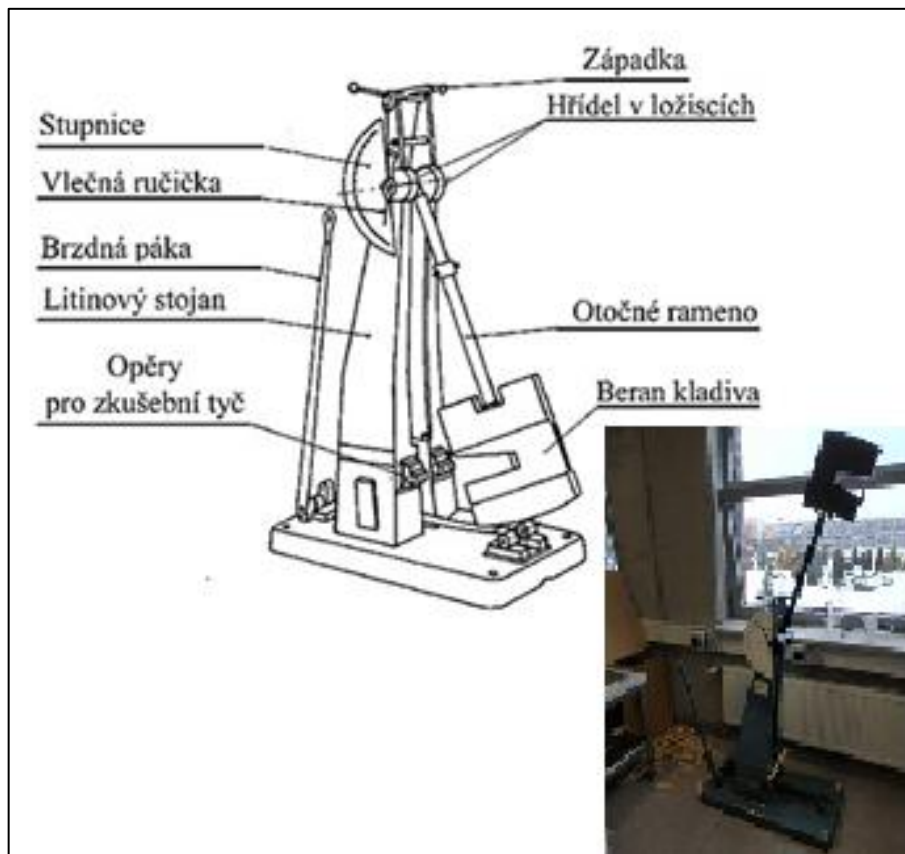
Obrázek 20 Převodník zvuku Steinberg UR22

## 4.5 Stanovení rázové houževnatosti

Rázová houževnatost je schopnost dřeva pohlit práci, která na těleso působí rázovým ohybem. Na zlomení tělesa je potřeba vyvinout dostatečnou sílu pro přeražení tělesa tak, aby došlo k úplnému přeražení tělesa na dvě části. Podle lomu lze určovat vlastnosti materiálu. Pokud jsou na lomu dlouhá vytrhaná vlákna, tak se jedná o houževnatý materiál, oproti tomu křehké dřevo má lom složený z krátkých vláken a tvoří takřka hladký lom. Zlom je vytvářen během krátkého časového okamžiku a v průběhu výrazného navýšení rázové síly působící na těleso. Literatura (Požgaj 1993) uvádí, že houževnatost je v rozdílných směrech dřeva rozdílná. (Požgaj 1993)

Pro výpočet rázové houževnatosti je potřeba změřit práci potřebnou na přeražení tělesa (vzorku). Práce potřebná na přeražení se zde zjišťovala na zařízení zvaném Charpyho kladivo (obr. 21) s rozsahem do 150 J. Pro měření na tomto zařízení se používají vzorky o daných rozměrech (20x20x300 mm) a dané absolutní vlhkosti

12 %. Princip zkoušky spočívá v uložení těles na podpěry k tomu určené a vytvoření následného rázového zatížení vytvořeného kladivem.



**Obrázek 21** Popis Charpyho kladiva  
Zdroj: <https://slideplayer.cz/slide/5615768/>

Zatížení se vyvozuje za pomoci ramene s přerážecí hlavou (tzv. Beranem) o předepsané hmotnosti tak, aby byla vytvořena odpovídající síla při dopadu na materiál. Po přeražení tělesa se měří jeho zhoutnutí za svislou osu přístroje a na stupnici (obr. 22) upevněné u osy kladiva na dobře viditelném místě stroje se odečítá hodnota práce vyvozené rázem v J. Hodnota se po každém měření musí odečíst a stupnice se musí vynulovat do základní polohy. Po zjištění velikosti práce se z výsledku vypočítá rázová houževnatost za pomoci vzorce (5).



Obrázek 22 Stupnice Charpyho kladiva

$$A_w = \frac{W}{b \cdot h} \quad (5)$$

$A_w$  – rázová houževnatost při dané vlhkosti ( $J/cm^2$ ),

$W$  – práce potřebná pro přeražení tělesa ( $J$ ),

$b, h$  – příčný rozměr tělesa ( $cm$ ).

(ČSN 49 0117, Gerhards 1968, Požgaj 1993)

## 4.6 Stanovení ohybové pevnosti

Ke stanovení ohybové pevnosti je potřeba provést měření, při kterém se zjistí maximální síla potřebná pro zlomení vzorku při statickém zatížení. Vzorky pro zjišťování ohybové pevnosti jsou normalizovány podle normy na rozměry 20x20 mm příčného průřezu a délky 300 mm. Vzorky před měřením byly klimatizovány v klimatizační komoře na 65 % relativní vzdušnou vlhkost a teplotu 20 °C. Na toto měření je vybrána metodická zkouška tříbodovým ohybem. Spočívá



v uložení vzorku o normalizovaných rozměrech na podpěry, které jsou vzdálené 240 mm od sebe dle normy ČSN 49 0115. Tato diplomová práce řeší rozdíl mezi radiálním a tangenciálním směrem, a proto se vzorky ukládaly na podpěry různými plochami podle skupin, do kterých byly zařazeny. Pokud se jednalo o radiální směr, tak se vzorky ukládaly na tangenciální plochu a pokud se jednalo o tangenciální směr, tak se ukládaly na radiální plochu. Podpěry byly umístěny na spodním nosníku, po kterém se posouvaly dle výpočtu jejich vzdálenosti. Při tříbodovém ohybu se vzorky zatěžují přesně na průsečíku poloviny spodních dvou podpěr. Vrchní zatěžovací hlava je nad vzorkem ve vzdálenosti 1-3 mm. Podpěry a zatěžovací hlava jsou opatřeny ocelovými válci, které se pohybují podle toho, jak se po nich posunuje materiál. Válce jsou v kluzných půlkruhových ložiscích a z čel jsou opatřeny pružinami pro přesné umístění v měřicím zařízení. Vrchní pohyblivá část má v sobě zabudované snímače na přesné měření hodnot, které jsou důležité pro vyhodnocování zkoušek. Veškerá data se přenášejí do počítače pomocí programu TIRA. Výsledná data potřebná pro vyhodnocování jsou maximální síla z průběhu měření, čas a dráha. Zkouška pro správné výsledky by měla trvat v rozmezí od 1 minuty až po minutu a půl. Výsledné hodnoty byly vyhodnoceny v PC programu pro zachování výsledků po měření. Ohybová pevnost byla vypočítána podle vzorce (6). (Yoshihara 2005, is.mendelu 2019, Pžgaj 1993, Olsson 2013, Colakoglu 2009)

$$\sigma_{max} = \frac{3 \cdot F \cdot l_0}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (6)$$

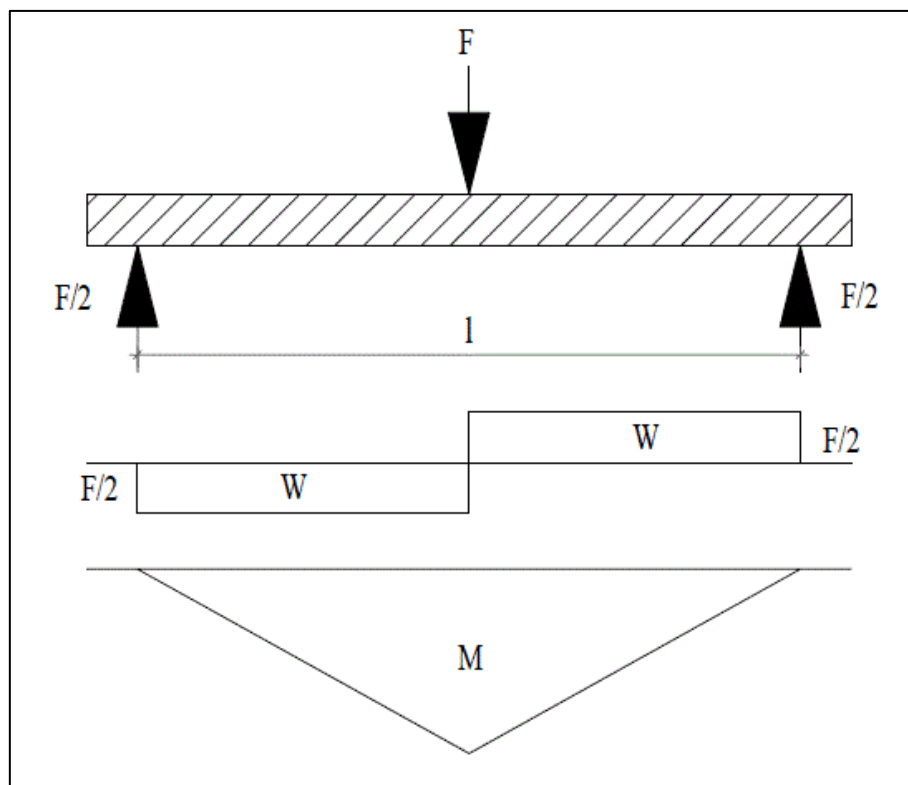
$\sigma_{max}$  – ohybová pevnost

F – působící síla (N)

$l_0$  – vzdálenost mezi podpěrami (mm)

b – šířka vzorku (mm)

h – výška vzorku (mm)



Obrázek 23 Průběh sil u tříbodového ohybu

Při měření dat na ohybovou pevnost nám vyšly hodnoty, ze kterých lze vypočítat statický modul pružnosti. Statickým modulem pružnosti se znázorňuje vnitřní odpor vůči pružné deformaci vznikající v lineární části měření. Z pracovního napětí – deformačního diagramu je známo, že po mez úměrnosti je modul lineární. V lineární části platí Hookův zákon, který má fyzikální význam. Charakteristika modulu pružnosti se vyznačuje jako podíl mezi napětím a poměrnou deformací. Modul se udává v MPa a měření probíhá v souladu s normou ČSN 49 0116 a mezí pevnosti ČSN 490115. Výpočet modulu pružnosti probíhá pomocí vzorce (7). (Morávek 2017)

$$E_{stat,w} = \frac{\Delta F \cdot l^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta y} \quad (7)$$

$E_{stat,w}$  – statický modul pružnosti (MPa),

$\Delta F$  – rozdíl síly při 40 a 10% (N),

$l$  – vzdálenost podpěr (mm),

$b$  – šířka tělesa (mm),

$h$  – výška tělesa (mm),

$\Delta y$  – rozdíl deformací (mm).



Obrázek 24 Trhací stroj

## 4.7 Stanovení vlhkosti

Vlhkost se stanovovala jako poslední vlastnost u vzorků použitých v práci, z důvodu jejich znehodnocení během sušení (degradace tvaru). Na zjišťování vlhkosti byla použita jedna z nejpřesnějších a nejpoužívanějších metod v laboratořích zaměřených na dřevo, a to metoda gravimetrie. (Kačík 1999)

Princip použitý při měření je založen na hmotnostním vážení vzorků před uložením do sušárny (obr. 25), určené na vysoušení na 0 % absolutní vlhkosti. Vlhkost se v práci zjišťovala na malých vzorcích, které byly získány odřezáním z konců dlouhých vzorků po přerážecí práci, při které došlo k přeražení. Vzorky měly rozměry 20x20x30 mm a byly odřezány na kotoučové pile v truhlářské dílně ČZU, za pomoci přípravku určeného na výrobu malých vzorků. Před sušením v sušárně se změřila hmotnost a poté byly uloženy do sušící komory, ve které byla udržována nulová vlhkost a teplota  $103 \pm 2$  °C. Tělesa se sušila v sušárně do ustálení, poté se všechna tělesa zvažil na laboratorních vahách. Ze zapsaných výsledků se pomocí

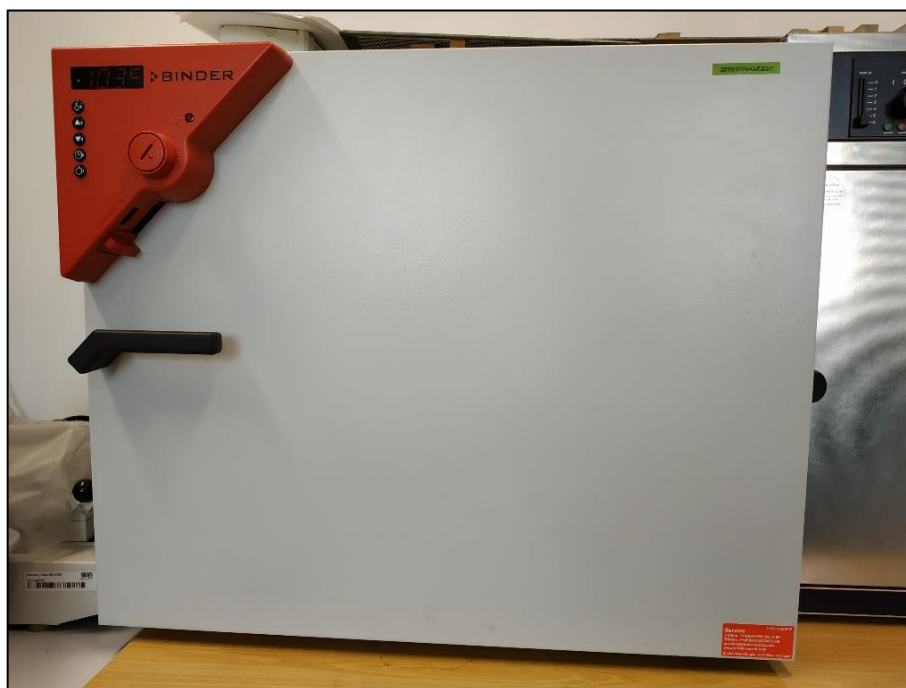
vzorce pro výpočet vlhkosti (8) vypočítala vlhkost, která byla u těles v průběhu zkoušení.

$$w_a = \frac{m_v}{m_0} = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (8)$$

$w_a$  – absolutní vlhkost dřeva (%),

$m_w$  – hmotnost dřeva před vysušením (g),

$m_0$  – hmotnost dřeva po vysušení (g). (Požgaj 1993)



Obrázek 25 Sušící komora

## 4.8 Vyhodnocení dat

Data se v průběhu měření zapisovala do tabulky připravené v PC programu. Pomocí jeho funkcí na statistické vyhodnocování byla data dále zpracována, a také se vypočítaly některé hodnoty potřebné pro vyhodnocení a porovnání výsledků s literaturou. Tabulka byla vytvořena v průběhu výzkumu a zpracována pomocí počítačového programu určeného ke zpracování zdrojových dat. Ve výsledcích budou přiloženy tabulky a grafy vytvořené z výsledných dat. V tabulkách

uvedených pod textem jsou vypsány průměrné výsledné hodnoty, kterých bylo dosaženo v průběhu zpracování dat. Statistické hodnoty byly zpracovány pomocí softwaru Statistika a byla použita vícefaktorová analýza rozptylu (ANOVA). U jednotlivých vlastností jsou uvedeny tabulky se statistickými hodnotami (SS – variace v důsledku interakce, Degrees of freedom – stupně volnosti, MS – rozptyl v důsledku interakce, F – Fisherův F-test, P – hodnota významnosti), statistická významnost hodnot je na 95 % hladině.

## 5 VÝSLEDKY A DISKUZE

V této kapitole budou shrnuty výsledky získané v průběhu měření a budou porovnány s literaturou. Dále zde budou uvedeny tabulky a grafy ze získaných dat.

**Tabulka 1** Statistické vyhodnocení doplňkových vlastností

	<b>smrk ztepilý</b>	<b>modřín opadavý</b>
<b>hustota (kg/m<sup>3</sup>)</b>	457 (22)	734 (79)
<b>vlhkost (%)</b>	13,8 (0,5)	13,3 (0,3)
<b>šířka letokruhů (mm)</b>	2,6 (0,5)	1,6 (0,7)
<b>podíl letního dřeva (%)</b>	16,2 (3,1)	27,9 (4,3)

V závorkách jsou uvedeny směrodatné odchylky.

**Tabulka 2** Statistické vyhodnocení hlavních vlastností

<b>směr</b>	<b>průměrné hodnoty vlastností</b>			
	<b>smrk ztepilý</b>		<b>modřín opadavý</b>	
	<b>radiální</b>	<b>tangenciální</b>	<b>radiální</b>	<b>tangenciální</b>
<b>rázová houževnatost (J/cm<sup>2</sup>)</b>	10,0 (3,3)	6,5 (1,1)	8,1 (2,4)	5,8 (2,2)
<b>ohybová pevnost (MPa)</b>	74,5 (4,6)	74,0 (12,7)	102,7 (11,8)	104,1 (13,5)
<b>dynamický modul pružnosti (MPa)</b>	7747 (1749)	7573 (1457)	11155 (2642)	11896 (2497)
<b>statický modul pružnosti (MPa)</b>	8572 (518)	8499 (672)	10497 (1430)	11154 (1339)

V závorkách jsou uvedeny hodnoty směrodatné odchylky.

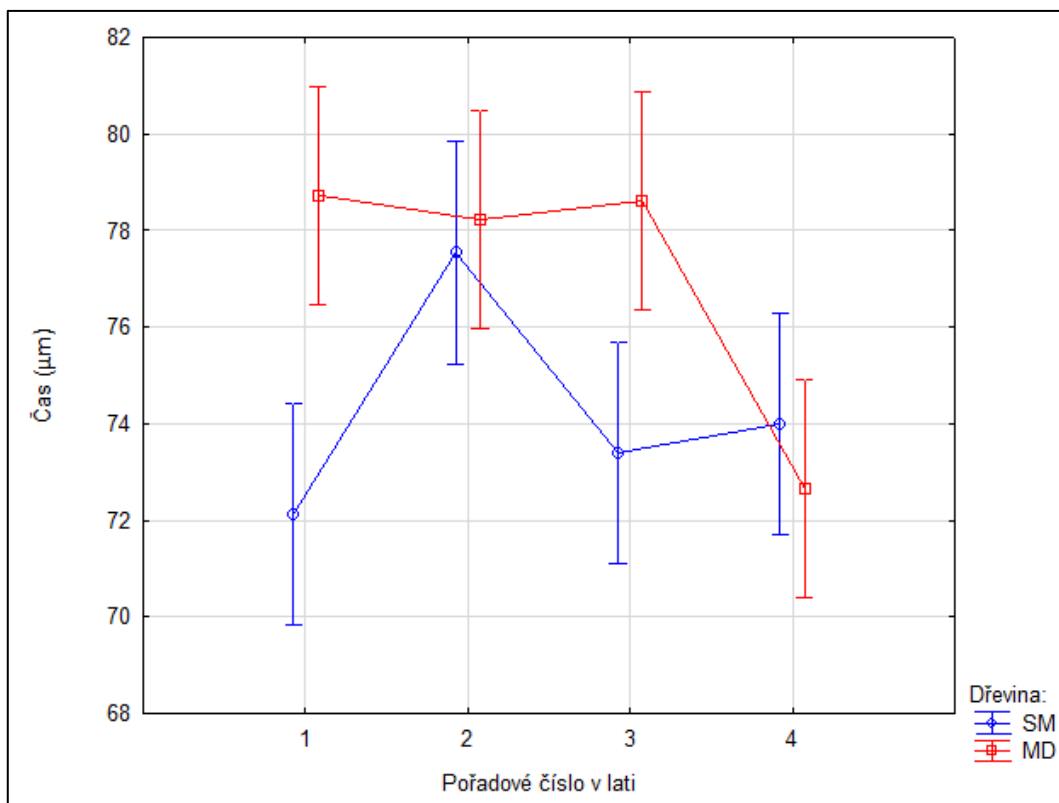
**Tabulka 3** Procentuální porovnání

	<b>smrk ztepilý</b>	<b>modřín opadavý</b>
	<b>rad vs. tg (%)</b>	
<b>rázová houževnatost</b>	34,6	29,3
<b>přerážecí práce</b>	34,7	29,2
<b>ohybová pevnost</b>	0,7	-1,4
<b>dynamický modul pružnosti</b>	2,2	-6,6
<b>statický modul pružnosti</b>	0,9	-6,3

## 5.1 „Homogenita“

V průběhu výroby vzorků již probíhala vizuální kontrola stavby na ploše fošen určených na výrobu vzorků pro tuto diplomovou práci. Autor si vzorky vyráběl sám v dílně na České zemědělské univerzitě, a z tohoto důvodu zodpovídal za kvalitu výroby zkušebních těles. Již při výběru fošen proběhla kontrola struktury a byla vybrána ideální fošna s minimem vad a ideálním sklonem letokruhů, které by mohly ovlivňovat měření a následné výsledky. Po rozřezání všech vzorků proběhlo popisování a vizuální kontrola, při které se odstranily celé latě, na kterých se vyskytovaly vady.

Po naklimatizování vzorků se zjišťovala podobnost vlastností v délce latě v podélném směru za pomoci měřících zařízení, které tuto vlastnost zjišťují díky průchodu ultrazvukové vlny dřevem. Bylo použito měření za pomoci impulzu na zařízení zvaném Fakopp ve dvou variantách, první spočívala na přikládání piezoelektrických snímačů na čela a druhá spočívala na přikládání snímačů na plochu. Tímto způsobem byla zjištěna podobnost času průchodu zvýrazněná na grafu 1. V grafu jsou vyznačeny intervaly vyznačující 95 % pravděpodobnost výskytu hodnot získaných při měření času průchodu vlny vzorkem na čelních koncích.

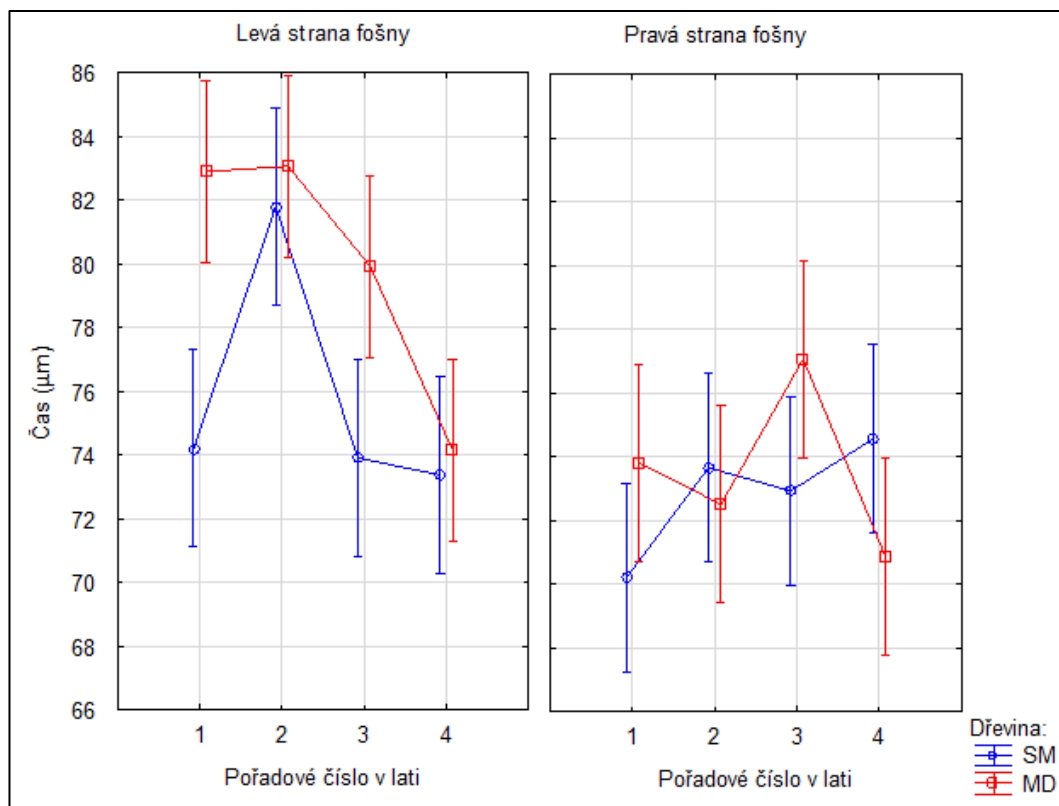


**Graf 1** Porovnání času průchodu v latích přiložením snímačů na čelní konce

Měření byla provedena na všech čtyřech částech latě tak, aby bylo možné porovnat a zjistit případnou variabilitu vzorků. Na grafu 2 je znázorněná závislost podobně jako u grafu 1 s tím rozdílem, že je zde řešen rozdíl mezi pravou a levou stranou fošny. Na grafu 1 je vidět, že u smrku se mírně odlišuje pouze druhá část latě a u modřínu je to pokles u čtvrté části. Jsou zde porovnány také výsledky obou dřevin, které jsou v této práci řešeny. Graf 2 nám ukazuje, jak probíhají změny v různých stranách fošny. Na pravé straně fošny smrkového dřeva lze pozorovat, že čas průchodu UZ vlny roste v závislosti na pořadovém umístění. Oproti tomu levá část výrazně vzroste jen u druhé části latě v pořadí. Modřín je oproti tomu více variabilní, ale pravá strana fošny je mírně odlišná pouze ve třetí části, kdežto v levé části je trend času průchodu klesající v celém průběhu latě. Z přiloženého duncanového testu (příloha 2) vyplývá, že rychlost průchodu ultrazvukové vlny dřevem v závislosti na straně fošny (L, R) a pořadí v lati (1,2,3,4) nebyla u smrku



prokázána, na rozdíl od modřínu, kde v některých případech byla závislost potvrzena.



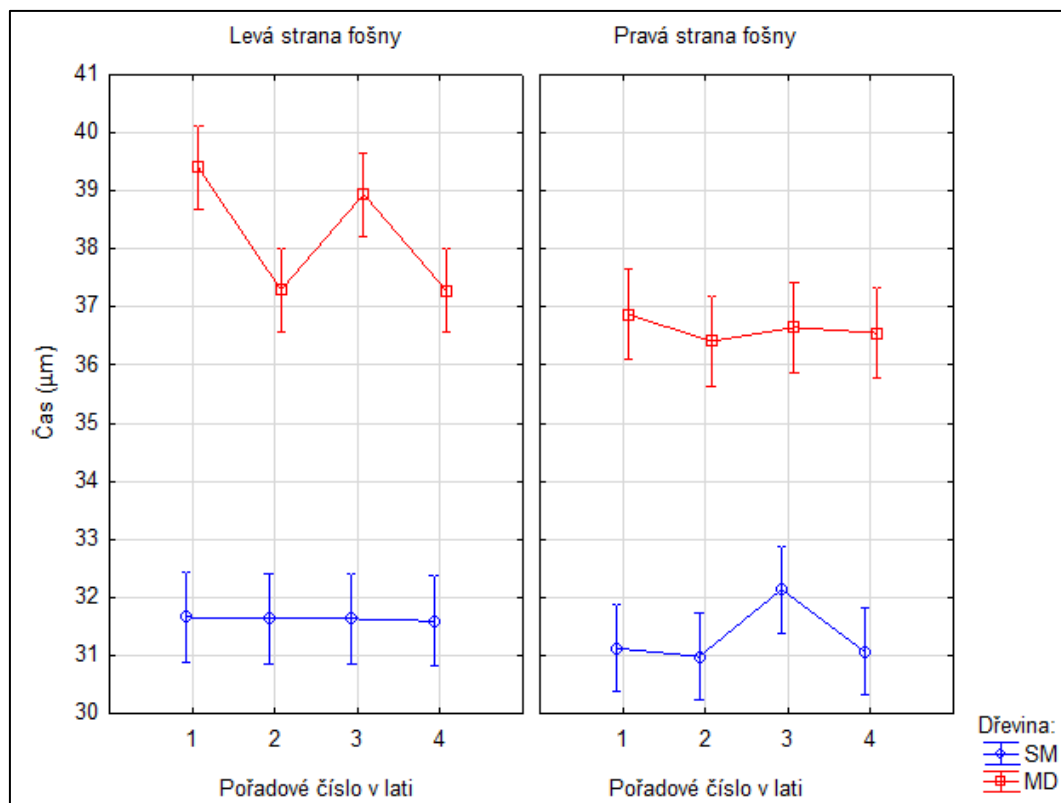
**Graf 2** Porovnání času průchodu v závislosti na straně fošny přiložením snímačů na čelní konce

V příložené tabulce 4 jsou znázorněny statistické hodnoty, ze kterých lze zjistit významnost vlivů faktorů na jednotlivé vlastnosti. V tabulce lze vidět faktory, které ovlivňují průchod ultrazvuku skrze materiál: strana fošny, druh dřeviny a pozice v lati.

**Tabulka 4** Statistické výsledky významnosti faktorů na čas průchodu ultrazvukové vlny z čel vzorků

	SS	degr. Of Freedom	MS	F	p
<b>Intercept</b>	2136319	1	2136319	39164,96	0,000000
<b>dřevina</b>	567	1	567	10,39	0,001385
<b>pořadové číslo v lati</b>	972	3	324	5,94	0,000580
<b>strana fošny</b>	2077	1	2077	38,08	0,000000
<b>dřevina/pořadové číslo v lati</b>	969	3	323	5,92	0,000597
<b>dřevina/strana fošny</b>	280	1	280	5,14	0,023967
<b>pořadové číslo v lati/strana fošny</b>	1075	3	358	6,57	0,000247
<b>dřevina/pořadové číslo v lati/strana fošny</b>	42	3	14	0,26	0,856029
<b>Error</b>	19637	360	55		

Měření za pomoci Fakoppu bylo použito i na měření času průchodu UZ vlny na ploše ve vzdálenosti 120 mm. Měření proběhlo na pozicích, které byly umístěny 60 mm na každou stranu od středu. Z výsledků tohoto měření byl vytvořen graf závislosti mezi jednotlivými částmi latí. Na grafu 3 byla do závislosti zařazena strana fošny a pořadí v lati. Dalším faktorem je zde i dřevina, která mezi sebou není porovnávána. Na pravé straně fošny je vidět výrazné snížení rozdílů oproti grafu 2, kde je odlišnost pouze u třetí části latě v pořadí u smrku. U modřínu je na pravé straně vidět, že vzorky v této části jsou identické a jejich rozdíly se dají zanedbat. Na levé straně lze pozorovat rozdílné hodnoty času průchodu u modřínu. U smrku jsou rozdíly mezi jednotlivými částmi takřka nulové. Po porovnání obou grafů se vlastnosti času průchodu vyrovnají.



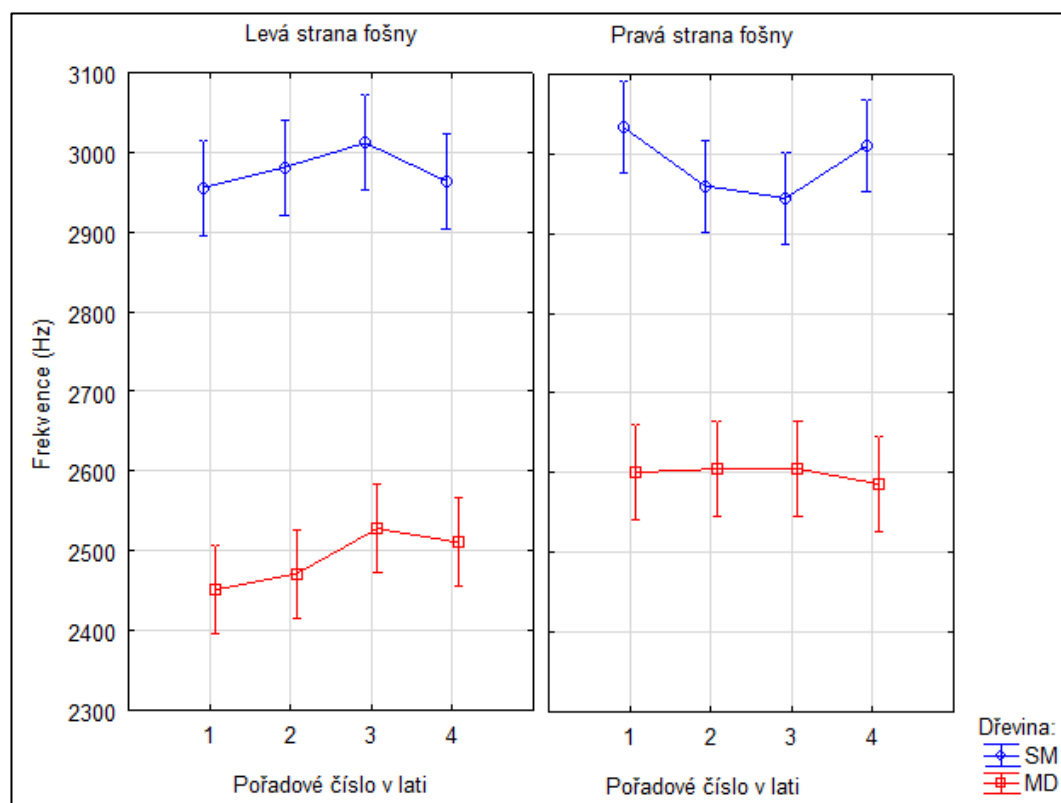
**Graf 3** Porovnání času průchodu v závislosti na straně fošny přiložením snímačů na plochu

Tabulka 5 znázorňuje statistické významnosti pro jednotlivé vlastnosti, které mohou ovlivňovat danou vlastnost a hodnoty naměřené v průběhu měření. Průchod ultrazvukové vlny skrze materiál při přiložení piezoelektrických snímačů ze statistického hlediska výrazně ovlivňuje dřevina, pořadové číslo v lati a strana fošny.

**Tabulka 5** Statistické výsledky významnosti faktorů na čas průchodu ultrazvukové vlny z plochy vzorků

	SS	degr. Of Freedom	MS	F	p
<b>Intercept</b>	444144,0	1	444144,0	128265,0	0,000000
<b>dřevina</b>	3310,5	1	3310,5	956,1	0,000000
<b>pořadové číslo v lati</b>	46,3	3	15,4	4,5	0,004319
<b>strana fošny</b>	85,6	1	85,6	24,7	0,000001
<b>dřevina/pořadové číslo v lati</b>	21,6	3	7,2	2,1	0,102785
<b>dřevina/strana fošny</b>	39,9	1	39,9	11,5	0,000761
<b>pořadové číslo v lati/strana fošny</b>	11,3	3	3,8	1,1	0,355842
<b>dřevina/pořadové číslo v lati/strana fošny</b>	29,9	3	10,0	2,9	0,035910
<b>Error</b>	1246,6	360	3,5		

Vzorky jsou po vyhodnocení této metody porovnatelné a lze říct, že jejich vlastnosti v průběhu latě jsou podobné. Zjištěním jejich paralelnosti jsou porovnatelné i další vlastnosti dřeva v této práci.



**Graf 4** Porovnání frekvence metodou zesilovače

Měření pomocí zesilovače probíhalo na vzorcích o délce 300 mm a měřila se frekvence po průchodu skrze tělesa. Při porovnání výsledků jsou rozdíly mezi jednotlivými vzorky malé. Modřínové vzorky lze považovat za ideální jak na pravé, tak na levé straně. Rozdíly u modřínových vzorků jsou takřka minimální, pouze na levé straně jsou vidět patrné rozdíly, které nám ale nikterak výsledky neovlivní, a to díky zvolené metodice. U smrkových vzorků jsou rozdíly výraznější, ale pro následné měření je tento rozdíl zanedbatelný. Smrkové latě vykazují vyšší hodnotu frekvence než modřínové, a to zřejmě z důvodu rozdílné stavby a množství látek obsažených ve dřevě. Z výsledků lze považovat vzorky za ideální a pro tento výzkum vhodné.

Faktory ovlivňující průchod vlny skrze vzorky ve směru vláken jsou vyznačeny v tabulce 6. Pořadové číslo v lati 1 a 2 je určeno na ohybovou zkoušku v rozdílných směrech, ale jejich rozdíl není statisticky významný. Číslo 3 a 4 je určené na rázovou houževnatost a jejich rozdíl je také statisticky nevýznamný na hladině významnosti 95 %.

**Tabulka 6** Statistické výsledky významnosti faktorů ovlivňující metodu zesilovače

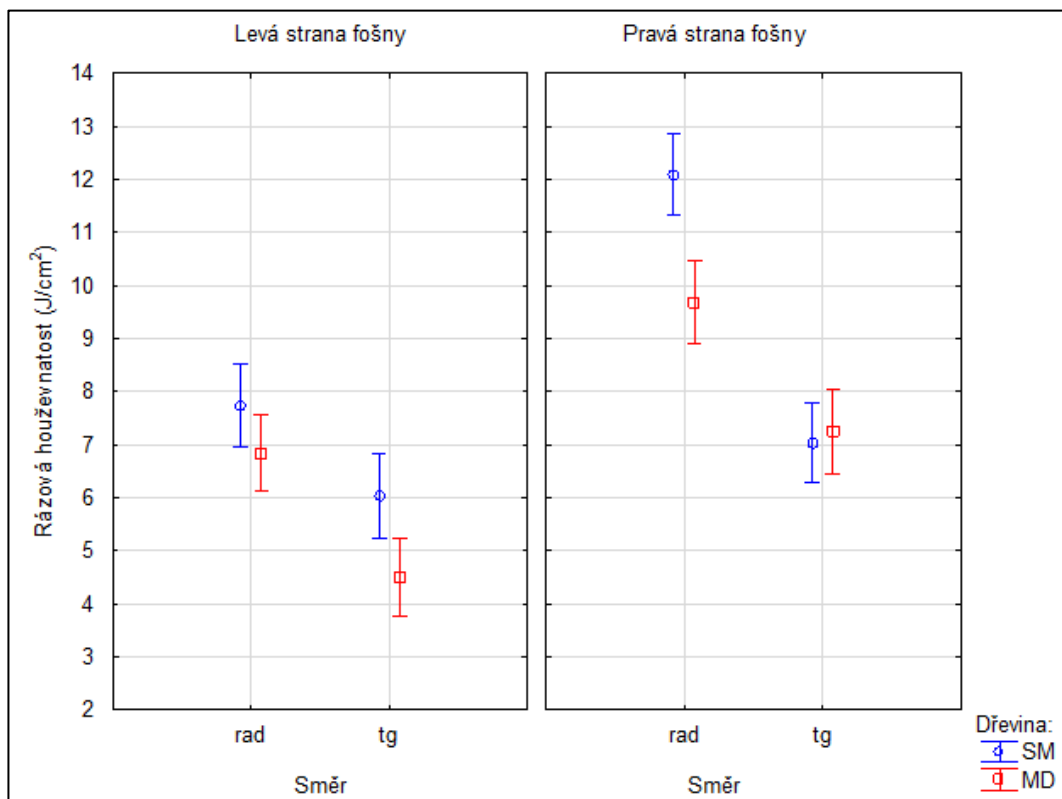
	SS	degr. Of Freedom	MS	F	p
<b>Intercept</b>	2,858109E+09	1	2,858109E+09	139083,3	0,000000
<b>strana fošny</b>	3,250981E+05	1	3,250981E+05	15,8	0,000084
<b>pořadové číslo v lati</b>	1,776878E+04	3	5,922925E+03	0,3	0,833904
<b>dřevina</b>	1,794147E+07	1	1,794147E+07	873,1	0,000000
<b>strana fošny*pořadové číslo v lati</b>	1,385755E+05	3	4,619184E+04	2,2	0,082451
<b>strana fošny*dřevina</b>	2,331631E+05	1	2,331631E+05	11,3	0,000838
<b>pořadové číslo v lati*dřevina</b>	3,843915E+04	3	1,281305E+04	0,6	0,600187
<b>strana fošny*pořadové číslo v lati*dřevina</b>	6,308807E+04	3	2,102936E+04	1,0	0,382277
<b>Error</b>	7,397863E+06	360	2,054962E+04		

## 5.2 Rázová houževnatost a ohybová pevnost

### Rázová houževnatost

Pro smrkové vzorky byla průměrná hodnota rázové houževnatosti vypočítána na  $10 \text{ J/cm}^2$  v radiálním směru. Tato hodnota je v porovnání s literaturou (Požgaj 1993) vyšší o  $4,2 \text{ J/cm}^2$ . Práce potřebná pro přeražení v tangenciálním směru byla nižší o  $3 \text{ J/cm}^2$ , což je hodnota  $6,5 \text{ J/cm}^2$ . Z rozdílů vypočítaných dat byl vypočten průměrný procentuální pokles mezi radiálním a tangenciálním směrem, který činí 34,6 %. Hodnota procentuálního poklesu je s porovnanou literaturou (Tsoumis 1991) takřka totožný. Zdroje uvádí 30 % pokles mezi jednotlivými směry.

Hodnoty u smrkových vzorků ve srovnávané literatuře (Tsoumis 1991) jsou výrazně nižší, v radiálním směru je to hodnota  $5,1 \text{ J/cm}^2$  a v tangenciálním  $3,1 \text{ J/cm}^2$ . Tento rozdíl u smrku může být ovlivněn strukturou vzorků ve srovnávaném zdroji.



Graf 5 Rázová houževnatost

V radiálním směru u modřínového dřeva byla hodnota rázové houževnatosti vypočítána na  $8,1 \text{ J/cm}^2$  a v tangenciálním  $5,8 \text{ J/cm}^2$ . Z rozdílů mezi jednotlivými

směry byl vypočítán procentuální pokles, jenž byl stanoven na 29,3 %. Tato hodnota byla porovnána s dostupnou literaturou (Požgaj 1993) a v práci je hodnota výrazně nižší a to o 20,7 %, což je výrazný rozdíl. V literatuře byl uveden pokles z radiálního na tangenciální směr o 50 %. Tento rozdíl je možné charakterizovat rozdílnou stavbou dřeviny oproti dřevině použité k vyhodnocování v porovnávaných zdrojích. Další srovnávaná literatura (Tsoumis 1991) uvádí hodnoty u modřínového dřeva v radiálním 9,6 J/cm<sup>2</sup> a v tangenciálním směru 5,9 J/cm<sup>2</sup>. Modřínové hodnoty jsou podobné jako v této práci s minimálními rozdíly. Rozdíl mezi jednotlivými směry může být ovlivněn rozložením síly, která by se mohla šířit v různých směrech odlišně. Také tuto vlastnost může ovlivňovat anatomická stavba dřeva. Dřevo je materiál, který je tvořen jednotlivými vrstvami a z tohoto důvodu je možné, že dřevo při rázovém zatížení působí jako lamela, která je složená z více vrstev a ty mezi sebou spolupůsobí a roznášejí zatížení.

Práci potřebnou pro přeražení tělesa ovlivňují jednotlivé vlastnosti dřeva, jako je vlhkost, hustota a další. Výrazným faktorem, který také ovlivňuje výslednou hodnotu práce potřebnou pro přeražení tělesa, je výskyt růstových vad i vad vzniklých při zpracování dřeva (například výsušné trhliny).

Ze statistických výsledků lze vyvodit závěr, že na tuto vlastnost má statistický význam zejména směr zatížení. Tento rozdíl byl očekáván a je ovlivněn stavbou dřeva a jeho schopností pohlcovat práci potřebnou pro přeražení tělesa.

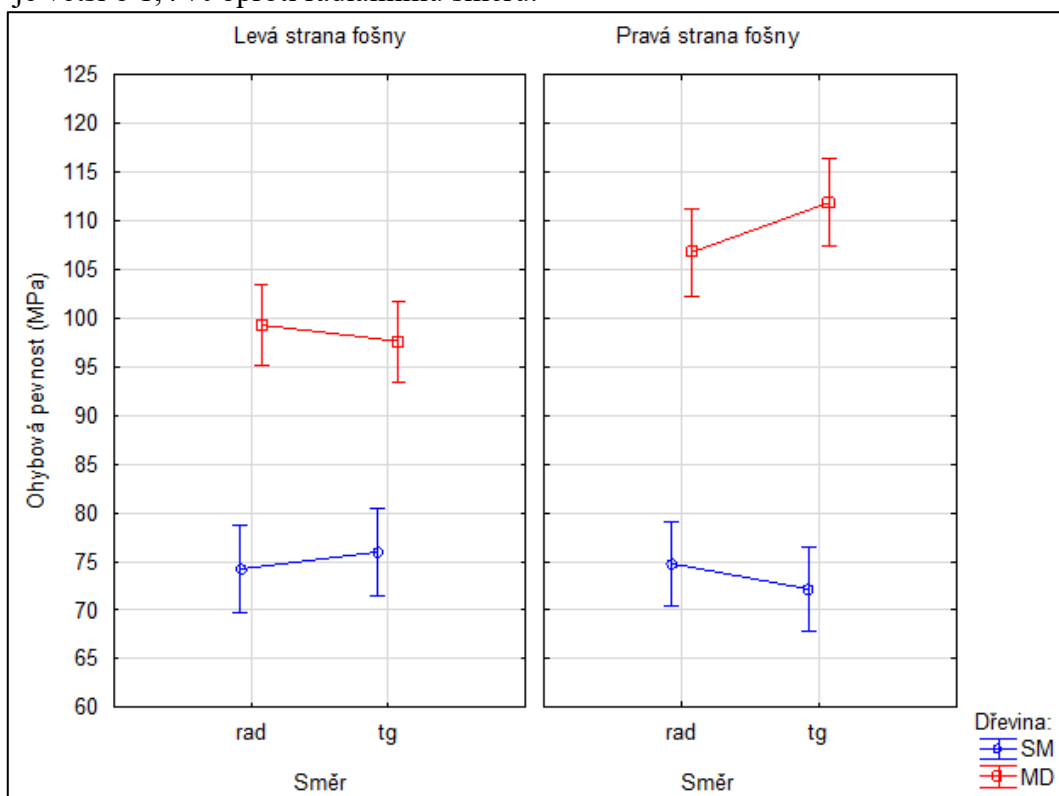
**Tabulka 7** Statistické výsledky významnosti faktorů ovlivňující rázovou houževnatost

	SS	degr. Of Freedom	MS	F	p
<b>Intercept</b>	10928,2	1	10928,2	3109,9	0,000000
<b>dřevina</b>	62,7	1	62,7	17,8	0,000038
<b>strana fošny</b>	348,6	1	348,6	99,2	0,000000
<b>směr</b>	390,8	1	390,8	111,2	0,000000
<b>dřevina*strana fošny</b>	0,2	1	0,2	0,0	0,833291
<b>dřevina*směr</b>	11,6	1	11,6	3,3	0,070852
<b>strana fošny*směr</b>	34,8	1	34,8	9,9	0,001920
<b>dřevina*strana fošny*směr</b>	30,8	1	30,8	8,8	0,003494
<b>Error</b>	632,5	180	3,5		

## Vyhodnocení ohybové pevnosti

Ohybová pevnost byla vypočítána ze získaných dat v průběhu měření. Měření probíhalo na vzorcích ve dvou směrech, v radiálním a tangenciálním. Následně výsledky byly porovnány mezi sebou tak, abychom prokázali, zdali existuje rozdíl mezi radiálním a tangenciálním směrem. Literatura (Požgaj 1993) uvádí, že u jehličnatých dřevin je při tangenciálním ohybu mez pevnosti o 10-12 % vyšší než u radiálního ohybu.

Výsledné vypočítané hodnoty byly zprůměrovány a jsou 74,5 MPa v radiálním směru a v tangenciálním 74 MPa. Rozdíl mezi jednotlivými směry u smrku je pouhých 0,7 %, což ne zcela odpovídá hodnotám v porovnávané literatuře (Požgaj 1993). Také uváděné hodnoty jsou odlišné (literatura uvádí v radiálním směru 70,4 MPa a v tangenciálním 72,9 MPa), rozdílnost hodnot může být zapříčiněna rozdílnou anatomickou stavbou vzorků použitých v této diplomové práci. Modřínové vzorky vykazovaly opačný pokles průměrné hodnoty v rozdílných směrech. V radiálním směru byla hodnota vypočítána na 102,7 MPa a v tangenciálním na 104,1 MPa. Hodnota ohybové pevnosti v tangenciálním směru je větší o 1,4 % oproti radiálnímu směru.



Graf 6 Ohybová pevnost



V příložené tabulce 8 jsou uvedeny statistické hodnoty pro ohybovou pevnost. Ze statistických výsledků lze prohlásit, že rozdíl mezi jednotlivými směry je statisticky nevýznamný. Rozdíl je pouze na pravé straně fošny u modřínu.

**Tabulka 8** Statistické výsledky významnosti faktorů ohybové pevnosti

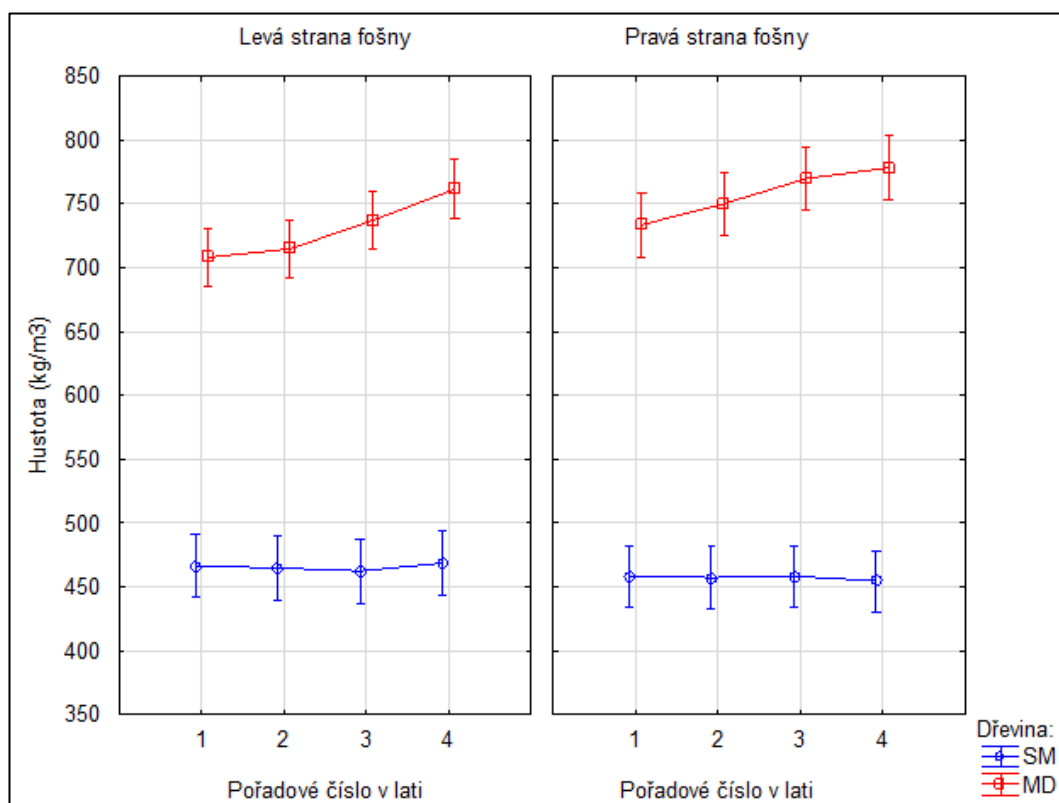
	SS	degr. Of Freedom	MS	F	p
<b>Intercept</b>	1484850,0	1	1484850,0	130485,6	0,000000
<b>směr</b>	19,0	1	19,0	0,2	0,683928
<b>strana fošny</b>	997,0	1	997,0	8,8	0,003501
<b>dřevina</b>	40932,0	1	40932,0	359,6	0,000000
<b>směr*strana fošny</b>	17,0	1	17,0	0,2	0,700212
<b>směr*dřevina</b>	55,0	1	55,0	0,5	0,489059
<b>strana fošny*dřevina</b>	1821,0	1	1821,0	16,0	0,000092
<b>směr*strana fošny*dřevina</b>	360,0	1	360,0	3,2	0,076981
<b>Error</b>	20488,0	180	114,0		

## 5.3 Doprovodné vlastnosti

### Vyhodnocení hustoty

Zjišťování hustoty probíhalo za laboratorních podmínek dle normy ČSN 49 0108 na všech vzorcích určených na mechanické zkoušky. Hustota je významně ovlivňována stavbou dřeva, šířkou letokruhů, podílem letního dřeva, podmínkami růstu apod. Hustota pro smrkové vzorky byla vypočítána na hodnotu  $457 \text{ kg/m}^3$  což je v porovnání s literaturou (Tsoumis 1991) odpovídající hodnota, literatura uvádí hustotu smrku na  $440 \text{ kg/m}^3$ .

U modřínových vzorků byla hustota stanovena na  $734 \text{ kg/m}^3$ , což je výrazně vyšší hodnota oproti porovnávané literatuře (Požgaj 1993), která udává hodnotu  $600 \text{ kg/m}^3$ . Vzorky v práci mají hustotu vyšší o  $134 \text{ kg/m}^3$ , což je ovlivněno podílem letního dřeva, který je vyhodnocen v následující kapitole a anatomickou stavbou modřínového dřeva. V přiloženém grafu 7 je hustota znázorněna jak na pravé straně fošny, tak na levé a lze odvodit, že u modřínových vzorků je hustota nižší na levé straně oproti straně pravé.



Graf 7 Graf hustoty

V přiložené tabulce 9 jsou uvedeny statistické hodnoty potřebné pro vyhodnocení, a také faktory ovlivňující hustotu ve vzorcích. Významným faktorem ovlivňujícím hustotu je pořadové číslo v lati u modřínových vzorků, směrem od spodní části fošny (od kořenové části) se hustota u modřínu zvyšovala. Dvojice pro statickou a dynamickou zkoušku mezi sebou nemají významný statistický rozdíl. U smrku jsou všechny vzorky se stejnou hustotou a jejich rozdíly nejsou statisticky významné.

**Tabulka 9** Statistické hodnoty významnosti faktorů při vyhodnocování hustoty

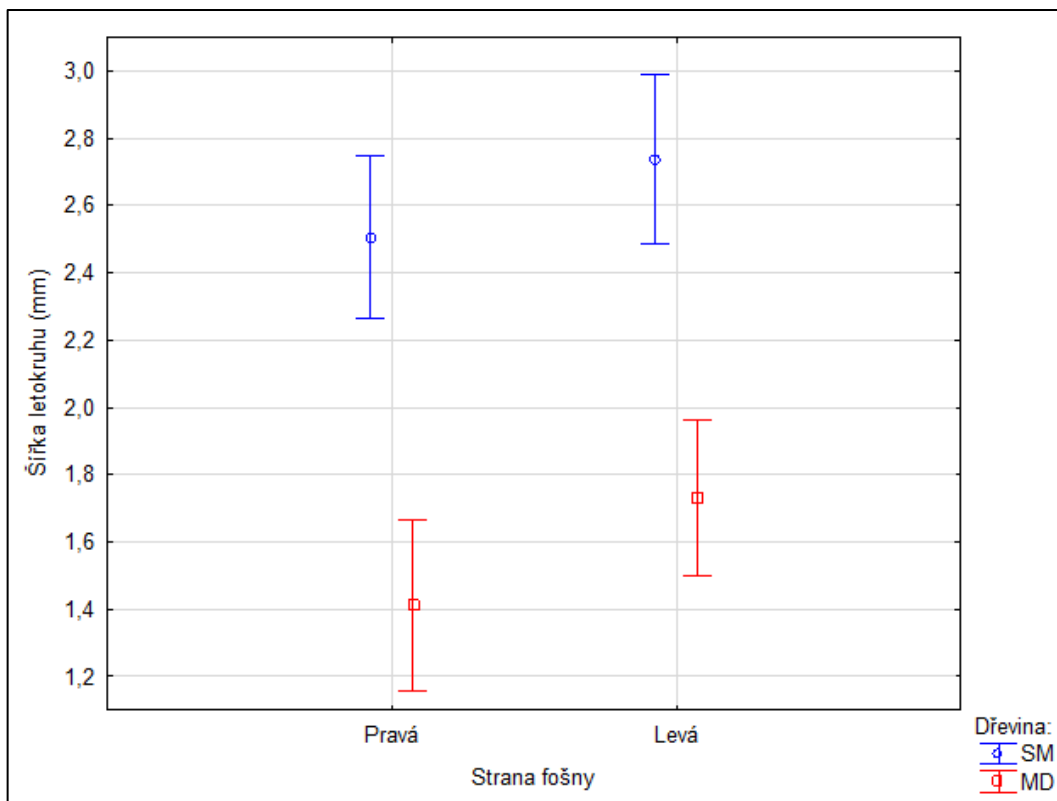
	SS	degr. Of Freedom	MS	F	p
<b>Intercept</b>	135977705	1	135977705	38166,86	0,000000
<b>pořadové číslo v lati</b>	32335	3	10778	3,03	0,029615
<b>dřevina</b>	7476382	1	7476382	2098,51	0,000000
<b>strana fošny</b>	8558	1	8558	2,40	0,122049
<b>pořadové číslo v lati*dřevina</b>	34542	3	11514	3,23	0,022490
<b>pořadové číslo v lati*strana fošny</b>	2544	3	848	0,24	0,869813
<b>dřevina*strana fošny</b>	30427	1	30427	8,54	0,003693
<b>pořadové číslo v lati*dřevina*strana fošny</b>	462	3	154	0,04	0,988047
<b>Error</b>	1282578	360	3563		

## Vyhodnocení šířky letokruhů

Šířka letokruhu se stanovila na průměrnou hodnotu u každé zkoumané dřeviny tak, aby se výsledné hodnoty daly porovnat s daty v literatuře. U smrkových vzorků byla průměrná hodnota 2,6 mm, což je v porovnání s dostupnými zdroji (Požgaj 1993) vyšší hodnota o 0,2 mm, což může být způsobeno rozdílnou stavbou, stanovištěm růstu atd. Letní dřevo v šířce letokruhu bylo pro porovnání vyjádřeno v procentech, u smrku byla tato hodnota stanovena na 16,2 %, oproti literatuře (Požgaj 1993) je tato hodnota nižší o 1,6 %. Tento poznatek šířky letokruhu a podílu letního dřeva může značně ovlivňovat hodnoty jednotlivých zkoušek. Letní dřevo určuje z velké části konečné mechanické vlastnosti masivního dřeva. Na přiloženém grafu 9 je znázorněno, jaký je rozdíl v průměrné šířce letokruhu na pravé a levé straně. Lze vidět, že na pravé straně fošny je hodnota mírně nižší.

Modřínové vzorky měly šířku letokruhu o poznání menší než u smrkové z důvodu pomalejšího růstu modřínu. Hodnota šířky letokruhu byla v průměrné hodnotě stanovena na 1,6 mm, v porovnání s literaturou (Požgaj 1993) se jedná o výrazně nižší hodnotu a to o 3,7 mm což je výrazný rozdíl. Podíl letního dřeva v porovnávané literatuře není stanoven, ale u modřínových vzorků použitých v této práci je stanoven na 27,9 %, a to je o poznání více než u smrku. Na grafu 8 jsou

vyznačeny intervaly, ve kterých se pohybuje 95 % hodnot zjištěných měření. Jde vidět, že na pravé straně je šířka letokruhu mírně nižší, což může být způsobeno namáháním stromu na stanovišti růstu.



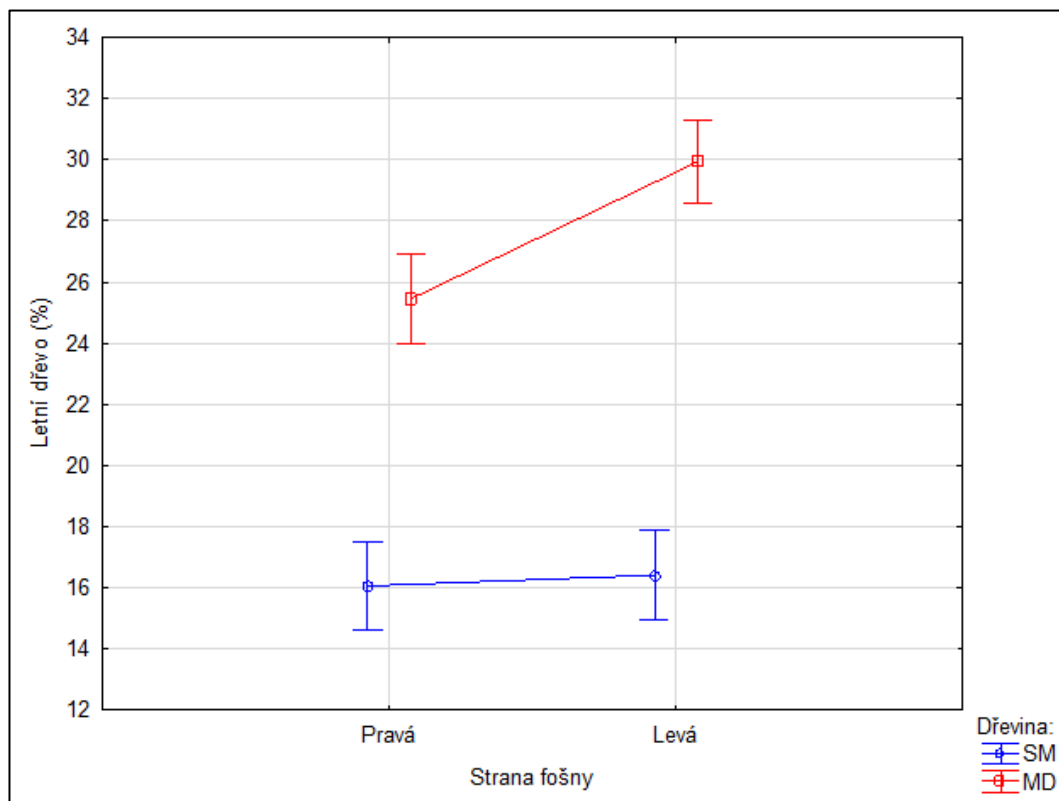
**Graf 8** Vyhodnocení šířky letokruhů

V příložené tabulce 10 jsou červeně zvýrazněny významné faktory ovlivňující šířku letokruhů. Významný faktor ovlivňující velikost letokruhu je druh dřeviny i strana fošny, která je ovlivňována při růstu stromu jeho namáháním.

**Tabulka 10** Statistické vyhodnocení významnosti faktorů šířky letokruhů

	SS	degr. Of Freedom	MS	F	p
<b>Intercept</b>	411,1345	1	411,1345	1158,634	0,00000
<b>dřevina</b>	25,7706	1	25,7706	72,625	0,00000
<b>strana fošny</b>	1,7976	1	1,7976	5,066	0,02684
<b>dřevina*strana fošny</b>	0,0452	1	0,0452	0,127	0,72206
<b>Error</b>	31,9360	90	31,9360		

Šířky letokruhů a podíly letního dřeva jsou velmi důležité poznatky ve stavbě dřeva, díky jejich významnému vlivu na mechanické vlastnosti. Významné jsou zejména pro jehličnany z důvodu jejich stavby. Jejich šířku a podíly jednotlivých částí výrazně ovlivňují podmínky růstu dřeviny na stanovišti. Smrkové dřevo použité v práci zřejmě rostlo v monokultuře určené k rychlému růstu. Modřínové dřevo nejspíše rostlo na stanovišti s velkým namáháním a změnami podmínek. Na přiloženém grafu 9 jsou vyznačeny intervaly, ve kterých se pohybují procentuální hodnoty podílu letního dřeva v závislosti na straně fošny. Smrkové vzorky vykazují téměř stejné hodnoty, oproti tomu je u modřínových znatelný rozdíl mezi pravou a levou stranou. U modřínu je na levé straně podíl letního dřeva výrazně vyšší, což je s největší pravděpodobností ovlivněno podmínkami růstu stromu na stanovišti.



**Graf 9** Podíl letního dřeva

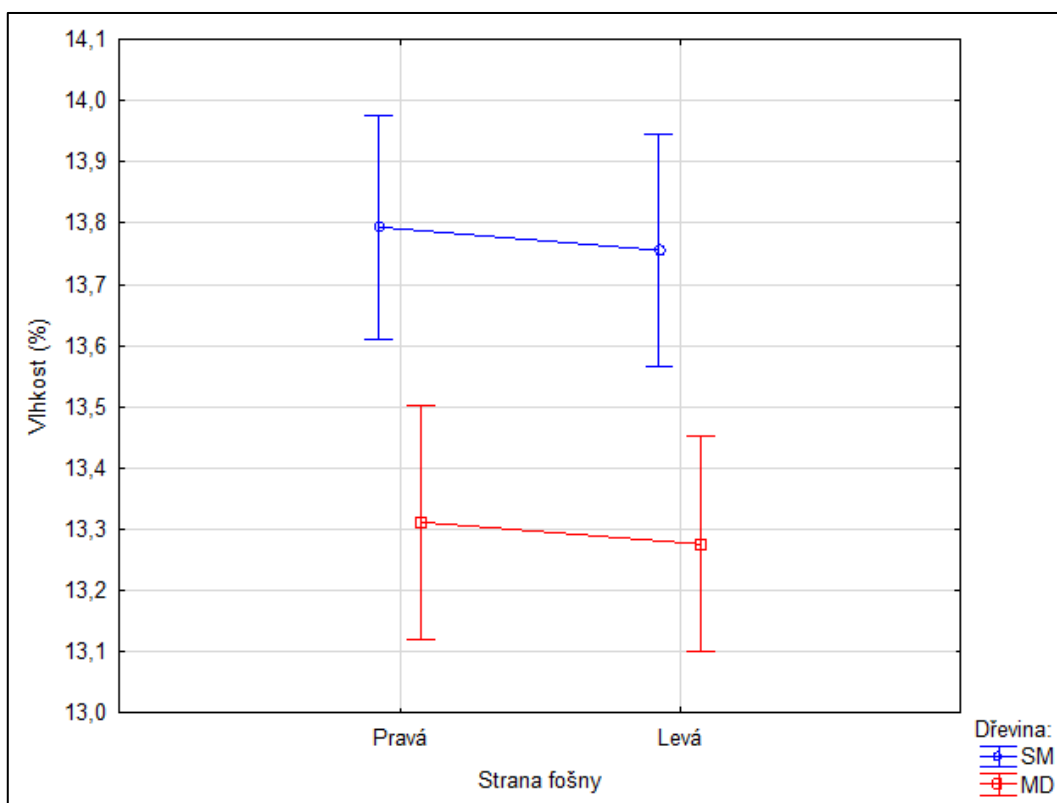
Výsledky zpracované statistickými metodami jsou vyjádřeny v tabulce 11. Tabulka uvádí statistické výsledky významnosti faktorů ovlivňující podíl letního dřeva. Letní dřevo ovlivňuje dřevina a u modřínu i strana fošny, což je způsobeno stavbou modřínového dřeva.

**Tabulka 11** Statistické výsledky významnosti faktorů podílu letního dřeva

	SS	degr. Of Freedom	MS	F	p
Intercept	45135,08	1	45135,08	3674,678	0,000000
dřevina	3066,28	1	3066,28	249,638	0,000000
strana fošny	136,70	1	136,70	11,129	0,001236
dřevina*strana fošny	99,97	1	99,97	8,139	0,005375
Error	1105,46	90	12,28		

## Vyhodnocení vlhkosti

Vzorky byly před měřením naklimatizovány na laboratorní podmínky 65 % vzdušné vlhkosti a 20 °C, tak abychom dosáhly odpovídajících podmínek pro měření a následné porovnávání s literaturou. Vlhkost dřeva je na přiloženém grafu 10. U modřínových vzorků byla vlhkost vypočítána na průměrných 13,3 % a u smrkových vzorků byla vypočítána na 13,8 %. Tyto hodnoty byly vypočítány dle vzorce určeného na výpočet vlhkosti dřeva.



**Graf 10** Vlhkost znázorněna

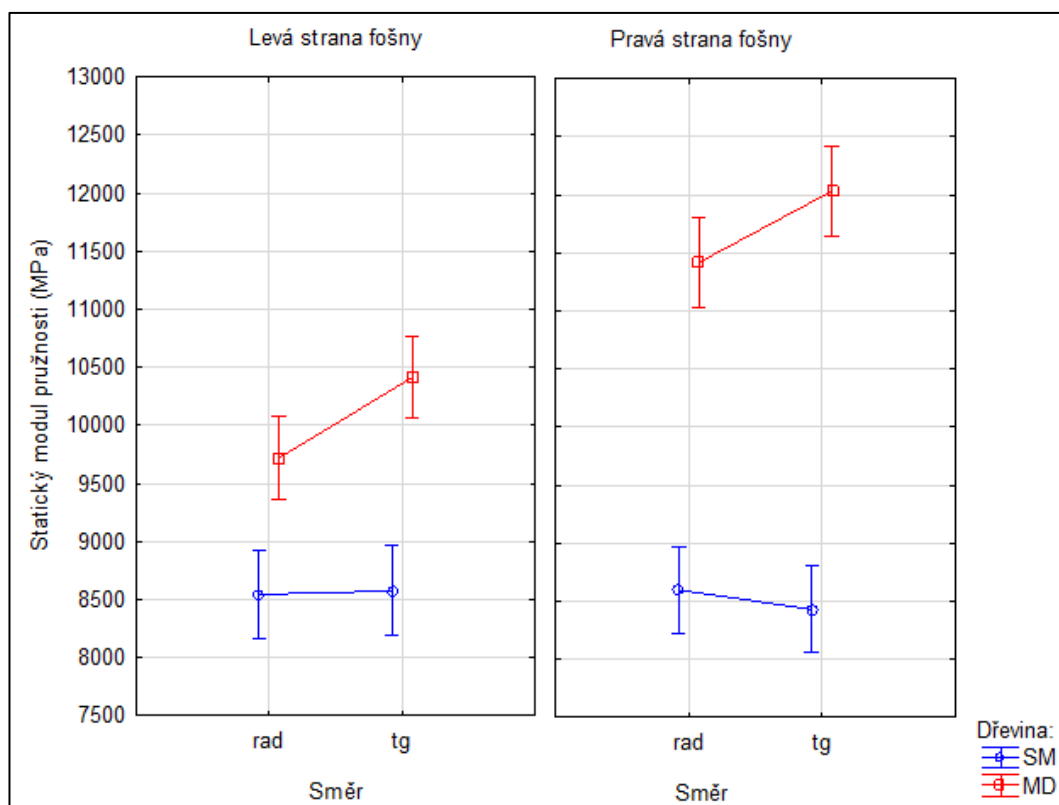
Faktory ovlivňující vlhkost ve dřevě jsou vyjádřeny v tabulce 12. Níže jsou uvedeny významnosti, ze kterých lze určit jaký faktor má vliv na tuto veličinu.

**Tabulka 12** Statistické výsledky významnosti faktorů vlhkosti dřeva

	SS	degr. Of Freedom	MS	F	p
<b>Intercept</b>	17135,15	1	17135,15	84622,70	0,000000
<b>dřevina</b>	5,40	1	5,40	26,68	0,000001
<b>strana fošny</b>	0,03	1	0,03	0,16	0,692840
<b>dřevina*strana fošny</b>	0,00	1	0,00	0,00	0,989801
<b>Error</b>	18,22	90	0,20		

### Vyhodnocení statického modulu pružnosti

Z dat získaných v průběhu měření, byla vypočítána hodnota statického modulu pružnosti. Statický modul pružnosti byl vypočítán pomocí vzorce určeného na výpočet při tříbodovém ohybu. Výsledné hodnoty byly také porovnány v jednotlivých směrech. V radiálním směru u smrku byla ohybová pevnost 8 572 MPa a v tangenciálním 8 499 MPa. Mezi hodnotami jednotlivých směrů byl vypočítán procentuální pokles z radiálního na tangenciální směr, který činil 0,9 %. Procentuální rozdíl neprokázal při statickém modulu pružnosti významný rozdíl. U modřínových vzorků byla vypočítána hodnota statického modulu pružnosti na 10 497 MPa v radiálním směru a 11 154 MPa v tangenciálním. Procentuální rozdíl mezi jednotlivými směry vyšel v opačném trendu než u smrku. Procentuální rozdíl byl 6,3 % z tangenciálního směru na radiální.



**Graf 11** Statický modul pružnosti

Statistické vyhodnocení výsledků je uvedeno v tabulce 13, kde jsou znázorněny významnosti jednotlivých faktorů na vlastnosti. Na statický modul pružnosti má statistický význam směr, strana fošny i dřevina.

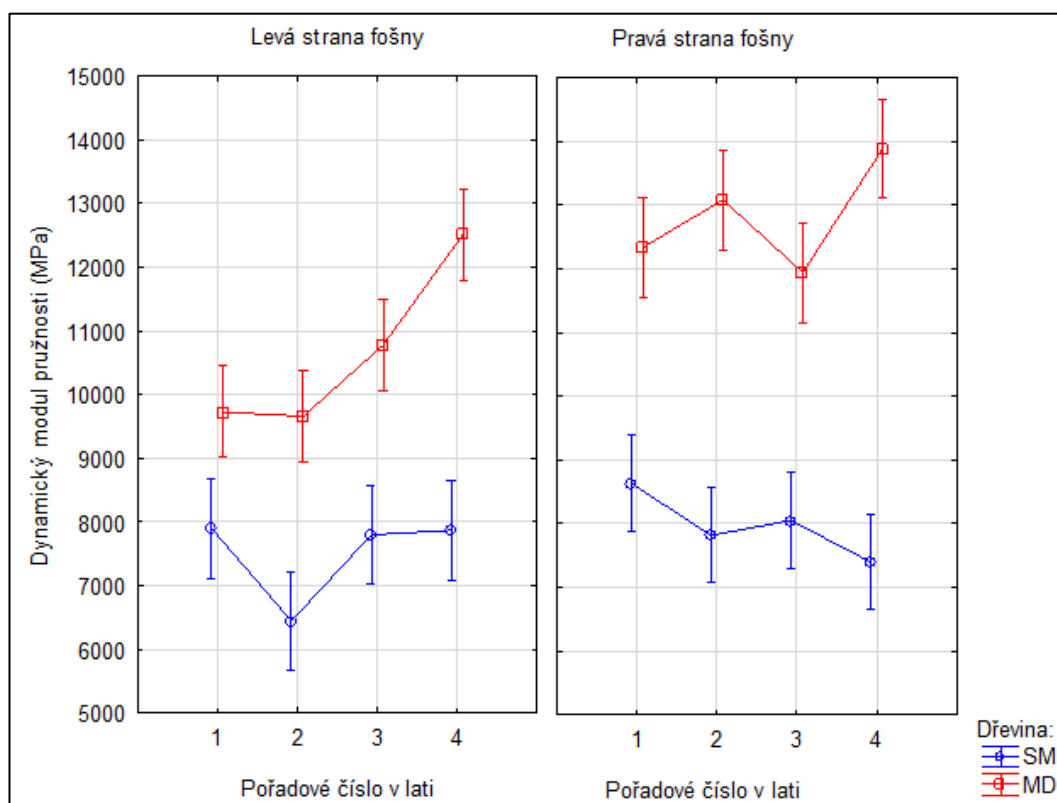
**Tabulka 13** Statistické výsledky významnosti faktorů ovlivňující statický modul pružnosti

	SS	degr. Of Freedom	MS	F	p
<b>Intercept</b>	1766019E+10	1	1766019E+10	20957,9	0,000000
<b>strana fošny</b>	3,034090E+07	1	3,034090E+07	36,0	0,000000
<b>dřevina</b>	2,602158E+08	1	2,602158E+08	308,8	0,000000
<b>směr</b>	4,002287E+06	1	4,002287E+06	4,8	0,030603
<b>strana fošny*dřevina</b>	3,391075E+07	1	3,391075E+07	40,2	0,000000
<b>strana fošny*směr</b>	2,166984E+05	1	2,166984E+05	0,3	0,612697
<b>dřevina*směr</b>	6,106539E+06	1	6,106539E+06	7,3	0,007773
<b>strana fošny*dřevina*směr</b>	4062473E+04	1	4062473E+04	0,1	0,826456
<b>Error</b>	1,516775E+08	180	1,516775E+08		



## Vyhodnocení dynamického modulu pružnosti

Data získaná z měření paralelnosti vzorků byla použita pro výpočet dynamického modulu pružnosti. Tento modul je vypočítán z hodnot získaných při měření metodou Fakopp přikládáním piezoelektrických snímačů na plochu vzorků tak, aby bylo možno mezi sebou porovnat radiální a tangenciální směr dřeva. U smrku ztepilého byla hodnota vypočítána v radiální směru na 7 747 MPa a v tangenciálním směru na 7 573 MPa. Rozdíl mezi jednotlivými směry v procentech byl vypočítán na 2,2 % z radiálního na tangenciální směr. Literatura (Požgaj 1993) uvádí velikost dynamického modulu v tangenciálním směru na 8 210 MPa, což je vyšší hodnota, která může být způsobena rozdílnou anatomickou stavbou. Modřínové vzorky byly vyhodnoceny na hodnotu v radiálním směru na 11 155 MPa a v tangenciálním směru 11 896 MPa. V procentech je tento rozdíl 6,6 % z tangenciálního na radiální směr. Literatura (Požgaj 1993) uvádí velikost dynamického modulu v tangenciálním směru na 8 273 MPa, a to je hodnota výrazně nižší. Tento rozdíl může být ovlivněn podílem letního dřeva, či rozdílnou anatomickou stavbou u vzorků použitých v této diplomové práci.



Graf 12 Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti byl vyhodnocen za pomoci statistiky a výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 14. Z tabulky hodnot je patrné, že na dynamický modul pružnosti má statisticky významný vliv strana fošny, pořadové číslo i dřevina.

**Tabulka 14** Statistické výsledky významnosti faktorů ovlivňující dynamický modul pružnosti

	SS	degr. Of Freedom	MS	F	p
<b>Intercept</b>	3,550972E+10	1	3,550972E+10	10253,1	0,000000
<b>dřevina</b>	1,497733E+09	1	1,497733E+09	432,5	0,000000
<b>pořadové číslo v lati</b>	6,698850E+07	3	6,698850E+07	6,5	0,000291
<b>strana fošny</b>	1,596767E+08	1	1,596767E+08	46,1	0,000000
<b>dřevina*pořadové číslo v lati</b>	1,020581E+08	3	1,020581E+08	9,8	0,000003
<b>dřevina*strana fošny</b>	6,537858E+07	1	6,537858E+07	18,9	0,000018
<b>pořadové číslo v lati*strana fošny</b>	5,646479E+07	3	5,646479E+07	5,4	0,001152
<b>dřevina*pořadové číslo v lati*strana fošny</b>	4,680906E+06	3	4,680906E+06	0,5	0,717083
<b>Error</b>	1,246800E+09	360	1,246800E+09		

V příloze 1 je na grafu znázorněna závislost mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti. Korelační koeficient vyšel  $r=0,7425$  což je poměrně silná a uspokojivá závislost mezi těmito veličinami.

## 6 ZÁVĚR

V diplomové práci byla zjišťována závislost rozdílů mezi dvěma směry namáhání (tangenciálním a radiálním směrem). Výsledky různých měření byly vyhodnoceny a zpracovány v kapitole výsledky a diskuze. V této kapitole se zjištěné hodnoty porovnály s dostupnou literaturou pro závěrečné vyjádření k danému řešenému tématu. U řešené tematiky byla vypsána výsledná hodnota pro oba směry a také jejich procentuální rozdíl.

V práci se zjišťovala také paralelnost všech vzorků tak, aby bylo dosaženo co možná nejvíce podobných vlastností jednotlivých částí určených k měření. Posuzovala se anatomická stavba vzorků a ze zjištěných dat bylo vyhodnoceno, že tělesa mají podobné vlastnosti v porovnávaných částech a z toho důvodu jsou vhodné pro porovnávání rozdílů mezi zkoumanými směry. Struktura jednotlivých vzorků byla odpovídající a díky tomu mohly být použity pro jednotlivé zkoušky a jejich následné posuzování rozdílů mezi směry. Již při výrobě vzorků byl kladen důraz na ideální strukturu z pozice kolmosti letokruhů na radiální plochu. Díky využití jedné fošny bylo dosaženo podobnosti vlastností u jednotlivých vzorků podle pořadí v jednotlivých latích.

U mechanických zkoušek bylo posuzováno rázové a statické zatížení vzorků na rozdílných plochách i směrech. Výsledky statických a dynamických vlastností byly vyhodnoceny v kapitole výsledky a diskuze. Z výsledných dat byl vypočítán procentuální pokles z radiálního na tangenciální směr pro rázovou houževnatost, který činil 34,6 % pro smrkové dřevo a 29,3 % pro modřínové dřevo. Dále byl vypočítán procentuální rozdíl pro ohybovou pevnost z radiálního na tangenciální směr, který byl 0,7 % u smrku a -1,4 % u modřínu, tento rozdíl je takřka zanedbatelný na rozdíl od ohybové pevnosti. Z výsledků byly vyvozeny závěry k jednotlivým zkouškám na základě statistického porovnání. Dále jsou zde uvedeny výsledky získané z odborné literatury. Z výsledků byl vyvozen závěr, že rozdíl mechanických vlastností v jednotlivých směrech je statisticky významný pouze u rázového zatížení, což může ovlivňovat využití dřeva. Lepší odolnost proti rázu prokázal radiální směr u obou dřevin, a to jak u modřínu opadavého, tak u smrku

ztepilého. Při zatížení rázem je možné, že dřevo funguje jako lamela, která je tvořena jednotlivými vrstvami jarního a letního dřeva, při čemž jsou vlivem růstu spojeny jednotlivé vrstvy pevně k sobě. Letní dřevo funguje jako mechanická část a jarní dřevo plní funkci lepidla jednotlivých vrstev. U statického zatížení v porovnávaných směrech nebyla prokázána významná odchylka mezi jednotlivými směry.

Pro praktické použití má tato diplomová práce význam ve zjištění mechanických vlastností při určitém typu namáhání. Práce potvrdila fakt, že orientace dřeva vůči zatížení hraje roli hlavně u rázového zatížení. Tento poznatek lze využívat při navrhování konstrukcí namáhaných rázem, jako jsou dřevěná svodidla podél silnic, sportovní náčiní, násady ručního nářadí nebo v dalších konstrukcích s častým výskytem tohoto typu namáhání. U statického namáhání nebyl prokázán statistický význam rozdílu mezi vlastnostmi a z toho vyplývá, že u konstrukcí, které jsou pouze staticky zatížené není potřeba řešit orientaci nosného prvku ze dřeva vzhledem ke směru zatížení, ovlivněného pouze čelním průřezem a jeho orientací ke směru zatěžující síly.

V práci jsou uvedeny hodnoty pro vybrané mechanické zkoušky. Tyto tabulky hodnot mohou být také využity pro další práce, se kterými se dají porovnávat. V příložených tabulkách jsou statistické výsledky významnosti faktorů, které ovlivňují vlastnosti dřeva.

# ZDROJE

## Literatura:

1. BORŮVKA, Vlastimil a Marian BABIAK. *Vlastnosti dřeva v příkladech*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2016. ISBN 978-80-213-2618-7.
2. BUCUR, Voichita, T. E. TIMELL a R. WIMMER. *Acoustics of wood*. 2nd ed. Berlin: Springer, c2006. Springer series in wood science. ISBN 978-3-540-26123-0.
3. BUCUR, Voichita. Wood structural anisotropy estimated by acoustic invariants. *IAWA journal*, 1988, 9.1: 67-74.
4. COLAKOGLU, M. H. Determination of bending strength elongation in bending screw withdrawal strength and swelling in thickness of some panels. *Journal of Applied Sciences*, 2009, 9.22: 4061-4065.
5. ČUNDERLÍK, Igor. *Štruktúra dreva*. I.-2009. Zvolen: Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 2009. ISBN 978-80-228-2061-5.
6. DE OLIVEIRA, Fabiana Goia Rosa; SALES, Almir. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresource Technology*, 2006, 97.18: 2443-2446.
7. DESLAURIERS, Annie; MORIN, Hubert; BEGIN, Yves. Cellular phenology of annual ring formation of *Abies balsamea* in the Quebec boreal forest (Canada). *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33.2: 190-200.
8. DIETSCH, Philipp, et al. Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2015, 5.2: 115-127.
9. DINWOODIE, J. M. *Timber, its nature and behaviour*. 2nd ed. London: E & FN Spon, 2000. ISBN 0419255508.
10. DUBOVSKÝ, Ján, Marián BABIAK a Igor ČUNDERLÍK. *Textúra, štruktúra a úžitkové vlastnosti dreva.n: Návodý na cvičenia pre I. ročník Priemyselného designu nábytku*. 1. ZVOLEN: TECHNICKÁ UNIVERZITA, 1992.

11. DVOŘÁK, Petr. *Způsoby stanovení modulu pružnosti v tahu*. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. František Tatiček, Ph.D.
12. FONSELIUS, Mikael; RIIPOLA, Kirsti. Determination of fracture toughness for wood. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118.7: 1727-1740.
13. GERHARDS, C. C. Effects of type of testing equipment and specimen size on toughness of wood. Forest Products Laboratory, 1968.
14. GOODMAN, James R.; BODIG, Jozsef. Orthotropic elastic properties of wood. *Journal of the Structural Division*, 1970, 96.11: 2301-2319.
15. GREEN, David W.; WINANDY, Jerrold E.; KRETSCHMANN, David E. Mechanical properties of wood. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL; GTR-113: Pages 4.1-4.45, 1999, 113.
16. GUAN, Chunyu, et al. *Construction of genetic linkage maps of larch (*Larix kaempferi* × *Larix gmelini*) by RAPD markers and mapping of QTLs for larch*. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2011, 25.1: 2197-2202.
17. HANIKO, Adéla. *Anatomická studie dřeva modřínu opadavého a modřínu sibiřského*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Hanuš Vavrčík, Ph.D.
18. HOLTMEIER, Friedrich-Karl. European larch in middle Europe with special reference to the central alps. *Ecology and Management of Larix Forests: A Look Ahead*. General Technical Report, GTR-INT-319. USDA, Forest Serv., Intermountain Research Sta, 1995, 41-49.
19. KAČÍK, František a Rastislav SOLÁR. *Analytická chemia dreva: Vysokoškolská učebnica*. Zvolen: Technická univerzita, 1999.
20. KARLMAN, Lars; MÖRLING, Tommy; MARTINSSON, Owe. Wood density, annual ring width and latewood content in larch and Scots pine. *Eurasian Journal of Forest Research*, 2005, 8.2: 91-96.

21. KUNDERA, Hynek. *Vliv vlhkosti na rychlost šíření zvuku dřevem*. Mendelova univerzita v Brně, 2014. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Tippner, Ph. D.
22. LAUŠ, Ladislav. *DŘEVO JAKO KONSTRUKČNÍ MATERIÁL*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
23. LAUŠ, Ladislav. *Dřevo jako konstrukční materiál*. Vysoké učení technické v Brně, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
24. LU, Xiaobin, et al. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 231-239.
25. MÅRTENSSON, Annika. *Mechanical Behaviour of Wood Exposed to Humidity Variations*. 1992. PhD Thesis. Lund University.
26. MORÁVEK, Petr. *Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného bukového dřeva*. Praha, 2017. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.
27. NYSTEDT, Björn, et al. *The Norway spruce genome sequence and conifer genome evolution*. *Nature*, 2013, 497.7451: 579-584.
28. OLSSON, Anders, et al. Prediction of timber bending strength and in-member cross-sectional stiffness variation on the basis of local wood fibre orientation. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2013, 71.3: 319-333.
29. OLSSON, Anders; OSCARSSON, Jan. Strength grading on the basis of high resolution laser scanning and dynamic excitation: a full scale investigation of performance. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2017, 75.1: 17-31.
30. POŽGAJ, Alexander. *METÓDY ZJISŤOVANIE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ DREVA A DREVNÝCH VELKOPLOŠNÝCH KOMPOZITNÝCH MATERIÁLOV. III*. Edičné stredisko VŠLD Zvolen: Vysoká škola lesnícká a drevárska Zvolen, 1987.

31. POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. BRATISLAVA: PRÍRODA, 1993. ISBN 80-07-00600-1.
32. ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila a Libuše GANDELOVÁ. *Stavba dřeva*. Dotisk, 2005 první vydání, 2002. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně: v edičním středisku MZLU v Brně, 2002. ISBN 80-7157-636-0.
33. SOLÁR, Rastislav. *Chémia dreva. II.*-2004. Zvolen: Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 2004. ISBN 80-228-1420-2.
34. TSOUMIS, George. *SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WOOD: Structure, Properties, Utilization*. I. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. ISBN 0-442-23985-8.
35. WANG, Jialai; QIAO, Pizhong. Fracture Toughness of Wood—Wood and Wood—FRP Bonded Interfaces Under Mode-II Loading. *Journal of Composite materials*, 2003, 37.10: 875-897.
36. WOOD, Lyman Wentsch, et al. Relation of strength of wood to duration of load. 1960.
37. YOSHIHARA, Hiroshi. Mode II initiation fracture toughness analysis for wood obtained by 3-ENF test. *Composites science and technology*, 2005, 65.14: 2198-2207.
38. ZATLOUKAL, Petr. *Možnosti snížení navlhavosti dřeva a přestupu vlhkosti do dřeva užitého v konstrukci rezonanční desky hudebního nástroje*. Mendelova univerzita v Brně, 2018. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně.
39. ZOBEL, Bruce J. a Johannes P. van BUIJTENEN. *Wood variation: its causes and control*. Softcover reprint of the hardcover 1st ed. Berlin: Springer, 1989. Springer series in wood science. ISBN 978-3-642-74071-8.



## Webové stránky:

1. [online]. Mendelova univerzita v Brně [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=9190](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9190)
2. [online]. Mendelova univerzita v Brně [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=9192](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9192)
3. BUČAR, Dominika Gornik a Miran MERHAR. Impact and dynamic bending strength determination of Norway spruce by impact pendulum deceleration. *BioResource* [online]. 2015, , all [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/impact-and-dynamic-bending-strength-determination-of-norway-spruce-by-impact-pendulum-deceleration/>
4. Dřevo centrum: Modřín opadavý. [Http://drevo.celyden.cz/charakteristiky-drevin/modrin-opadavy/index.html](http://drevo.celyden.cz/charakteristiky-drevin/modrin-opadavy/index.html) [online]. [cit. 2019-02-19].
5. GLASS, Samuel V. a Samuel L. ZELINKA. Moisture relations and physical properties of wood. Wood handbook [online]. Forest Products Laborator, 2010, 2010, all [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/37428>
6. GREEN, David W., Jerrold E. WINANDY a David E. KRETSCHMANN. Mechanical Properties of Wood. Wood handbook—Wood as an engineering material [online]. Forest Products Laborator, 1999, 1999(4), all [cit. 2019-03-9]. Dostupné z: <file:///C:/Users/Petr/Downloads/ch4-Mechanical-Properties-of-Wood.pdf>
7. In: Kapitola 9. [online]. [cit. 2019-04-08]. ISBN [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_09.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf). Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_09.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf)
8. KANG, Chun-Won. Changes in some mechanical and physical properties and anatomical structure of spruce and larch wood after fire-retardant treatment. *BioResource* [online]. 2017, , all [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/changes-in-some-mechanical-and-physical-properties-and-anatomical-structure-of-spruce-and-larch-wood-after-fire-retardant-treatment/>

9. KLOIBER, Michal. Porovnání dynamického a statického modulu pružnosti poškozeného dřeva POROVNÁNÍ DYNAMICKÉHO A STATICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI POŠKOZENÉHO DŘEVA. Applied mechanics [online]. 2006, 2006 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/267712842\\_Porovnaní\\_dynamickeho\\_a\\_statickeho\\_modulu\\_pruznosti\\_poskozeneho\\_dreva\\_POROVNANI\\_DYNAMICKEHO\\_A\\_STATICKEHO\\_MODULU\\_PRUZNOSTI\\_POSK\\_OZENEHO\\_DREVA](https://www.researchgate.net/publication/267712842_Porovnaní_dynamickeho_a_statickeho_modulu_pruznosti_poskozeneho_dreva_POROVNANI_DYNAMICKEHO_A_STATICKEHO_MODULU_PRUZNOSTI_POSK_OZENEHO_DREVA)
10. Lexikon dřev: modřín opadavý. [Http://ldf.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba\\_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevina=sm](http://ldf.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevina=sm) [online]. [cit. 2019-02-19].
11. Lexikon dřev: modřín opadavý. [Http://ldf.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba\\_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevina=md](http://ldf.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevina=md) [online]. [cit. 2019-02-19].
12. LIANG, Hao, Meng ZHANG, Chao GAO a Yandong ZHAO. Non-Destructive Methodology to Determine Modulus of Elasticity in Static Bending of Quercus mongolica Using Near-Infrared Spectroscopy. Sensors [online]. 2018, 2018, 2018(6), full [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/6/1963/htm>
13. Mikroskopická stavba jehličnatých dřevin [online]. Nábytkářský informační systém [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/mikroskopicka-stavba-jehlicnatych-drevin/page/321/>
14. Modřín opadavý. [Https://www.priroda.cz/lexikon.php?detail=763](https://www.priroda.cz/lexikon.php?detail=763) [online]. [cit. 2019-02-19].
15. Naše stromy: Modřín opadavý. [Http://www.nasestromy.cz/modrin-opadavy/](http://www.nasestromy.cz/modrin-opadavy/) [online]. [cit. 2019-02-19].
16. Pevnost dřeva [online]. Mendelova univerzita v Brně [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=9190](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9190)
17. SMRK ZTEPILÝ. [Http://www.nasestromy.cz/smrk-ztepily/](http://www.nasestromy.cz/smrk-ztepily/) [online]. [cit. 2019-02-13].

18. Smrk ztepilý: dřevo centrum. [Http://drevo.celyden.cz/charakteristiky-drevin/smrk-ztepily/index.html](http://drevo.celyden.cz/charakteristiky-drevin/smrk-ztepily/index.html)
19. Smrk ztepilý: dřevo centrum. [Http://drevo.celyden.cz/charakteristiky-drevin/smrk-ztepily/index.html](http://drevo.celyden.cz/charakteristiky-drevin/smrk-ztepily/index.html) [online]. [cit. 2019-02-13].
20. SONDEREGGER, Walter, Daniel MANDALLAZ a Peter NIEMZ. An investigation of the influence of selected factors on the properties of spruce wood. Wood Sci Technol [online]. 2007, 2008, all [cit. 2019-04-9]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/159144776.pdf>
21. TOPALOGLU, Elif a Nurgül AY. Some Mechanical Properties Of Siberian Larch (*Larix sibirica*) Wood [online]. 2010, , full [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/294871467\\_Some\\_Mechanical\\_Properties\\_Of\\_Siberian\\_Larch\\_Larix\\_sibirica\\_Wood](https://www.researchgate.net/publication/294871467_Some_Mechanical_Properties_Of_Siberian_Larch_Larix_sibirica_Wood)
22. UltraSonic Timer. Fakopp [online]. 2017 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://fakopp.com/en/product/ultrasonic/>
40. Vlhkost dřeva [online]. Mendelova univerzita v Brně [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=9177;lang=cz](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9177;lang=cz)
23. Zdroj: Dřevo – přírodní polymer [online]. [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://www.opi.zcu.cz/download/drevo.pdf>

## NORMY

ČSN 49 0101 – Drevo. Všeobecné požiadavky na fyzikálne a mechanické skúšky

ČSN 49 0108 - Drevo. Zisťovanie hustoty. 1993

ČSN 49 0114 - Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zisťovania pevnosti v ťahu naprieč vlákien

ČSN 49 0115 - Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe. 1979

ČSN 49 0116 - Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti pri statickom ohybe. 1982

ČSN 49 0117 - Drevo. Rázová húževnatost v ohybe. 1977

## SEZNAM GRAFŮ

<b>Graf 1</b> Porovnaní času průchodu v latích přiložením snímačů na čelní konce .....	48
<b>Graf 2</b> Porovnaní času průchodu v závislosti na straně fošny přiložením snímačů na čelní konce .....	49
<b>Graf 3</b> Porovnaní času průchodu v závislosti na straně fošny přiložením snímačů na plochu.....	51
<b>Graf 4</b> Porovnaní frekvence metodou zesilovače.....	52
<b>Graf 5</b> Rázová houževnatost .....	54
<b>Graf 6</b> Ohybová pevnost .....	56
<b>Graf 7</b> Graf hustoty .....	58

## SEZNAM TABULEK

<b>Tabulka 1</b> Statistické vyhodnocení doplňkových vlastností.....	46
<b>Tabulka 2</b> Statistické vyhodnocení hlavních vlastností.....	46
<b>Tabulka 3</b> Procentuální porovnaní.....	46
<b>Tabulka 4</b> Statistické výsledky významnosti faktorů na čas průchodu ultrazvukové vlny z čel vzorků.....	50

<b>Tabulka 5</b> Statistické výsledky významnosti faktorů na čas průchodu ultrazvukové vlny z plochy vzorků.....	52
<b>Tabulka 6</b> Statistické výsledky významnosti faktorů ovlivňující metodu zesilovače .....	53
<b>Tabulka 7</b> Statistické výsledky významnosti faktorů ovlivňující rázovou houževnatost	55
<b>Tabulka 8</b> Statistické výsledky významnosti faktorů ohybové pevnosti .....	57
<b>Tabulka 9</b> Statistické hodnoty významnosti faktorů při vyhodnocování hustoty .....	59
<b>Tabulka 10</b> Statistické vyhodnocení významnosti faktorů šířky letokruhů.....	60
<b>Tabulka 11</b> Statistické výsledky významnosti faktorů podílu letního dřeva .....	62
<b>Tabulka 12</b> Statistické výsledky významnosti faktorů vlhkosti dřeva .....	63
<b>Tabulka 13</b> Statistické výsledky významnosti faktorů ovlivňující statický modul pružnosti.....	64
<b>Tabulka 14</b> Statistické výsledky významnosti faktorů ovlivňující dynamický modul pružnosti.....	66

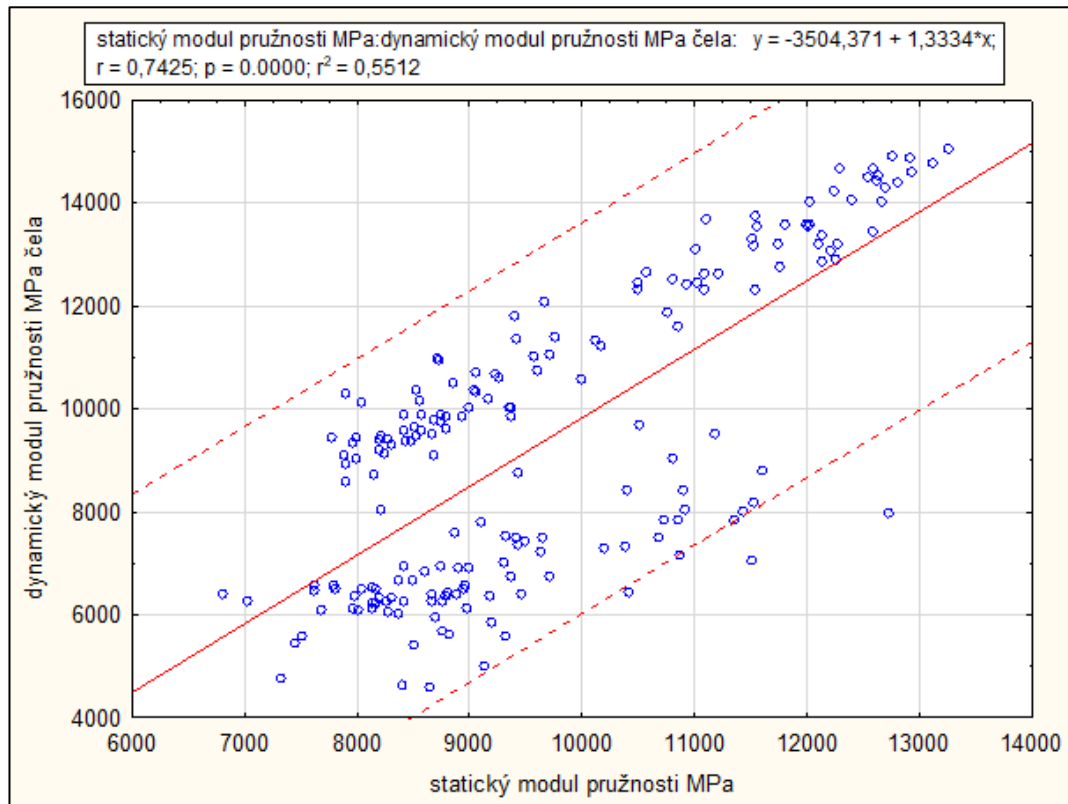
## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obrázek 1</b> Stavba jehličnatých dřevin .....	12
<b>Obrázek 2</b> Makroskopické řezy smrku ztepilého .....	13
<b>Obrázek 3</b> Mikroskopická stavba smrku ztepilého.....	14
<b>Obrázek 4</b> Makroskopické řezy modřínu opadavého .....	15
<b>Obrázek 5</b> Mikroskopická stavba modřínu opadavého.....	16
<b>Obrázek 6</b> Části letokruhu .....	17
<b>Obrázek 7</b> Mikroskopická stavba letokruhu .....	18
<b>Obrázek 8</b> Napětově deformační diagram.....	21
<b>Obrázek 9</b> Průběh ohybového momentu a napětí při zatížení ohybem .....	23
<b>Obrázek 10</b> Ultrasonic Timer .....	25
<b>Obrázek 11</b> Program FFT Analyzátor s popisem .....	26
<b>Obrázek 12</b> Směry ve dřevě.....	27
<b>Obrázek 13</b> Řezy ve dřevě.....	29
<b>Obrázek 14</b> Kódování vzorků.....	31
<b>Obrázek 15</b> Vyhodnocovací program NIS - Elements AR.....	33
<b>Obrázek 16</b> Sken čelních konců smrkových vzorků.....	34
<b>Obrázek 17</b> Sken čelních konců modřínových vzorků .....	34
<b>Obrázek 18</b> Metoda měření ultrazvuku Fakopp .....	36
<b>Obrázek 19</b> Aparatura na měření metodou zesilovače .....	37
<b>Obrázek 20</b> Převodník zvuku Steinberg UR22.....	38
<b>Obrázek 21</b> Popis Charpyho kladiva .....	39
<b>Obrázek 22</b> Stupnice Charpyho kladiva .....	40
<b>Obrázek 23</b> Průběh sil u tříbodového ohybu .....	42
<b>Obrázek 24</b> Trhací stroj .....	43
<b>Obrázek 25</b> Sušící komora.....	44

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>Příloha 1</b> Korelace dynamického a statického modulu pružnosti .....	79
<b>Příloha 2</b> Duncanův test podobnosti vlastností metody ultrazvuku .....	80

# PŘÍLOHA



**Příloha 1** Korelace dynamického a statického modulu pružnosti

dřevina	pořadové číslo v listě	strana fošny	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	SM	1	R															
2	SM	1	L	0,392445														
3	SM	2	R	0,802985	0,292516													
4	SM	2	L	0,399482	0,966690	0,301174												
5	SM	3	R	0,105308	0,379333	0,069549	0,389305											
6	SM	3	L	0,383903	0,962812	0,294177	0,993341	0,404806										
7	SM	4	R	0,908571	0,348982	0,878302	0,357589	0,089531	0,347497									
8	SM	4	L	0,391911	0,911129	0,312170	0,938057	0,381288	0,940081	0,363786								
9	MD	1	R	0,000001	0,000004	0,000002	0,000004	0,000004	0,000005	0,000001	0,000001							
10	MD	1	L	0,000002	0,000001	0,000002	0,000001	0,000001	0,000002	0,000002	0,000002	0,000012						
11	MD	2	R	0,000004	0,000011	0,000001	0,000003	0,000009	0,000004	0,000005	0,000004	0,454500	0,000005					
12	MD	2	L	0,000002	0,000005	0,000002	0,000001	0,000004	0,000001	0,000002	0,000001	0,462759	0,000166	0,160905				
13	MD	3	R	0,000001	0,000004	0,000001	0,000004	0,000003	0,000004	0,000001	0,000005	0,688466	0,000005	0,685757	0,285234			
14	MD	3	L	0,000002	0,000001	0,000002	0,000001	0,000005	0,000001	0,000002	0,000002	0,000264	0,400315	0,000015	0,002432	0,000062		
15	MD	4	R	0,000005	0,000003	0,000001	0,000004	0,000011	0,000004	0,000001	0,591050	0,000005	0,795700	0,231715	0,860770	0,000035		
16	MD	4	L	0,000001	0,000004	0,000002	0,000005	0,000004	0,000001	0,000002	0,448345	0,000192	0,159752	0,977464	0,277328	0,003137	0,228516	

Příloha 2 Duncanův test podobnosti vlastností metody ultrazvuku