

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Porovnání radiálního a tangenciálního ohybu dubového a bukového dřeva
při statickém a dynamickém zatížení**

Diplomová práce

Autor: David Novák

Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

David Novák

Dřevařské inženýrství
Dřevařské inženýrství

Název práce

Porovnání radiálního a tangenciálního ohybu dubového a bukového dřeva při statickém a dynamickém zatížení

Název anglicky

Comparison of radial and tangential bending of oak and beech wood at static and dynamic loading

Cíle práce

1. Teoretický rozbor problematiky, a to jak relevantních vlastnosti dřeva, tak i jeho stavby.
2. Vyhodnotit stanovenou statickou a dynamickou pevnost v ohybu dubového a bukového dřeva.
3. Posoudit faktor "stavby" (struktury dřeva) s ohledem na vybrané vlastnosti (veličiny).
4. Porovnat zjištěné výsledky s dostupnými údaji v odborné literatuře.
5. Zaujmout k získaným výsledkům postoj i z titulu praktického využití poznatků.

Metodika

1. Zpracovat literární rešerši o zkoumaných dřevinách, hodnocených vlastnostech a o faktorech ovlivňujících jejich proměnlivost.
2. Standardizovanými postupy na paralelně vymanipulovaných zkušebních tělesech stanovit statickou pevnost v ohybu a dynamickou pevnost v ohybu (přerážecí práci – houževnatost) dřeva v radiálním a tangenciálním směru. Podélnou paralelnost vzorků, která by měla zabezpečovat aspoň částečnou eliminaci heterogenity dřeva ověřit pomocí času průchodu ultrazvukových vln. Vzorky před experimenty na-klimatizovat do rovnovážného vlhkostního stavu (cca 12 %) odpovídajícímu klimatizování při relativní vlhkosti vzduchu 65 % a teplotě 20 °C.
3. Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě.
4. Analyzovat rozdíly a jejich příčiny mezi statickou a dynamickou pevností v ohybu v daných směrech pro vybrané dřeviny.

Doporučený rozsah práce

60-80 stran

Klíčová slova

dřevo dubu a buku, pevnost v ohybu, přerážecí práce, ultrazvuk, anizotropie, variabilita vlastnosti

Doporučené zdroje informací

- Bodig, J., Jayne, B. A. (1982). Mechanics of wood and wood composites, Van Nostrand Reinhold Company, New York, United States of America. 712 s. ISBN 0-442-00822-8.
- Borůvka, V., Babiak, M. (2016). Vlastnosti dřeva v příkladech, 1. vyd. Praha ČZU, 139 s. ISBN 978-80-213-2618-7.
- Bucur, V. (2006). Acoustics of Wood, Springer Series in Wood Science, 393 s. ISSN 1431-8563.
- ČSN 49 0108: Dřevo. Zisťovanie hustoty.
- ČSN 49 0115: Dřevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe.
- ČSN 49 0117: Dřevo. Rázová húževnatosť v ohybe.
- Dinwoodie, J. M. (2000). Timber: Its nature and behavior, Taylor & Francis New York, USA, pp. 258. ISBN 0-419-25550-8.
- FAKOPP Ultrasonic Timer User's Guide. Dostupné online:
<http://fakopp.com/docs/products/ultrasonic/UltrasonicGuide.pdf> (cit. 2018-11-03).
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M. (1993). Štruktúra a vlastnosti dreva, 1. vyd. Príroda, Bratislava, Slovakia. ISBN 80-07-00600-1.
- Zobel, B. J., and Buijtenen, J. P. (1989). Wood Variation: Its Causes and Control, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 363. ISBN 978-3-642-74071-8.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 14. 3. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 08. 03. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: “Porovnání radiálního a tangenciálního ohybu dubového a bukového dřeva při statickém a dynamickém zatížení“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vlastimila Borůvky, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 15. 6. 2020

.....

Poděkování

Tímto chci poděkovat Ing. Vlastimilu Borůvkovi, PhD. za odborné vedení diplomové práce a cenné rady a připomínky při jejím zpracování. Dále chci poděkovat České zemědělské univerzitě za poskytnutí zázemí a potřebného vybavení ke zpracování této práce a v neposlední řadě chci poděkovat své rodině, která mě podporovala při studiu na ČZU.

Souhrn

Tato práce se skládá z teoretické a praktické části. V teoretické části je rozpracována charakteristika vybraných dřevin, která se zabývá jejich základní specifikací, makroskopickou a mikroskopickou stavbou dřeva, výskytem těchto dřevin v ČR a využitím jejich dřeva. Dále je v této části zpracován přehled hodnocených fyzikálních a mechanických vlastností dřeva.

Praktická část práce se zabývá metodickým postupem výroby vzorků, který zaručil co nejvyšší požadovanou paralelnost. Tato paralelnost byla potvrzena prostřednictvím metod, které jsou založené na šíření zvuku ve dřevě (ultrazvuková a rezonanční metoda). Dále se tato část zabývá posouzením vybraných fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Mezi posuzované vlastnosti byla zahrnuta pevnost v ohybu při statickém a dynamickém zatížení, hustota, vlhkost, šířka letokruhů. Zkoušky byly na zkušebních tělesech provedeny podle odpovídajících norem pro stanovení těchto vlastností. Získané hodnoty vymezující určitou vlastnost byly mezi sebou posuzovány, a to primárně u statické pevnosti v ohybu a rázové houževnatosti. U těchto dvou vlastností byly pozorovány rozdíly nejenom v rámci dřevin, ale také v závislosti na tom, v jakém směru (radiální a tangenciální) bylo těleso zatěžováno. U statické pevnosti v ohybu byl mezi směry zatížení pozorován statisticky významný rozdíl pouze u dřeva dubu, vyšší hodnoty byly pozorovány v radiálním směru. U hodnot rázové houževnatosti v závislosti na směru působení vnější síly (radiální a tangenciální směr zatížení), byly pozorovány výraznější odchylky u dřeva dubu i buku, s větším procentuálním rozdílem než u statické pevnosti v ohybu.

Klíčová slova

dřevo dubu a buku, pevnost v ohybu, přerážecí práce, ultrazvuk, anizotropie, variabilita vlastností

Summary

This thesis consists of theoretical and practical parts. The theoretical part contains characteristics of selected wood species with focus on general specification, macroscopic and microscopic structures, spread of these species in the Czech Republic and use of their timber. Furthermore, overview of assessed physical and mechanical properties is included in this part. Practical part concerns testing sample preparation methodology, which guarantees the highest desired parallelism. It was confirmed using methods based on sound propagation in wood (ultrasound and resonance methods). Additionally, this part also concerns assessment of selected physical and mechanical properties of timber. These properties are static and dynamic (impact) bending strength, density, moistness and width of growth rings. Samples were tested according to industry standards set to read attributes in question. Obtained values were compared to each other, this stands mostly for static and impact bending strength. These two attributes showed differences not only in individual timber samples, but they were also sensitive to specific types of directional stress (radial and tangential). Statistically significant difference between radial and tangential bending strength was observed only in case of oak in favour of radial load. Impact bending showed more significant differences between radial and tangential bending compared to static bending in both oak and beech.

Keywords

oak and beech wood, bending strength, impact bending strength, ultrasound, anisotropy, variability of properties

Obsah

Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	13
Seznam grafů	14
1 Úvod	15
2 Cíle práce	16
3 Rozbor problematiky	17
3.1 Buk lesní – <i>Fagus sylvatica</i> L.	17
3.1.1 Dendrologická charakteristika	17
3.1.2 Stavba dřeva	18
3.1.2.1 Makroskopická stavba	18
3.1.2.2 Mikroskopická stavba	19
3.1.3 Využití buku.....	20
3.2 Bříza bělokorá – <i>Betula pendula</i> Roth	21
3.2.1 Dendrologická charakteristika	21
3.2.2 Stavba dřeva	22
3.2.2.1 Makroskopická stavba	22
3.2.2.2 Mikroskopická stavba dřeva	23
3.2.3 Využití březového dřeva	24
3.3 Lípa srdčitá – <i>Tilia cordata</i> Mill.	25
3.3.1 Dendrologická charakteristika	25
3.3.2 Stavba dřeva	26
3.3.2.1 Makroskopická stavba	26
3.3.2.2 Mikroskopická stavba	27
3.3.3 Využití lípy	28
3.4 Dub letní – <i>Quercus robur</i> L.....	29

3.4.1	Dendrologická charakteristika	29
3.4.2	Stavba dřeva	30
3.4.2.1	Makroskopická stavba	31
3.4.2.2	Mikroskopická stavba	31
3.4.3	Využití dubu	33
3.5	Jasan ztepilý – <i>Fraxinus excelsior</i> L.	33
3.5.1	Dendrologická charakteristika	33
3.5.2	Stavba dřeva	35
3.5.2.1	Makroskopická stavba	35
3.5.2.2	Mikroskopická stavba	35
3.5.3	Využití jasanového dřeva	37
3.6	Variabilita vlastností dřeva – anizotropie	37
3.7	Hodnocené fyzikální a mechanické vlastnosti	38
3.7.1	Vlhkost dřeva	38
3.7.1.1	Rozdělení vody ve dřevě	39
3.7.1.2	Mez hygroskopicity a mez nasycení buněčných stěn	40
3.7.1.3	Metody stanovení vlhkosti	40
3.7.1.4	Faktory ovlivňující vlhkost dřeva	41
3.7.2	Hustota	42
3.7.2.1	Hustota dřevní substance	43
3.7.2.2	Hustota dřeva	43
3.7.2.3	Redukovaná hustota	44
3.7.2.4	Vliv některých faktorů na vlhkost dřeva	45
3.7.3	Šíření zvuku ve dřevě	46
3.7.3.1	Vybrané faktory ovlivňující rychlost šíření zvuku ve dřevě	47
3.7.4	Šířka ročních letokruhů	48

3.7.4.1	Stanovení šířky letokruhů	49
3.7.4.2	Vliv některých faktorů ovlivňující šířku letokruhů.	50
3.7.5	Pevnost dřeva	50
3.7.5.1	Rozlišení pevnosti podle fyzikální povahy veličin	52
3.7.5.2	Rozdělení pevnosti dřeva.....	53
3.7.5.3	Klasifikace pevnosti podle způsobu a času zatížení	53
3.7.5.4	Doba zatížení – Madisonova křivka	56
3.7.5.5	Pevnost dřeva ve statickém ohybu.....	57
3.7.5.6	Faktory ovlivňující statickou pevnost v ohybu.....	59
3.7.6	Houževnatost dřeva.....	60
3.7.6.1	Statická houževnatost dřeva.....	60
3.7.6.2	Rázová (dynamická) houževnatost dřeva	61
3.7.6.3	Faktory ovlivňující rázovou houževnatost dřeva.....	63
4	Metodika	65
4.1	Příprava vzorků	65
4.2	Úprava vlhkosti zkušebních těles – klimatizování	66
4.3	Měření fyzikálních a mechanických vlastností	67
4.3.1	Hustota	67
4.3.2	Ověření paralelnosti vzorků	68
4.3.2.1	Ultrazvuková metoda – čas průchodu UZ vlny	68
4.3.2.2	Rezonanční metoda – metoda s využitím zesilovače.....	70
4.3.3	Pevnost v ohybu při statickém zatížení	72
4.3.4	Rázová houževnatost.....	73
4.3.5	Šířka letokruhů – letokruhová analýza.....	74
4.3.6	Stanovení vlhkosti po na-klimatizování.....	75
4.3.7	Obrazová analýza – příprava vzorků a pořízení snímků.....	75

4.3.8	Vyhodnocení dat	77
5	Výsledky a diskuze	78
5.1	Hustota.....	78
5.2	Vlhkost	79
5.3	Šířka letokruhů	80
5.4	Ověření paralelnosti zkušebních těles	82
5.5	Statická pevnost v ohybu.....	85
5.6	Rázová (dynamická) houževnatost dřeva.....	90
6	Závěr.....	96
7	Použité zdroje	98
7.1	Literatura	98
7.2	Elektronické dokumenty.....	101
7.3	Normy.....	103
8	Seznam příloh	103
9	Přílohy	105

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Makroskopická stavba dřeva buku; A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (autor)	19
Obrázek 2 - Mikroskopická stavba dřeva buku; A – příčný řez (40x), B – příčný řez (100x), C – radiální řez (40x), D – tangenciální řez (40x) (autor).....	20
Obrázek 3 - Makroskopická stavba dřeva břízy; A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (autor)	23
Obrázek 4 - Mikroskopická stavba dřeva břízy; A – příčný řez (40x), B – příčný řez (100x), C – radiální řez (40x), D – tangenciální řez (40x) (autor).....	24
Obrázek 5 - Makroskopická stavba dřeva lípy, A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (autor)	27
Obrázek 6 - Mikroskopická stavba dřeva lípy; A – příčný řez (40x), B – příčný řez (100x), C – radiální řez (40x), D – tangenciální řez (40x) (autor).....	28
Obrázek 7 - Makroskopická stavba dřeva dubu; A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (autor)	31
Obrázek 8 - Mikroskopická stavba dřeva dubu; A – příčný řez (40x), B – příčný řez (100x), C – radiální řez (40x), D – tangenciální řez (40x) (autor).....	32
Obrázek 9 - Makroskopická stavba dřeva jasanu; A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (autor).....	35
Obrázek 10 - Mikroskopická stavba dřeva jasanu; A – příčný řez (40x), B – příčný řez (100x), C – radiální řez (40x), D – tangenciální řez (40x) (autor).....	36
Obrázek 11 - Základní směry a řezy ve dřevě (Borůvka, 2016)	38
Obrázek 12 - Závislost vlhkosti dřeva na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu (podle Kollmanna a Cotého, 1968)	42
Obrázek 13 - Vliv vlhkosti na hustotu (podle Kollmanna, 1951).....	45
Obrázek 14 - Obecný tvar pracovního diagramu (Matovič, 1993)	51
Obrázek 15 - Křivka trvalého zatížení (podle Požgaje et al.; 1993)	54
Obrázek 16 - Wöhlerova křivka (Matovič, 1993).....	55
Obrázek 17 - Madisonova křivka Wood a Pearson (podle Dinwoodieho, 2000) .	56
Obrázek 18 - Zatížení dřeva při ohybu (podle Matoviče, 1993).....	57
Obrázek 19 - Průběh ohybového momentu a jednotlivých složek napětí při zatížení v ohybu (podle Babiaka 2001)	59

Obrázek 20 - Princip přerážecího kladiva (Bodig a Jayne, 1982).....	62
Obrázek 21 - Uložení vzorků ve fošně (autor).....	65
Obrázek 22 - Kódování vzorků (autor)	66
Obrázek 23 - Klimatizační skříň (autor)	67
Obrázek 24 - Čulického diagram (Borůvka, 2016).....	67
Obrázek 25 - FAKOPP Ultrasonic Timer (autor)	69
Obrázek 26 - Aparatura pro FFT analyzer (autor)	71
Obrázek 27 - TIRA 2850 S (autor)	73
Obrázek 28 - Zatížení tělesa (autor).....	73
Obrázek 29 - Charpyho kladivo (autor)	74
Obrázek 30 - Mikrotom GSL 1 (autor)	76

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Hustota, základní statistické údaje.....	79
Tabulka 2 - Hustoty uváděné v literatuře.....	79
Tabulka 3 - Rovnovážné vlhkosti dřeva vybraných druhů dřevin, základní statistické údaje	80
Tabulka 4 - Průměrná šířka letokruhů vybraných dřevin, základní statistické údaje	81
Tabulka 5 - Závislost hustoty na šířce letokruhů vybraných dřevin	81
Tabulka 6 - Pevnost v ohybu při statickém zatížení v tangenciálním směru, základní statistické údaje	86
Tabulka 7 - Pevnost v ohybu při statickém zatížení v radiálním směru, základní statistické údaje	87
Tabulka 8 - Procentuální změny statické pevnosti v ohybu v závislosti na směru zatěžování.....	87
Tabulka 9 - Hodnoty statické pevnosti v ohybu dostupné v literatuře.....	88
Tabulka 10 - Závislost statické pevnosti na hustotě vybraných dřevin	89
Tabulka 11 – Rázová houževnatost při zatížení v tangenciálním směru, základní statistické údaje	91
Tabulka 12 - Rázová houževnatost při zatížení v radiálním směru, základní statistické údaje	92

Tabulka 13 - Procentuální změny rázové houževnatosti v závislosti na směru zatěžování.....	92
Tabulka 14 - Hodnoty rázové houževnatost dostupné v literatuře.....	94
Tabulka 15 - Závislost rázové houževnatosti na hustotě vybraných dřevin	95

Seznam grafů

Graf 1 - Hustoty dřev vybraných dřevin	78
Graf 2 - Průměrná šířka letokruhů vybraných dřevin	80
Graf 3 - Čas průchodu UZ vlny měřené z čel zkušebních těles vybraných dřevin	83
Graf 4 - Čas průchodu UZ vlny měřené z ploch zkušebních těles vybraných dřevin	83
Graf 5 - Čas průchodu zvukové vlny u zkušebních těles vybraných dřevin	84
Graf 6 - Pevnost v ohybu při statickém zatížení u vybraných dřevin	86
Graf 7 - Rázová (dynamická) houževnatost u dřev vybraných druhů dřevin	91

1 Úvod

V nynější době, kdy je čím dál tím více řešena problematika ekologie a využívání obnovitelných zdrojů surovin, nalézá dřevo svou nezastupitelnou funkci. Nejen že využívání dřeva podporuje environmentální výchovu, ale je především nenahraditelným materiálem v mnoha odvětvích, a to i přes jeho některé nežádoucí vlastnosti.

Dřevo je přírodní, nehomogenní, hygroskopický, pórovitý materiál s anizotropními vlastnostmi. Na základě těchto skutečností se stává problémovým materiálem, a to jak z pohledu jeho schopnosti měnit vlhkost v závislosti na okolním prostředí přes jeho náchylnost na působení biotických a abiotických činitelů až po komplikovanější určování jeho fyzikálních a mechanických vlastností, než je tomu u jiných materiálů. Nicméně i přes tyto fakty je velmi ceněným a využívaným materiálem, který si zaslouží velkou pozornost. Dřevo se z praktického hlediska často využívá na výrobu konstrukčních prvků (trámy, nosníky atd.), na základě tohoto faktu je ohybová pevnost považována za jednu z klíčových vlastností dřeva. Tato vlastnost je ovlivněna mnoha faktory, jako je anatomická stavba dřeva, směr působících vnějších sil (radiální a tangenciální směr zatěžování), vlhkost atd. Tato práce se touto problematikou zabývá a jejím cílem je zjistit, do jaké míry jsou ovlivněny hodnoty statické a dynamické pevnosti v ohybu v závislosti na směru zatěžování a druhu dřeviny, z které byl zkoušený materiál pořízen. Po zhodnocení výsledků připadá v úvahu, zdali jsou výsledné hodnoty směrem zatěžování ovlivněny natolik, aby se při zpracování či zabudování takového materiálu mělo s těmito hledisky počítat a uvažovat.

2 Cíle práce

Jeden z hlavních cílů této diplomové práce bylo vyhodnotit statickou a dynamickou pevnost v ohybu vybraných dřevin, a to s přihlédnutím ke směru působících vnějších sil (radiální a tangenciální zatížení). S touto problematikou je spojena stavba dřeva, která byla v této práci u vybraných dřevin popsána na více úrovních (makroskopická a mikroskopická), též byly popsány jednotlivé hodnocené vlastnosti dřeva (statická a dynamická pevnost v ohybu, variabilita vlastností dřeva – anizotropie, hustota, vlhkost, šířka letokruhů, zvuk ve dřevě).

Před získáním potřebných hodnot determinujících některou z posuzované vlastnosti bylo nutné zvolit vhodný postup při výrobě vzorků, který zaručoval co největší paralelnost. Paralelnost zkušebních těles byla ověřena metodami založenými na šíření zvuku ve dřevě (ultrazvuková, rezonanční), prostřednictvím kterých měla být zabezpečena alespoň částečná eliminace heterogenity dřeva.

Po vykonání všech potřebných zkoušek (standardizovanými postupy) byly jednotlivé vlastnosti mezi sebou posuzovány a porovnány s dostupnými údaji v literatuře.

Primárním cílem této práce bylo porovnat radiální a tangenciální ohyb dubového a bukového dřeva při statickém a dynamickém zatížení, tedy u druhů zastupujících listnaté dřeviny. Pro větší komplexnost byly do této práce zahrnuty i další zástupci listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou či kruhovitě pórovitou stavbou dřeva. Do dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva byl dále zařazen jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.) a do dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva byla dále zahrnuta lípa srdčitá (*Tilia cordata* Mill.) a bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth).

3 Rozbor problematiky

3.1 Buk lesní – *Fagus sylvatica* L.

Druh buk lesní (*Fagus sylvatica* L.) patří do rodu buk (*Fagus* L.), jeho čeleď bukovité (*Fagaceae* Dumort.) náleží řádu bukotvaré (*Fagales* Engler). Třída vyšší dvoděložné rostliny (*Rosopsida* Batsch), oddělení rostliny krytosemenné (*Magnoliophyta* Cronquist, Takht. & W. Zimm.), říše rostliny (*Plantae* Haeckel), nadříše (*Bikonta*), doména jaderní (*Eukaryota* Whittaker & Margulis, 1978), soustava živé organismy (*Vitae*) (Zicha, 1999).

3.1.1 Dendrologická charakteristika

Buk lesní (*Fagus sylvatica* L.) je listnatý opadavý strom, dorůstající výšky 35-45 m. Snáší velmi silný zástin, zásluhou této vlastnosti mohou mít čisté bučiny i několik pater, jelikož utlumení jedinci přetrvávají dlouho v podrostu. Má střední požadavky na vlhkost v půdě. Buk je netečný ke geologickému podkladu a roste téměř na všech typech hornin, kromě bažin, jílu, rašelin a suchých písků. Nejlépe prosperuje na humózních půdách s vysokým obsahem vápníku. Opadem listů intenzivně ovlivňuje vlastnosti půdy. Je náchylný na pozdní mrazy a prospívá mu mírné klima. Běžně se vyskytuje v oblastech položených do 800 m. n. m. Strom se dožívá věku 200-400 let. Největší jedinci nabývají 25-35 m³ objemu kmene (Úradníček, 2001).

Kmen je rovný, válcovitý, ve výčetní výšce 1,3 m nad zemí dosahuje průměru až 1,5 m. Většinou je kmen vysoko do koruny průběžný a větve se oddělují v ostrém úhlu. Kmenová a pařezová výmladnost je slabá (Musil, 2005). Hlavní kořen srdcovitého typu je zkrácený, hojně rozvětvený se silnými bočními kořeny. Strom má i ve stáří kůru hladkou, málokdy rozpraskanou, tenkou, šedou. (Paule, 1972). Korunu má vysoko nasazenou, kulovitou, hojně rozvětvenou. Způsob rozvětvení je značně proměnlivý, ovlivněný především prostředím. Velmi často se u stromu vyskytuje vidličnatost, která do značné míry snižuje výtěžnost dřevní hmoty (Barna et al., 2011).

Mladé větvičky jsou méně odstávající, zprohýbané, bělavě chlupaté, později lysé, červenohnědé, které nesou dvouřadě střídavé, hnědé, úzce vřetenové, zašpičatělé, na vrcholku bělavě pýřité pupeny. Listy eliptického tvaru jsou krátce stopkaté (10-15 mm), celokrajné až jemně zubaté, na okraji zvlněné, na vrchu

zašpičatělé, na základu (bázi) zaokrouhlené až mírné klínovité. Na okraji listů a v úžlabí žilek se vyskytují hlavně z jara hedvábné pýřité chloupky. Listy se na jaře zbarvují do jasně zelené, poté přechází barva do tmavších odstínů, na líci lesklé, na spodní straně v úžlabí žilek (5-9 párů) jemně pýřité (Svoboda, 1955; Pagan, 1987; Horáček, 2007).

Strom začíná kvést počátkem května současně s rozvíráním listů, řadí se mezi jednodomé dřeviny. Samčí květy vyrůstají z úžlabí listů v delších (3-4 mm) stopkatých převislých (nících) svazečcích. Kratší samičí (pestíkové) květy jsou po dvou v červenohnědé číšce zevně porostlé, z počátku chlupatými, posléze dřevnatými výrůstky. Plod (bukvice) tvoří trojhranné nažky, hnědé, lesklé, 10-16 mm dlouhé, na hranách křídlaté, uložené po dvou v 20-25 mm dlouhé dřevnaté číšce pukající čtyřmi chlopněmi. Plod je jedlý oříškové chuti. Klíčivost semen dosahuje 70-80 % v prvních šesti měsících, poté strmě klesá na 50 %. Děložní lísky jsou bohatě plné, oblé, celokrajné, na vrchu zelené na spodní straně bělavé. Strom jako solitér začíná kvést a plodit ve věku mezi 20-40 rokem, zapojený v porostu až ve věku okolo 60 let (Úradníček 2001; Goliášová et al. 2006).

Buk má v současné době z celkové skladby lesů v ČR zastoupení 8,6 %. Doporučená skladba je pro tuto dřevinu 18 % a přirozená skladba, která by se v dnešních klimatických a přírodních podmínkách vyvinula bez zákroku člověka je 40,2 % (Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky, 2019).

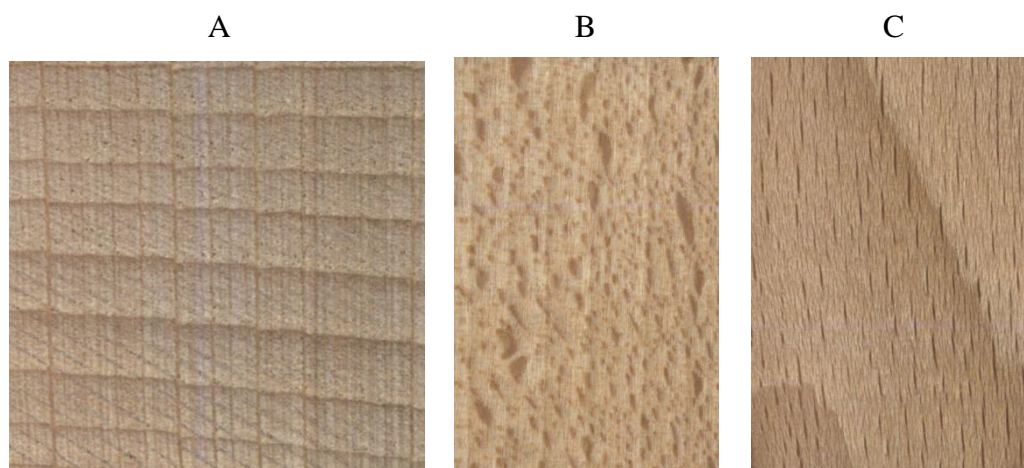
3.1.2 Stavba dřeva

Buk je listnatá roztroušeně pórovitá dřevina, charakteristická výskytem vyzrálého dřeva. U starých stromů je pozorován častý výskyt nepravého jádra. Bukové dřevo je středně tvrdé a středně těžké, málo trvanlivé a rychle podléhá biotickým činitelům. Dobře se moří, impregnuje, při sušení má tendenci ke vzniku trhlin (Šlezingerová, 2012).

3.1.2.1 Makroskopická stavba

Dřevo buku je bez výrazného tmavého jádra s roztroušeně pórovitou stavbou, barva je narůžovělá až žlutavě červená. Cévy nevýrazné, pouhým okem nejsou zřetelné. Letokruhy viditelné a rozpoznatelné. Dřeňové paprsky jsou viditelné na všech řezech. Na příčném řezu se projevují jako různě široké, paprscitě (od dřeně kolmo

na letokruhy) se rozbíhající přímky, na radiálním se jeví jako tzv. zrcátka a tangenciálním řezu vytváří krátké, tmavší, různě vysoké linky vřetenovitého tvaru (Balabán, 1955; Zeidler, 2016).

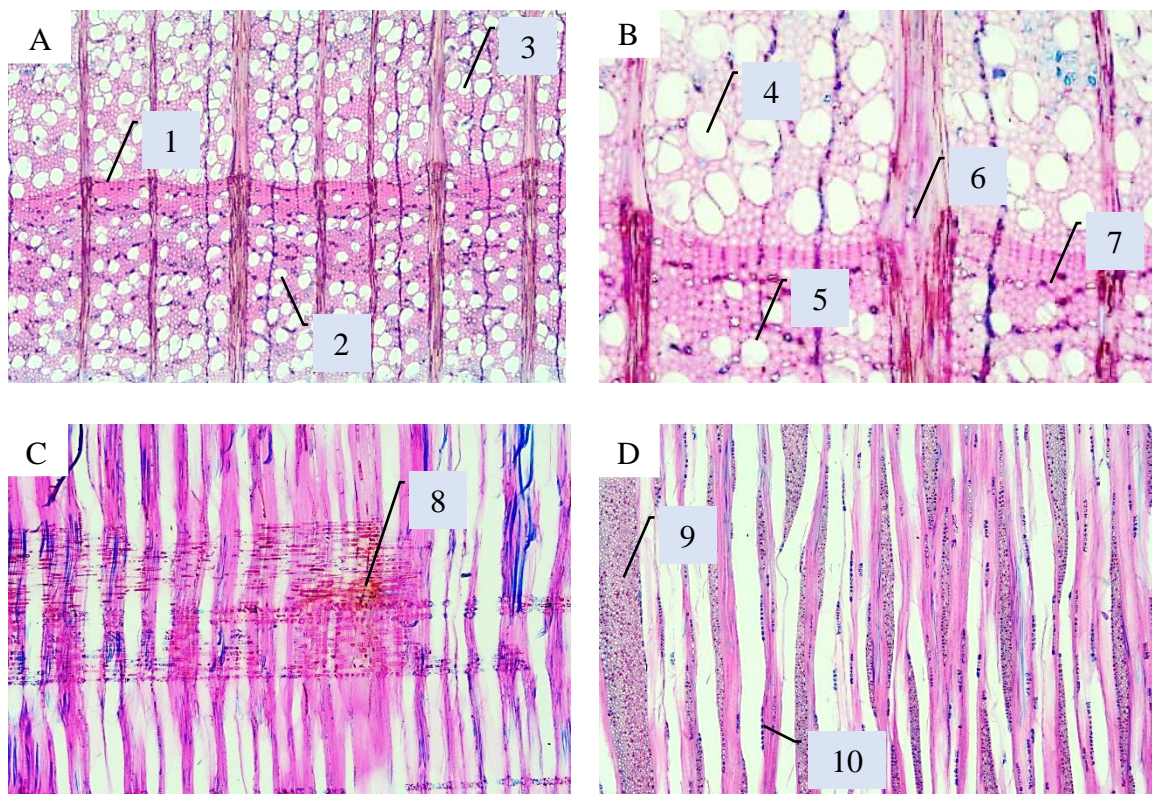


Obrázek 1 - Makroskopická stavba dřeva buku; A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (autor)

3.1.2.2 Mikroskopická stavba

Na příčném řezu (obr. 2–A) je zřejmá hranice letokruhu (bod 1). Cévy se vyskytují v hojném počtu a jsou uspořádány jak jednotlivě (bod 2), tak ve skupinkách po 2–6 (bod 3). Cévní články trachejí mají dva typy perforací, podle toho, kde se céva nachází. Širší tracheje (bod 4), které se vyskytují v jarní části letokruhu mají jednoduchou perforaci, kdežto užší tracheje (bod 5) letního dřeva mají žebříčkovou perforaci. Přítomnost dvojteček na stěnách cév není až tak hojná, početnější výskyt je na kontaktních stěnách s dřevnými paprsky. Tracheje se na celkovém objemu bukového dřeva podílí v průměru 31 %. Na zvětšeném příčném řezu (obr. 2–B) je vyznačená oblast (bod 7), která představuje přítomnost dřevních vláken, a to libriformních vláken a vláknitých tracheid. Vlákňité tracheidy se v bukovém dřevě nacházejí v hojném počtu a značně se podílí na složení základního pletiva. Na celkovém objemu bukového dřeva se dřevní vlákna podílí přibližně 37 %. Na obrázku (obr. 2–B) je také dobře viditelný dřevný paprsek (bod 6), který se na hranici letokruhu rozšiřuje a na radiálním řezu (obr. 2–C) utváří křížové pole (bod 8). Heterogenní dřevné paprsky jsou jednovrstvé nebo mnohovrstvé. Mnohovrstvé dřevné paprsky se jeví na tangenciálním řezu (obr. 2–D) jako vřetenovité útvary (bod 9), tyto paprsky jsou tvořeny více jak 10 buňkami

v horizontálním směru a na výšku padesáti až několika sty. Jednovrstevné, středně vysoké dřevné paprsky (bod 10) tvoří 15-100 parenchymatických buněk. Podélný dřevní parenchym se vyskytuje jak v základním pletivu (difuzní parenchym), tak v okolí cév a tracheid (síťovitý parenchym). Dřevní parenchym se na celkovém objemu bukového dřeva podílí 32 % (Balabán, 1955; Butterfield, 1980; Gandelová 2014).



Obrázek 2 - Mikroskopická stavba dřeva buku: A – příčný řez (40x), B – příčný řez (100x), C – radiální řez (40x), D – tangenciální řez (40x) (autor)

3.1.3 Využití buku

Buk má velmi široké uplatnění a v ČR je prvořadou hospodářsky upotřebitelnou listnatou dřevinou. Dřevo buku je vzhledem k svým vlastnostem primární surovinou při výrobě ohýbaného nábytku. Velmi často se také používá pro výrobu dýh a překližek. Dále je jeho dřevo hojně využíváno při výrobě prachů, domácích potřeb, kuchyňského vybavení, nábytku, parket, hraček, dřevité vlny, hoblic, ručního náradí, pažeb, zábradlí, schodů, částí hudebních nástrojů a nespočet dalších výrobků. Nalézá využití v mnoha odvětvích. Hojné uplatnění nalézá též v chemickém průmyslu pro výrobu buničiny či furfuralu (Lysý, 1954; Němec 2005).

3.2 Bříza bělokorá – *Betula pendula* Roth

Druh bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth) patří do rodu bříza (*Betula* L.), její podčeď (*Betuloideae* Arnott), čeď břízovité (*Betulaceae* S. F. Gray), řád bukotvaré (*Fagales* Engler), třída vyšší dvouděložné rostliny (*Tracheopsida* Batsch), oddělení rostliny krytosemenné (*Magnoliophyta* Cronquist, Takht. & W. Zimm.), říše rostliny (*Plantae* Haeckel), nadříše (*Bikonta*), doména jaderní (*Eukaryota* Whittaker & Margulis, 1978), soustava živé organismy (*Vitae*) (Zicha, 1999).

3.2.1 Dendrologická charakteristika

Bříza bělokorá (*Betula Pendula* Roth) je listnatý, opadavý, středně velký strom, který dorůstá maximální výšky 30 metrů. Bříza má velké požadavky na světlo a řadí se mezi světlomilné rostliny. Bříza je charakteristická rychlým osidlováním holých ploch (tzv. pionýrská dřevina) a tím, že se objevuje na nepříznivých stanovištích, čímž eliminuje ohrožení ostatními dřevinami. Nároky na vláhu má malé. Roste jak na suchých místech s nedostatkem půdní vláhy, tak na promáčených stanovištích. Dřevina má též malé nároky na půdu a je přizpůsobivá k různorodým podkladům. Roste často na kyselých, chudých, skalnatých, kamenitých a písčitých podkladech, ke klimatickým výkyvům je netečná. Bříza se řadí do krátkověkých dřevin, dožívá se 100-150 let (Úradníček, 2001; Prknová et al., 2010 b).

Kmen je v mládí rovný, posléze zprohýbaný, často jeden strom vytváří 2-4 kmene. Ve výčetní výšce 1,3 m nad zemí dosahuje průměru přes 0,75 m. Řídkou korunu nepravidelných tvarů vytváří stoupavé větve (1. řádu) a jemné, převislé větve nižších řádů. Dobrá pařezová a kmenová výmladnost (pouze v mládí) s rostoucím věkem klesá. Kůra v mládí bílá a hladká, s přibývajícím věkem získává šedý až tmavě šedý nádech a ve spodní části kmene je výrazně rozpukaná, černá. Kořenový systém je poměrně mělký, ale dobře kotvíci zásluhou daleko rozložených kořenů (Musil, 2005; Goliášová et al., 2006).

Letorosty tmavě hnědé až červenohnědé, bradavičně žláznaté s jasnými tečkovými lenticelami. Ostře zašpičatělé pupeny vejčitého tvaru jsou zakryté tmavě hnědými, po okrajích jemně chlupatými šupinami, které bývají často lepkavé. Kolcové větévky (brachyblasty) mají 2-3 lisy. Listy kosočtvercového až srdčitého

tvaru jsou krátce stopkaté (8-30 mm), na bázi široce klínovité, na okraji hrubě pilovité až dvakrát pilovité, na vrcholu dlouze zašpičatělé, na líci zřídka jemně chlupaté, dlouhé 3-7 cm. Olistění je málo četné a podzimní žluté až žlutooranžové zbarvení listů setrvává až do prvních mrazů (Úradníček, 2005; Horáček, 2007).

Bříza se řadí do jednodomých dřevin, začíná kvést koncem dubna. Květy tvoří samčí a samičí jehnědy. Přezimující samčí jehnědy oválného tvaru (6-8 mm v průměru) se vyskytují osamoceně nebo v páru, většinou jsou vrcholové, po dobu přezimování 10-20 mm dlouhé, v čase zralosti 20-60 mm dlouhé. Samičí jehnědy přebývají zimu v pupenech a rozkvétají až na jaře, v době kvetení dosahují délky 30 mm. Zralé šištice jsou 15-37 mm dlouhé, hnědé, postupně rozpadavé. Plodem je křídlatá nažka, 2-6 mm široká, 1,5-4 mm dlouhá. Křídlo nažky dosahuje šířky kolem dvojnásobku šířky semene. Semena jsou roznášena větrem (anemochorní druh). Strom plodí prakticky každoročně a jako solitér začíná plodit již v 10-15 letech, v zápoji až po 20-30 letech (Prknová et al, 2010 b; Goliášová et al., 2006).

V současné době se bříza podílí 2,8 % na celkové druhové skladbě lesů v ČR. Doporučená skladba, která nám představuje ekonomicky a ekologicky vyvážené zastoupení této dřeviny je určena na 0,8 % a přirozená, která by na území ČR vznikla bez zásahu člověka za současných podnebních a přírodních podmínek je 0,8 % (Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky, 2019).

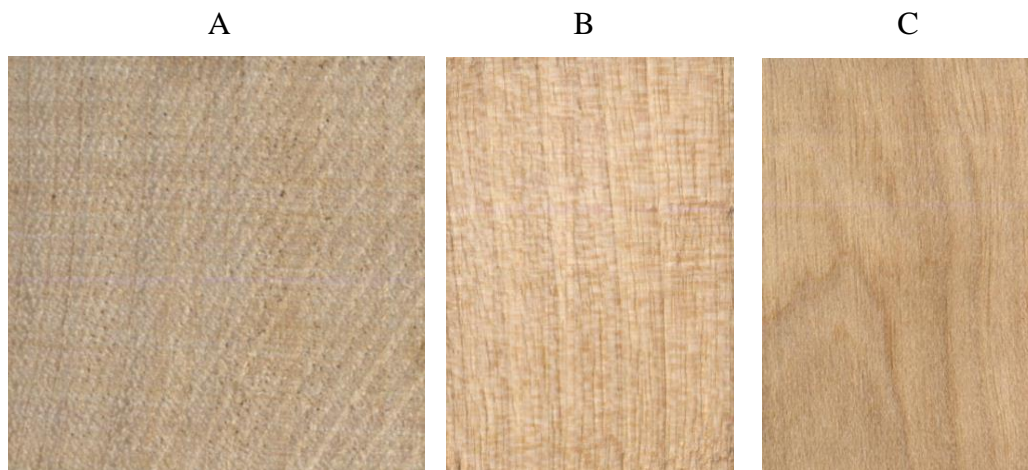
3.2.2 Stavba dřeva

Bříza je listnatá roztroušeně pórovitá dřevina. Dřevo je bez jádra, nicméně se může utvářet tzv. nepravé jádro. Bříza má středně těžké dřevo, které se vykazuje vysokou houževnatostí, pevností, pružností a dobrou opracovatelností. Špatně se šípe a je málo trvanlivé a typické častým výskytem dřevných skvrn (Lysý, 1955; Šlezingerová, 2012).

3.2.2.1 Makroskopická stavba

Dřevo břízy nemá rozlišeno jádro a běl, barva bělavá, žlutobílá přecházející až do jemných odstínů světle hnědé. Letokruhy jsou nevýrazné a špatně rozpoznatelné. Na příčném řezu jsou cévy pouhým okem nepatrné, nicméně jejich rovnoměrné rozložení a barevná odlišnost vytváří na povrchu malé světlé body, které připomínají pomoučený povrch. Na podélných řezech se cévy jeví jako velmi jemné

a krátké trhlinky. Dřeňové paprsky jsou zjevné pouze na radiálním řezu, na kterém se jeví jako pásy vedoucí příčně ve směru k podélným trhlinkám (Balabán, 1955; Zeidler 2016).

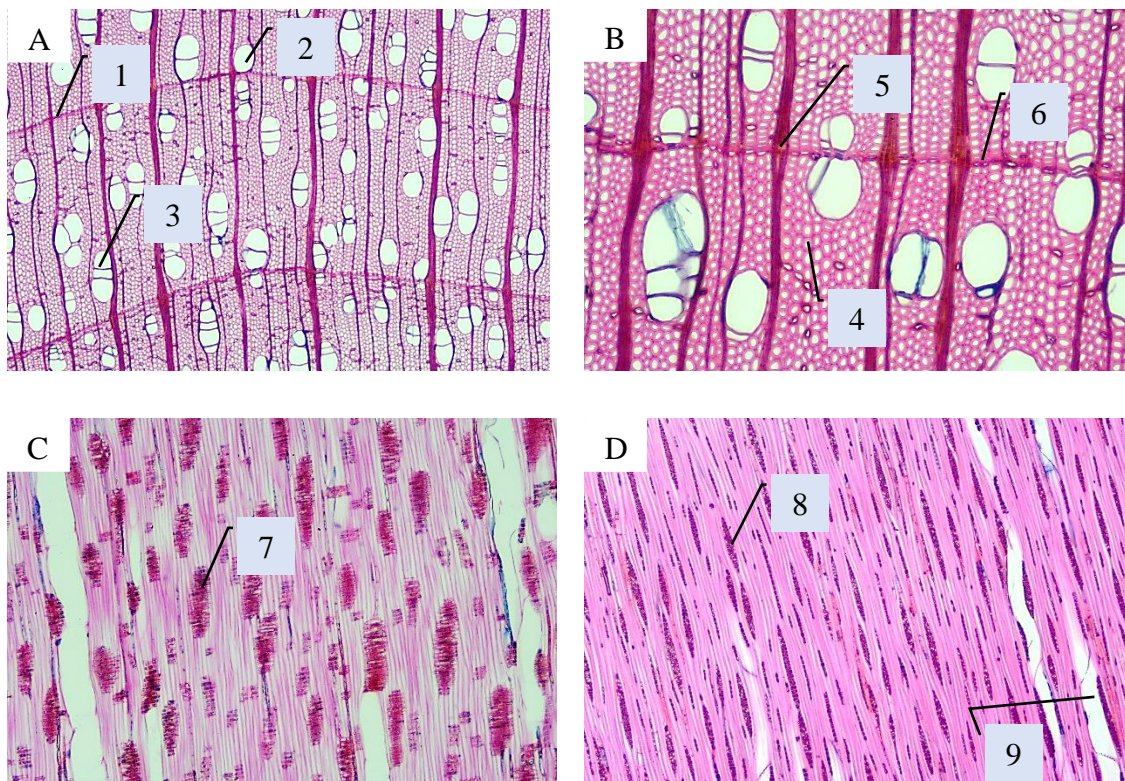


Obrázek 3 - Makroskopická stavba dřeva břízy; A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (autor)

3.2.2.2 Mikroskopická stavba dřeva

Na příčném řezu (obr. 4–A) lze pozorovat hranici letokruhu (bod 1). Úzké cévy se vyskytují po jedné (bod 2), nebo ve skupinkách v radiálních řadách (bod 3) nejčastěji po 2-3 buňkách, méně pak po více, a to až v počtu sedmi buněk. Cévní články (bod 9) trachejí mají žebříčkovou perforaci a na tangenciálních stěnách se vykazují hojným výskytem velmi malých dvojteček. Podíl trachejí z celkového objemu březového dřeva je okolo 25 %. Zóna, kterou označuje následující bod (bod 4), demonstruje výskyt dřevních vláken především libriformních vláken, jejich podíl na celkovém objemu je přibližně 64 %. Na zvětšeném příčném řezu (obr. 4–B) je dobře zřetelný dřeňový paprsek (bod 5). Dřeňové paprsky se rozšiřují na hranici letokruhu (bod 6), která je zakončena axiálním marginálním dřevním parenchymem. Podélný dřevní parenchym se v nepatrné míře vyskytuje v menších skupinkách, nerovnoměrně rozmístěných mezi jednotlivými letokruhy (apotracheální difuzní parenchym). Homogenní dřeňové paprsky tvoří na radiálním řezu (obr. 4–C) četná křížová pole (obr. 7). Dřeňový paprsek se skládá z 1-4 vrstev parenchymatických buněk (šířka) a na výšku z 10-30 buněk. Parenchymatické buňky orientované na podélnou osu kmene (radiální parenchym) jsou uspořádány tak, že výsledný dřeňový paprsek tvoří na tangenciálním řezu (obr. 4–D) nízké

útvary vřetenovitého tvaru (bod 8). Účast parenchymatických buněk (axiální, radiální) na celkovém objemu březového dřeva je kolem 11 % (Balabán, 1955; Wagenführ, 2000).



Obrázek 4 - Mikroskopická stavba dřeva břízy; A – příčný řez (40x), B – příčný řez (100x), C – radiální řez (40x), D – tangenciální řez (40x) (autor)

3.2.3 Využití březového dřeva

Bříza nachází uplatnění především při výrobě dýh a překližek. Velmi ceněné jsou především březové výřezy, které mají očka nebo vlnitý průběh vláken, jelikož z takovýchto výřezů vznikají dýhy krásných kreseb. Březové dřevo také nalézá uplatnění při soustružení a v celulózo-papírenském průmyslu. Díky svým vlastnostem (pevnost, pružnost) bylo hojně používáno v kolářství. Březová voda a výtažky z březového listí, se využívají v kosmetickém a farmaceutickém průmyslu (Úradníček, 2005; Patříčný, 2019).

3.3 Lípa srdčitá – *Tilia cordata* Mill.

Druh lípa srdčitá (*Tilia cordata* Mill.) spadá do rodu lípa (*Tilia* L.), její podčeleď lipovité (*Tiliodeae* Arnott) náleží čeledi slézovité (*Malvaceae* Juss.). Řád slézotvaré (*Malvales* Dumortier), třída vyšší dvouděložné rostliny (*Rosopsida* Batsch), oddělení rostliny krytosemenné (*Magnoliophyta* Cronquist, Takht. & W. Zimm.), říše rostliny (*Plantae* Haeckel), nadříše (*Bikonta*), doména jaderní (*Eukaryota* Whittaker & Margulis, 1978), soustava živé organismy (*Vitae*) (Zicha, 1999).

3.3.1 Dendrologická charakteristika

Lípa srdčitá (*Tilia cordata* Mill.) je listnatý opadavý strom, který dosahuje výšky 25–30 metrů. Toleruje zastínění a sama vytváří velmi silný zástin s takovou intenzitou, že se na takto zacloněné půdě nevyskytuje prakticky žádná vegetace. Má střední požadavky na půdu, ale snáší dobře i suťovitý terén, je odolná proti klimatickým činitelům a běžně se vyskytuje v lokalitách umístěných do 600 m. n. m. Strom v porostech dosahuje věku 150 roků, ale za příznivých podmínek se může dožívat i 300-400 let. Pokud se strom dožívá vyššího věku, tak je kmen často vykotlaný a čteně boulovitý (Úradníček, 2001).

Kmen je mnohdy křivý, ve výčetní výšce 1,3 m nad zemí dosahuje průměru přes 1 m. Ve volném prostoru je válcovitý kmen poměrně krátký, rozvětvlující se na tlusté větve. Jestliže lípa roste v kompaktním porostu, tak vytváří dlouhý, rovný a plno-dřevný kmen. Má velmi bujnou kmenovou a pařezovou výmladnost. Kořeny má srdcovitého typu, hluboké a dobře kotvící. Strom může ve vyhnílych dutinách vlastního kmene tvořit adventivní kořeny. Lípa je ceněná půdo-ochranná a meliorační dřevina (Musil, 2005).

Strom má v mládí kůru hladkou, tenkou, hnědou až tmavě hnědou, pokud dřevina roste v zástinu, tak se barva vyznačuje jako zelená až žlutozelená. Se stoupajícím věkem začne být kůra rozpukaná a podélně rýhovaná, zbarvení přechází do černošedé. Korunu má hustou, košatou, bohatě rozvětvenou a na vrchu lehce zaoblenou, a to i u mladších stromů. Střídavé listy jsou okrouhle srdčitého tvaru dlouhé 3-8 centimetrů, nedlouze zašpicatělé, jemně a ostře pilovité. Listy jsou na lícni straně leskle zelené, na spodní straně modrozelené, kde se v úžlabí žilek nalézají rezavě hnědé svazečky chloupků. Oboupohlavné květy jsou žlutavě bílé

intenzivně vonné, v počtu 5-11 tvoří květenství, které je opatřeno podpůrným listenem. Obvykle začíná plodit ve 30-40 letech, ale jako solitérní strom může započít už v 15-20 letech. Kvete ke konci června a v počátku července (Svoboda, 1955; Horáček, 2007).

Oříšek (plod) kulovitého tvaru je tenkostěnný, velký okolo 6 mm, bez znatelného žebrování a opadáva na podzim. Zralost oříšku je značně variabilní a závislá na nadmořské výšce, lokalitě výskytu, vlhkosti stanoviště, zdroji slunečního svitu. Plod nabývá žluté (tzv. voskové) zralosti k závěru srpna a počátkem září. Žlutá zralost semen je specifikována tím, že vnitřní obal semene má žlutozelenou barvu, vlastní osemení má skořicové zbarvení, vlhkost semene je okolo 50 % a po zmáčknutí nerolí mléko (Bednařík, 2014).

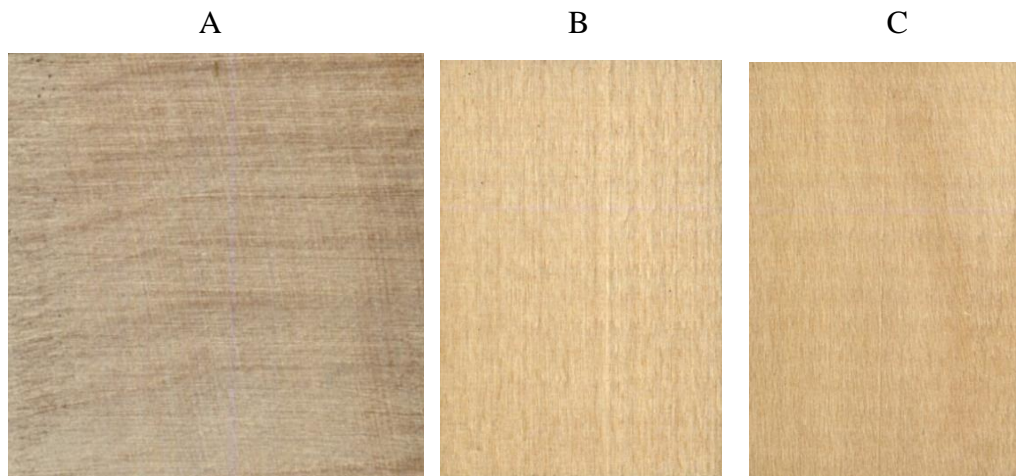
Z celkové sklady lesů v ČR má lípa v dnešní době zastoupení 1,2 %. Doporučená skladba této dřeviny je stanovena na 3,2 % a přirozená skladba, která by se za daného klimatu a současných přírodních podmínek vyvinula bez zásahu člověka je 0,8 % (Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky, 2019).

3.3.2 Stavba dřeva

Lípa je roztroušeně pórovitá dřevina. Dřevo je bez jádra, lehké, měkké, lehce štípatelné (zjevné brázdivité výběžky), málo trvanlivé, dobře zpracovatelné. Ve vlhkém prostředí získává nazelenalou barvu (Novák, 1970; Balabán, 1955). Je typická svým pachem dřeva, který si zachovává po velmi dlouhou dobu. Dřevo druhů lip nacházejících se na území ČR není možné mezi sebou rozpoznat (Zeidler, 2016).

3.3.2.1 Makroskopická stavba

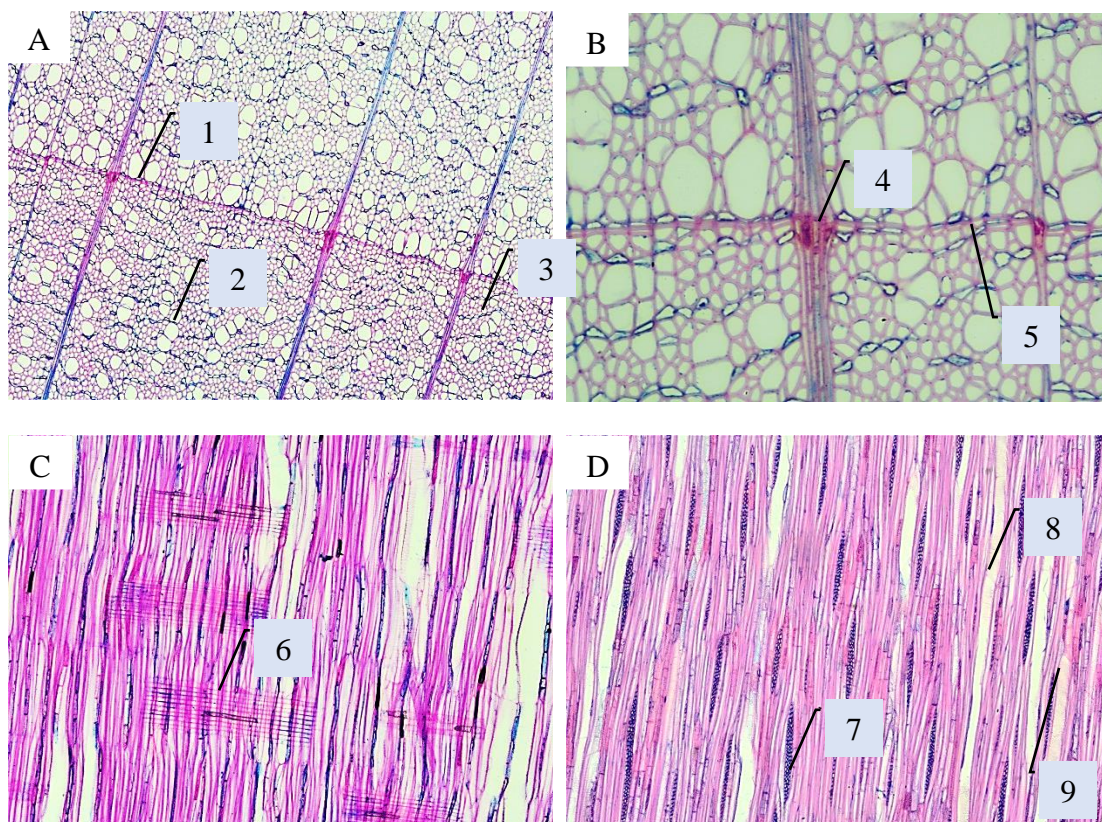
Dřevo lípy je žluto bílé s červeným až hnědým nádechem, jádro a běl nelze rozlišit. Letokruhy jsou nevýrazné, často zvlněné, málo viditelné a rozpoznatelné. Dřevo je s roztroušeně pórovitou stavbou, na příčném řezu jsou cévy a dřevné paprsky nezřetelné (Balabán, 1955). Dřevné paprsky lze pozorovat pouze na radiálním řezu. (Zeidler, 2016).



Obrázek 5 - Makroskopická stavba dřeva lípy, A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (autor)

3.3.2.2 Mikroskopická stavba

Na snímku (obr. 6–A) je patrná hranice letokruhu (bod 1), dále lze pozorovat úzké cévy (bod 2) polygonálního tvaru, které jsou uspořádány jednotlivě, nebo po více ve skupinách v krátkých radiálních řadách. Oblast, kterou představuje následující bod (bod 3), značí výskyt dřevních vláken (librifonní vlákna, tracheidy), která tvoří podstatnou část celkového objemu lipového dřeva, a to kolem 72 %. Při větším zvětšení příčného řezu (obr. 6–B) je zřejmý dřevový paprsek (bod 4), který se rozšiřuje na hranici letokruhu (bod 5), která je ukončena marginálním (hraničním) axiálním dřevním parenchymem, podélný parenchym se vyskytuje také v krátkých úhlopříčných liniích mezi dřevovými paprsky (apotracheální, rozptýleně nakupený dřevní parenchym). Homogenní až slabě heterogenní dřevové paprsky vytváří na radiálním řezu (obr. 6–C) křížové pole (bod 6) a na tangenciálním řezu (obr. 6–D) se jeví jako středně vysoké útvarů vřetenovitěho tvaru (bod 7). Dřevový paprsek tvoří 2-4 vrstvy parenchymatických buněk a na výšku 10-60 buněk. Parenchymatické buňky (axiální, radiální) se na celkovém objemu lipového dřeva podílí přibližně 11 %. Cévy mají mezi jednotlivými cévními články jednoduchou perforaci (bod 8) a na vnitřní straně buněčných stěn spirální ztlustěliny (bod 9), jejichž výskyt je pro tuto dřevinu jedním z typických znaků, dále se na stěnách nacházejí dvojtečky. Podíl trachejí na celkovém objemu lipového dřeva činí přibližně 17 % (Balabán, 1955; Gandelová 2014).



Obrázek 6 - Mikroskopická stavba dřeva lípy; A – příčný řez (40x), B – příčný řez (100x), C – radiální řez (40x), D – tangenciální řez (40x) (autor)

3.3.3 Využití lípy

V dřívějších dobách byla lípa hojně používána v mnoha oblastech. Strom lípy byl využívána nejen pro svoje dřevo, ale také pro lýko, květy, a mnohé další. Postupem času a rozvojem nových materiálů bylo od využívání této dřeviny ustupováno, avšak v oblasti řezbářství má stále svoje zastoupení a tradici (Novák, 2018). Z mladých porostů byla lípa značně vytlačována na úkor jiných hospodářsky významných dřevin. Lipové dřevo je žádaný a vyhledávaný materiál mezi uměleckými řezbáři, soustružníky a modeláři. Je využíváno pro výrobu hraček, překližek, tužek, beden, intarzií, dřevité vlny, střelného prachu, smyčců, domácích potřeb. Dále nalézá uplatnění v celulózo-papírenském, sirkařském a leteckém průmyslu. Je také žádaným materiálem včelaři, kteří jej používají pro výrobu rámečků (Němec; 2005). S přihlédnutím do historie se hojně používalo lipové lýko k různorodým účelům, a to od výroby rohoží a provazů, až po produkci oděvů či lůžkovin (Svoboda, 1955). Květy, plody a kůra je dodnes využívána v lékařství pro přípravu čajů a extrakci éterického oleje (Úradníček, 2001).

3.4 Dub letní – *Quercus robur* L.

Druh dub letní (*Quercus robur* L.) patří do rodu dub (*Quercus* L.), čeleď bukovité (*Fagaceae* Dumort.), řád bukotvaré (*Fagales* Engler) patří do třídy vyšších dvouděložných rostlin (*Rosopsida* Batsch), oddělení rostliny krytosemenné (*Magnoliophyta* Cronquist, Takht. & W. Zimm.), říše rostliny (*Plantae* Haeckel), nadříše (*Bikonta*), doména jaderní (*Eukaryota* Whittaker & Margulis, 1978), soustava živé organismy (*Vitae*) (Zicha, 1999).

3.4.1 Dendrologická charakteristika

Dub letní (*Quercus robur* L) je listnatý, opadavý, jednodomý strom, který dorůstá výšky 20-40 metrů. Náročnost na světlo je poměrně velká, jelikož je dub světlomilná dřevina. Často vytváří vysokokmenné doubravy. Nároky na vláhu se liší podle dvou rozlišných ekotypů. První ekotyp je velmi náročný na vláhu a vyhovují mu lužní lesy, druhý (lesostepní ekotyp) se vyznačuje přizpůsobivostí růst i na silně vysychavých půdách, ale i tak musí být spodní voda v blízkém dosahu kořenů. Dřevina má vysoké požadavky na půdu, nejlépe prosperuje na bohatých, hlinitých a hlubokých půdách, ke klimatickým podmínkám je netečný, ale náchylný k podzimním mrazům. Vyskytuje se především v nižších polohách. Strom se dožívá věku i přes 500 let (Úradníček, 2001; Musil, 2005).

Strom má mohutný kmen, ve výčetní výšce 1,3 m nad zemí dorůstá průměru přes 1,5 m a dosahuje objemu až 40 m³. Kmen se rozvětňuje na silné, zprohýbané a odstálé větve. Koruna je rozložitá a poměrně nízko položená. Silná pařezová výmladnost setrvává až do pokročilého věku (Musil, 2005). Kůra mladých stromků zpočátku hladká, lesklá, zelenošedá až šedá a s postupujícím věkem (30 let) začíná podélně i příčně rozpraskávat. Kořen bývá kulového typu a hojně se rozvětňuje (Vyskot, 1958).

Letorosty hnědošedé, lysé s jemnými lenticelami. Nevýrazné pětihranné pupeny oválného až vejčitého tvaru, 5-7 mm dlouhé, světlehnědé, na konci větviček naklonené, raší počátkem května. Čepel listů připomíná vejčitý až úzce eliptický tvar. Střídavé listy proměnlivého laločnatého tvaru jsou tuhé, na líci lesklé, na rubu světle zelené a lysé. Listy obvykle dlouhé 5-15 cm, se 3-7 páry laloků, na bázi ouškaté s krátkým řapíkem (Goliášová et al., 2006; Horáček 2007).

Dub začíná kvést koncem dubna a počátkem května současně s rašením listů. Samčí jehnědy jsou stopkaté, převislé, 30-50 mm dlouhé, nečetně opatřeny malinkými kvítky s 5-8- dílným vláskovitým (brvitým) okvětím a 6-8 tyčinkami s vejcovitými prašníky žlutozelené barvy. Pestíkové jehnědy (10 mm dlouhé) se vztyčují uprostřed větévky, jsou v chudokvětém klasovitém květenství, stopka květenství je holá, 30-60 mm dlouhá. Jehněd tvoří 2-7 kvítků, každý kvítek má malý pestík se třemi karmínově červenými laločnatými bliznami. Plody (žaludy) se většinou vyskytují v počtu 2-5 kusů a tvoří tak plodenství. Žalud je tvořen dvěma dělohami uloženými v zeleném, později hnědém osemení, které je uloženo ve své spodní části do miskovité, slabostěnné čišky s plochými šupinami. Plod dlouhý 15-25 mm se vykazuje vejčítým až podlouhlým tvarem. Klíčivost semen je velmi variabilní a závislá především na způsobu jejich uskladnění. Dub začíná kvést ve 40-50 letech, pokud je však v hustém zápoji, může kvést i mnohem později, a to až v 80 i více letech na rozdíl od výmladků, které obvykle začínají kvést ve 20 letech (Vyskot, 1958; Goliášová et al., 2006).

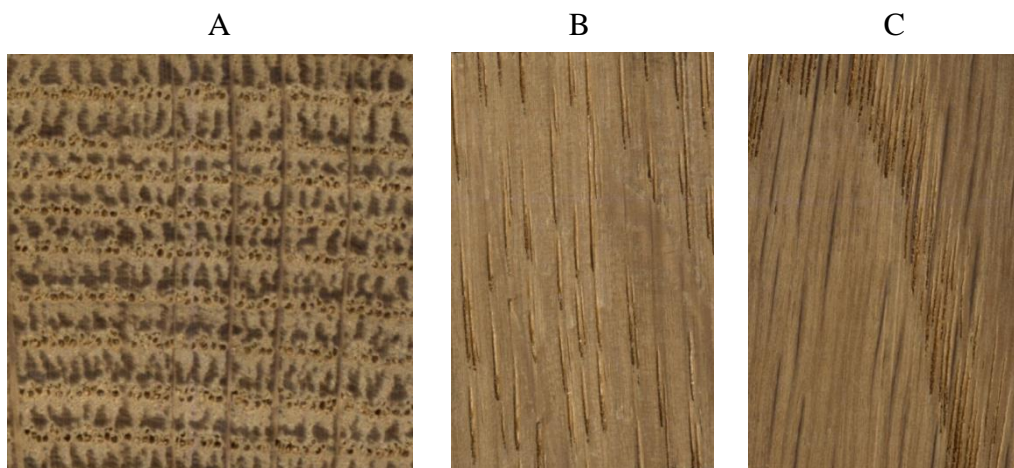
Doporučená skladba dubu, která reprezentuje ekologicky a ekonomicky účelné zastoupení této dřeviny je v ČR stanovena na 9 %. V současné době se dub na druhové skladbě podílí 7,3 %. Přírozená skladba, která by se by se vytvořila v nynějších přírodních a podnebních podmínkách bez zásahu člověka je stanovena na 19,4 % (Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky, 2019).

3.4.2 Stavba dřeva

Dub je listnatá kruhovitě pórovitá dřevina, která je typická svým mohutným jasně až tmavě hnědým jádrem. Dubové dřevo je tvrdé, středně těžké v čerstvém stavu dobře štípatelné a charakteristické svým kyselým pachem. Při dlouhodobém styku s vodou dostává dřevo tmavý nádech, pokud je takto uložené dostatečnou dobu, tak úplně zčerná, tímto způsobem upravený dub se často označuje jako takzvaný bahenní dub. Z původních druhů vyskytujících se v ČR patří dřevo dubu k nejodolnějším vůči biotickým a abiotickým činitelům. Dřeva jednotlivých druhů dubů vyskytujících se v ČR nejsou mezi sebou rozeznatelné (Zeidler, 2016; Reinprecht, 2012).

3.4.2.1 Makroskopická stavba

Dřevo dubu má mohutné, žlutohnědé až hnědé jádro dobře rozeznatelné od běle, která je úzká žlutá až světlehnědá. V jarním dřevě jsou tracheje (cévy) široké, velké pouhým okem znatelné, na příčném řezu se jeví jako oválné otvory a na radiálním a tangenciálním řezu jako podélné rýhy. V letním dřevě jsou cévy nezřetelné a jejich seskupení tvoří zprohýbané, radiální řady, též nazývané jako plaménce. Mohutné dřevné paprsky se vyskytují v hojném počtu. Na tangenciálním řezu se jeví jako tmavé pruhy až 7 cm dlouhé, na radiálním řezu jako tzv. zrcátka rozmanitých tvarů a značných rozměrů. Na příčném řezu vytvářejí dřevné paprsky světlé proužky směrem od dřevě se rozbíhající (Balabán, 1955; Zeidler, 2016).

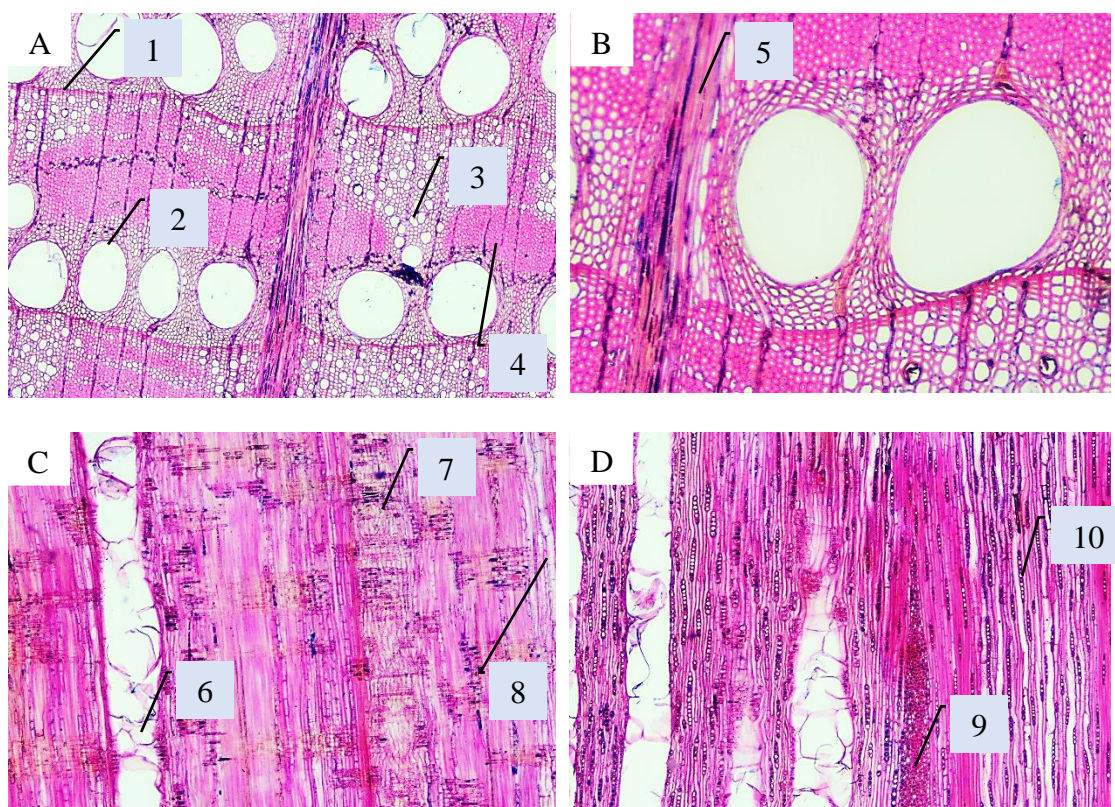


Obrázek 7 - Makroskopická stavba dřeva dubu; A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (autor)

3.4.2.2 Mikroskopická stavba

Na příčném řezu (obr. 8–A) je zřetelná hranice letokruhu (bod 1). Tracheje se vyskytují poměrně ve značném počtu. Cévy lze rozdělit do dvou skupin, a to na cévy jarního dřeva (makro-póry) a cévy letního dřeva (mikro-póry). Cévy mají hladkou buněčnou stěnu s častým výskytem dvojteček a jsou uloženy jednotlivě, nebo ve skupinkách v počtu 2-4 buněk. Tracheje jarního dřeva (bod 2) o průměru lumenu v rozmezí 0,1-0,4 jsou složeny z cévních článků s jednoduchou perforací a často bývá jejich lumen vyplněn thyly (bod 6). Tracheje letního dřeva (bod 3) o průměru lumenu 0,01-0,05 mm mají síťovitou perforaci a jsou uspořádány v radiálních řadách (vytvářejí plaménce). Podíl trachejí na celkovém objemu dubového dřeva je velmi variabilní a závislý na šířce ročních letokruhů, pohybuje

se v rozmezí 7,7-39,5 %. Základní pletivo kolem letních cév (bod 3) se skládá z libriformních vláken a dřevního parenchymu a četné zastoupení mají také vláknité tracheidy. Hojně zastoupení libriformu složeného z dlouhých, tlustostěnných buněk lze pozorovat také v letním dřevě (bod 4). Na celkovém objemu dubového dřeva se dřevní vlákna podílí 40-60 %. Na příčném řezu (obr. 8–B) je parný homogenní dřevový paprsek (bod 5). Homogenní dřevové paprsky v dubovém dřevě figurují ve dvou velikostech a na radiálním řezu (obr. 8–C) vytváří různě mohutná křížová pole (bod 7). Na tomto řezu je také zřetelný axiální dřevní parenchym (bod 8). Na tangenciálním řezu (obr. 8–D) utvářejí horizontálně uložené parenchymatické buňky mnohovrstevných (bod 9) a jednovrstevných (bod 10) dřevových paprsků vysoké vřetenovité útvary. Podíl dřevního parenchymu (axiální, radiální) na celkovém objemu dubového dřeva je průměrně 20 % (Balabán 1955; Čunderlík, 2009 Schmulsky, 2011).



Obrázek 8 - Mikroskopická stavba dřeva dubu; A – příčný řez (40x), B – příčný řez (100x), C – radiální řez (40x), D – tangenciální řez (40x) (autor)

3.4.3 Využití dubu

Dub nachází velice široké uplatnění v mnoha odvětvích, v pilařské kulatině je z listnatých dřevin (v ČR) řazen podle důležitosti hned za bukem. Pro svoji nádhernou texturu je hojně využíván pro výrobu okrasných dřív a nábytku. Zásluhou svojí trvanlivostí a odolností vůči biotickým a abiotickým činitelům nalézá velmi široké uplatnění u výrobků, kde je tato vlastnost vyhledávána. Používá se například na výrobu lodí, mostů, oken, dveří, prahů, podlah, schodišť, sudů a nespočet dalších výrobků. Dubové dřevo je velice nádherný, ceněný a vyhledávaný materiál (Lysý, 1954).

3.5 Jasan ztepilý – *Fraxinus excelsior* L.

Druh jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.) spadá do rodu jasan (*Fraxinus* L.), čeleď olivovnickovité (*Oleaceae* Hoffmanns & Link), řád hluchavkotvaré (*Lamiales* Bromhead), třída vyšší dvouděložné rostliny (*Rosopsida* Batsch), oddělení rostliny krytosemenné (*Magnoliophyta* Cronquist, Takht. & W. Zimm.), říše rostliny (*Plantae* Haeckel), nadříše (*Bikonta*), doména jaderní (*Eukaryota* Whittaker & Margulis, 1978), soustava živé organismy (*Vitae*) (Zicha, 1999).

3.5.1 Dendrologická charakteristika

Jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.) je urostlý, listnatý, opadavý strom dosahující výšky 30-40 m. V mládí vyžaduje zastínění, nicméně v dospělosti se řadí mezi světlomilné rostliny. Nároky na vláhu jsou odlišné podle toho, o jaký ekotyp (vápencový, lužní, horský) se jedná. Vápencový ekotyp snáší lépe sucho a k nedostatku vláhy je adaptován. Lužní a horský ekotyp jasanu požadují adekvátní množství vláhy v průběhu celého roku. Náchylnost jasanu na záplavy a zadrženou vodu je velká. Požadavky na půdu se dřevina zařazuje mezi náročné listnáče, vyžaduje hlubší půdy bohaté na humus a dusík. Netoleruje rašelinu, prosolené půdy a je choulostivý k pozdním mrazům a klimatickým výkyvům (Úradníček, 2005, Prknová et al., 2008 a).

Strom má většinou rovný kmen, občas vidličnatý, ve výčetní výšce 1,3 m nad zemí dorůstá průměru přes 1 m. Kmen se větví na silné větve, u starších stromů převažuje vytváření krátkých, zakřivených větví. Pařezová výmladnost je u jasanu velmi silná a vyskytuje se často i kořenová výmladnost. Koruna vejcovitého tvaru

je štíhlá. Kůra je v mládí hladká, šedozeleňá, později tenčí podélné vráscitá, u starých stromů síťovitě rýhovaná s šedočerným až černým zbarvením. Hlavní kůlový kořen je tlustý, krátký a větví se na podobně mohutné postranní kořeny (panohový kořenový systém), které zabíhají hluboko do půdy (Musil, 2005; Prknová et al, 2008).

Letorosty vstřícné až lehce střídavé, hladké, lesklé, šedozeleňé s podélně uloženými bělavými lenticelami. Pupyň vejčitého až kuželového tvaru jsou krátké a kryté dvěma hnědými až černými, kožovitými šupinami. Listy s dlouhým řapíkem (5-10 cm) dosahují délky 25-40 cm a jsou složeny z lichého (7-15) počtu lístků (tzv. lichozpeřený list) a jen poslední koncový lístek je řapíkatý. Přisedlé lístky jsou 3-10 cm dlouhé, podlouhle vejčité, pilovité, na konci jemně zašpičatělé, na líci lysé, matné, tmavě zelené, na rubu světle zelené. Listy na podzim nepodléhají zbarvení, ale opadávají v zeleném stavu (Bertová et al., 1984, Horáček, 2007).

Jasan se řadí mezi mnohomanželné (polygamní) rostliny, tedy mezi rostliny, které mají na jednom stromě jak jednopohlavné, tak oboupohlavné květy. Strom kvete každoročně a začíná kvést mezi dubnem a květnem, a to před rašením listů. Latnatá (hroznovitá) květenství vyrůstají z postranních pupenů (2-4 rozvětvené stopky na jeden pupen), ze začátku jsou vzpřímená, později převislá. Zbarvení květů je variabilní od sněhově bílé až po růžovou. Oboupohlavné květy mají dvě tyčinky s nachově červenými prašníky vejčitého tvaru a pestík s dvouločnou bliznou. Jednopohlavné samčí květy mají 2-3 tyčinky a zakrnělý pestík, u samičích květů je pestík a tyčinky jsou nahrazeny dvěma patyčkami (sterilní tyčinky). Úzce podlouhlé plody, kterými jsou 30-50 mm dlouhé křídlaté nažky, rostou na převislých stopkách. Nažky mají leskle hnědou barvu, a semenné pouzdro je více jak o polovinu kratší než okřídlená nažka. K dozrávání semene dochází na podzim a postupně opadávají až do jara (Musil, 2005; Prknová et al., 2008).

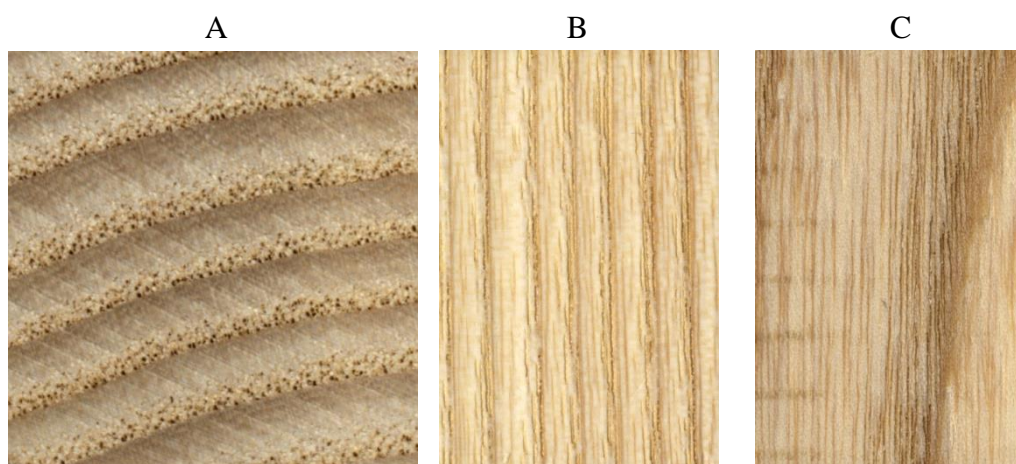
V současné době má tato dřevina zastoupení 1,4 % z celkové skladby lesů v ČR. Ekologicky a ekonomicky účelné zastoupení této dřeviny (doporučená skladba) je stanoveno na 0,7 %, a přirozenou skladbu, která by vznikla bez zásahu člověka za současných klimatických a přírodních podmínek, představuje hodnota 0,6 % (Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky, 2019).

3.5.2 Stavba dřeva

Jasan se řadí do skupiny listnatých kruhovitě pórovitých dřevin. Dřevo má charakteristickou texturu s rovnými vlákny. Jádru začíná vytvářet až v pokročilejším věku. Pro své vlastnosti je dřevo jasanu velmi ceněný a vyhledávaný materiál. Dřevo je středně těžké, tvrdé, pružné, houževnaté, těžce štípatelné, málo se bortí a praská, venku méně trvanlivé (Balabán, 1955; Zeidler, 2016).

3.5.2.1 Makroskopická stavba

Dřevo jasanu má širokou, bíle žlutou, žlutou až narůžovělou běl. Světlehnědé, různě velké jádro se vyskytuje až v kmenech stromů starších 40 let. Na příčném řezu lze pozorovat velmi ostrý přechod mezi póry jarního a letního dřeva. Cévy jarního dřeva uspořádané v tangenciálních řadách jsou na příčném řezu dobře patrné, na podélných řezech se jeví jako podélné, žlutooranžové rýhy. Cévy letního dřeva pouhým okem nepozorovatelné. Dřeňové paprsky jsou zřetelné pouze na radiálním řezu, na kterém vytváří příčné pásy (Balabán, 1955).

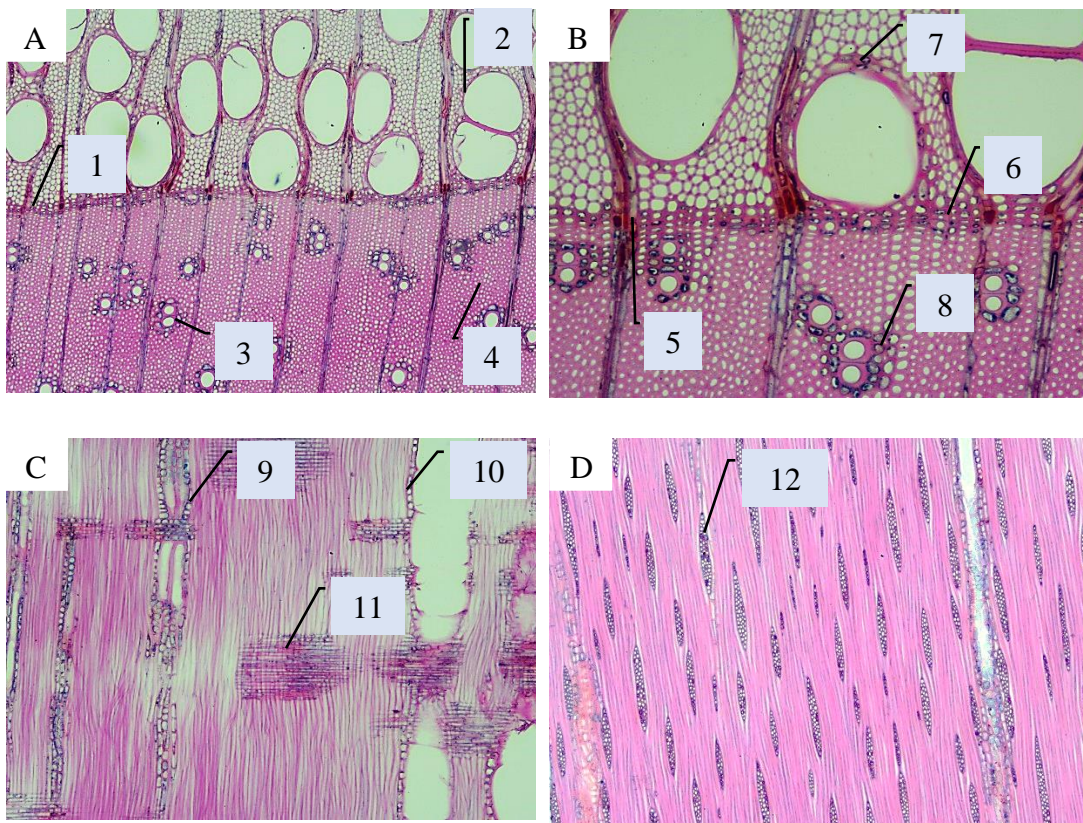


Obrázek 9 - Makroskopická stavba dřeva jasanu; A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (autor)

3.5.2.2 Mikroskopická stavba

Na snímku příčného řezu (obr. 10–A) je zřetelná hranice letokruhu (bod 1). Cévy se vyskytují ve dvou formách, a to cévy jarního a letního dřeva též označované jako makro-póry a mikro-póry. Cévní články trachejí mají jednoduchou perforaci a na buněčných stěnách se vyskytují v hojném počtu dvojtečky. Tracheje jarního dřeva (bod 2) většinou figurují osamoceně nebo v párech, málokdy ve skupinkách po

třech. Tracheje letního dřeva (bod 3) jsou osamocené, nebo tvoří skupinky po 2-4 cévách uspořádaných v radiálních řadách, jejich vzájemné rozestupy jsou značně velké. Cévy se na celkovém objemu jasanového dřeva podílí v průměru 12 %. Základní pletivo tvořené libriformními vlákny (bod 4) má na celkovém objemu dřeva značný podíl, a to v průměru 62 %. Na příčném řezu (obr. 10–B) lze pozorovat homogenní dřevový paprsek (bod 5), který je tvořen několika vrstvami (2-5) parenchymatických buněk. Dřevové paprsky jsou na výšku složeny z 8-15 parenchymatických buněk a na radiálním řezu (obr. 10–C) utváří charakteristická křížová pole (bod 11), na tangenciálním řezu (obr. 10–D) se jeví jako větvenité útvary (bod 12). Přítomnost podélného parenchymu je u jasanového dřeva poměrně značná. Hranici letokruhu (bod 6) pozdního dřeva zakončuje marginální dřevní parenchym. Podélný dřevní parenchym vytváří kolem cév jarního (bod 7) a letního (bod 8) dřeva pouzdra (vazicentrický dřevní parenchym).



Obrázek 10 - Mikroskopická stavba dřeva jasanu; A – příčný řez (40x), B – příčný řez (100x), C – radiální řez (40x), D – tangenciální řez (40x) (autor)

Buňky vazicentrického dřevního parenchymu jsou zjevné i na radiálním řezu (bod 9 a 10). Podíl axiálního a radiálního parenchymu na celkovém objemu jasanového dřeva je průměrně 26 % (Balabán, 1955; Tsoumis, 1968).

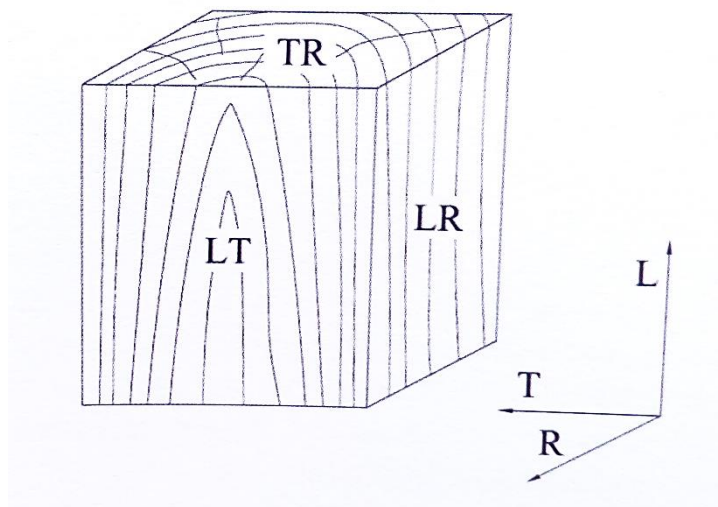
3.5.3 Využití jasanového dřeva

Jasan je pro svoji texturu a výborné vlastnosti vyhledávaným a ceněným materiálem. Nalézá uplatnění především při výrobě okrasných dých, nábytku, hudebních nástrojů, sportovního náčiní (např. lyže, sáně, luky, pádla, bradla) a pracovního nářadí (topůrka, násady). Listy a kůra se pro svůj obsah účinných látek používaly v lidovém lékařství (Lysý, 1954; Úradníček, 2001).

3.6 Variabilita vlastností dřeva – anizotropie

Dřevo je nehomogenní, hygroskopický, pórovitý materiál s anizotropními vlastnostmi (Požgaj et al., 1993). Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva jsou do značné míry ovlivněny jeho nehomogenitou. Nehomogenita dřeva je způsobena různorodým uspořádáním jeho stavebních elementů, a to jak na chemické (uspořádání atomů a molekul), tak i jeho submikroskopické, mikroskopické a makroskopické úrovni. S touto nehomogenitou je spojena anizotropie. Dřevo je anizotropní materiál, tedy takový materiál, jehož fyzikální a mechanické vlastnosti jsou závislé na směru (podélný, radiální, tangenciální) v kterém byly sledovány. Anizotropie dřeva může být zkoumána na mnoha úrovních od jednotlivých vrstev buněčné stěny přes buňku až po dřevo jako celek stavebních elementů. (Bodig a Jayne, 1982).

Jak už bylo výše zmíněno anizotropie dřeva znamená, že se dřevo vyazuje různými vlastnostmi v závislosti na tom, v jakém směru je dřevo zatěžováno, respektive v jakém směru jsou hodnoty určité vlastnosti zjišťovány. Anizotropie je tedy výsledkem orientace uspořádání základních stavebních pletiv dřeva. Ve dřevě rozlišujeme tři základní směry, a to podélný, radiální, tangenciální. Pro toto jednoznačné určování směrů je potřebné dřevu (kostce dřeva) přiřadit souřadnicový systém navzájem kolmých anatomických směrů. Orientace navzájem kolmých směrů se nazývá ortogonální. Pokud je dřevo do tohoto systému zařazeno mluvíme o něm, jako o ortogonálně anizotropním (ortotropním) materiálu (Babiak, 2001; Čunderlík, 2009). Zjednodušené uložení dřeva v systému navzájem kolmých směrů je uveden níže na obrázku (obr. 11).



Obrázek 11 - Základní směry a řezy ve dřevě (Borůvka, 2016)

Na obrázku (obr. 11) lze pozorovat jednotlivé základní směry, a to podélný (L), radiální (R) a tangenciální (T). Kombinací těchto základních směrů lze definovat i řezy, a to řez příčný (TR), radiální (LR) a tangenciální (LT). Podélný (axiální) směr je orientován s podélnou osou kmene, tedy je shodný s orientací většiny základních stavebních elementů (libriformní vlákna, cévy, cévice atd.) dřeva. Směr radiální probíhá kolmo k ploše tangenciálního řezu, a tedy i k letokruhům. Směr tangenciální je kolmý k ploše radiálního řezu a s letokruhy tvoří tečnu (Borůvka, 2016). Z praktického hlediska má toto členění velký význam, jelikož rozdíly hodnot zkoumané vlastnosti v závislosti na směrech mohou být značně velké. Anizotropie našla uplatnění i v této práci, kde jsou sledovány rozdíly ve výsledných hodnotách vybraných vlastností (pevnost v ohybu při statickém a dynamickém zatížení) v závislosti na směru zatížení (radiální, tangenciální).

3.7 Hodnocené fyzikální a mechanické vlastnosti

3.7.1 Vlhkost dřeva

Vlhkost dřeva lze definovat jako přítomnost vody ve dřevě. Dřevo je hygroskopický materiál a vždy vodu v nějaké formě obsahuje. Voda ve dřevě do značné míry ovlivňuje jeho vlastnosti, a to často negativním způsobem. Vlhkost dřeva patří mezi základní parametry při jeho technologickém zpracování. S měnící se vlhkostí jsou spojovány změny fyzikálních a mechanických vlastností (rozměry, hustota, pevnost

atd.) a odolnost dřeva proti biotickým činitelům (plísňe, houby, dřevokazný hmyz) (Novák, 2018).

Pro praktické využití se používají dva základní vzorce, kde první je vyjádřen poměrem hmotnosti vody k hmotnosti absolutně suchého dřeva (absolutní vlhkost) a druhý je vyjádřen poměrem hmotnosti vody k hmotnosti mokrého dřeva (relativní vlhkost).

Absolutní vlhkost se používá pro vystižení fyzikálních a mechanických vlastností dřeva a je vyjádřena následujícím vzorcem:

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

m_w – hmotnost vlhkého dřeva [kg],

m_0 – hmotnost absolutně suchého dřeva [kg].

Relativní vlhkost (w_{rel}) nalézá upotřebení tam, kde je nutné znát procentuální zastoupení vody v mokré dřevě. Nejčastěji je tato vlhkost zjišťována u váhových přejímek surovin, a to například v celulózo-papírenském průmyslu. Relativní vlhkost je vyjádřena následujícím vzorcem:

$$w_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 \text{ [%]}$$

(Horáček, 1998; Ross et al., 2010).

3.7.1.1 Rozdělení vody ve dřevě

Na základě uložení vody ve dřevě ji lze rozdělit na vodu volnou (kapilární), vodu vázanou (hygroskopickou) a vodu chemicky vázanou (molekulární). Kapilární voda vyplňuje buněčné dutiny (lumény) a mezibuněčné prostory. Tato voda se vyskytuje až nad mezí nasycení buněčných stěn, která je u dřeva našich druhů dřevin v rozmezí absolutní vlhkosti 22-30 % (Horáček, 1998). Z technologického hlediska se výskyt této vody sleduje například při plastifikaci u výroby ohýbaného nábytku, kde je její přítomnost považována za nežádoucí faktor, jelikož znemožňuje ohýbání. Hygroskopická voda se ve dřevě vyskytuje od 0 % absolutní vlhkosti až po mez hygroskopicity, která je rozdílná v závislosti na druhu dřeviny, a její anatomické a chemické stavbě. Tato voda je přítomná v buněčných stěnách a je

vázána pomocí vodíkových můstků na hydroxylové skupiny (OH) v amorfni části celulózy a hemicelulózy. Tato vlhkost má hlavní význam z technologického hlediska a při určování fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Molekulární (chemicky vázaná) voda se podílí na struktuře chemických sloučenin a její výskyt ve dřevě se zjišťuje prostřednictvím chemických analýz. Její podíl na sušině dřeva je v rozmezí 1-2 % a standardním sušením ji nelze ze dřeva odstranit. Při určování fyzikálních a mechanických vlastností dřeva se o ni neuvažuje a nemá prakticky žádný význam (Gandelová, 2009).

3.7.1.2 Mez hygroskopicity a mez nasycení buněčných stěn

Mez nasycení buněčných stěn ve dřevě lze definovat jako stav buněk, při kterém jsou buněčné stěny maximálně nasycené vodou, ale jejich lumény a mezibuněčné prostory neobsahují žádnou vodu (hranice mezi vodou vázanou a volnou). Tato definice se zakládá na předpokladu, že dřevo bylo delší dobu vystaveno kapalnému prostředí (uloženo ve vodě). Vliv teploty na dosažení tohoto stavu není významný. Bod nasycení vláken je závislý od druhu dřeviny, respektive na anatomické struktuře dřeva a jeho chemickém složení. U dřeva našich druhů dřevin se tento bod pohybuje v rozmezí 22-35 % absolutní vlhkosti.

U meze hygroskopicity se také stanovuje hranice mezi vodou vázanou a volnou ale její stanovení se liší především prostředím, kterému je dřevo vystavené. Mez hygroskopicity je takový stav (rovnovážné vlhkosti), kterého dřevo dosáhne při dlouhodobém vystavení plynnému prostředí (vzduchu) za předpokladu, že relativní vlhkosti vzduchu dosahuje téměř plného nasycení. Mez hygroskopicity je ovlivněna teplotou okolního prostředí, kterému je dřevo vystaveno a s rostoucí teplotou klesá (Horáček, 1998).

3.7.1.3 Metody stanovení vlhkosti

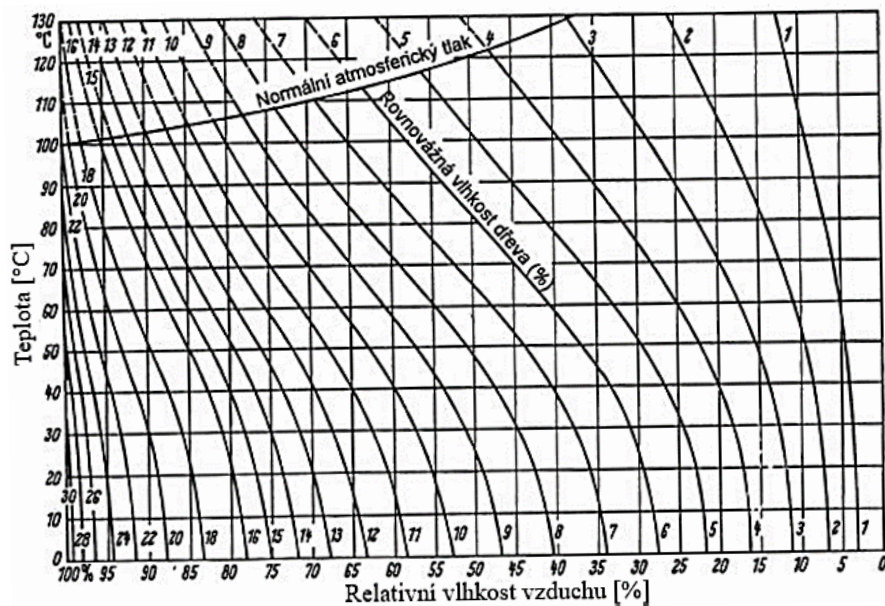
V laboratorních podmínkách při určování fyzikálních a mechanických vlastností dřeva se vlhkost zkušebních těles nejčastěji stanovuje na základě normy ČSN 49 0103. Tato norma určuje rozměry zkušebních těles s povolenými odchylkami, základní postup při získávání potřebných hodnot a obecný vzorec pro výpočet absolutní vlhkosti. V souladu s touto normou se postupovalo i v případě této práce (ČSN 49 0103).

Pro zjišťování vlhkosti ve dřevě existuje spousta postupů. Podle jejich charakteristiky lze tyto postupy rozdělit na dvě skupiny, a to na metody přímé a nepřímé. Přímé (absolutní) metody se zakládají na zjištění skutečného obsahu vody ve dřevě, nejpoužívanější z této skupiny je metoda gravimetrická (váhová), destilační a jodometrická titrace. Tyto metody jsou poměrně časově náročné, ale umožňují přesné zjišťování vlhkosti, a to i nad mezí hygroskopicity. Nepřímé (relativní) metody se zakládají na zjišťování vlhkosti prostřednictvím získávání hodnot jiné veličiny, jejíž hodnoty jsou závislé na množství vody obsaženém ve dřevě. Z této skupiny se v praxi nejčastěji používá metoda elektro-fyzikální (dielektrická, odporová), radiometrická a akustická. Výhoda časové nenáročnosti těchto metod je potlačena na úkor menší přesnosti měření a nemožnosti zjišťování vlhkosti nad mezí hygroskopicity (Šlezingerová, 1998; Požgaj, 1993).

3.7.1.4 Faktory ovlivňující vlhkost dřeva

Mezi základní činitele ovlivňující vlhkost dřeva patří stavba a hustota dřeva, dále také teplota, a to jak samotného dřeva, tak okolního prostředí. Do těchto faktorů dále spadá mechanické namáhání dřeva, které ovlivňuje jeho sorpci. U rostoucího stromu se vlhkost v kmeni mění jak v jeho vertikální, tak horizontální poloze. U jehličnatých dřevin je pozorován výrazný rozdíl mezi jádrovou a bělovou částí kmene, kde jádrová část se vykazuje třikrát až čtyřikrát menší vlhkostí než bělová část kmene. U dřeva listnatých dřevin, a to jak s jádrem, tak bez jádra nejsou pozorovány až takové vlhkostní rozdíly mezi obvodovou a středovou částí kmene a vlhkost je rozložena rovnoměrněji. Po výšce stromu se vlhkost u jehličnatých dřevin se stoupající výškou zvyšuje, zatímco u listnatých dřevin se téměř nemění. Vlhkost dřeva rostoucího stromu je do značné míry závislá na jeho věku a na klimatických podmínkách. Hodnoty vlhkosti se mění nejen v průběhu ročních období, ale také v průběhu dne (Tsoumis, 1991; Horáček, 1998). U zpracovaného dříví (řezivo) je důležitá vlhkost po mez hygroskopicity, která je značně ovlivněna teplotou okolního prostředí a relativní vlhkostí vzduchu. Jelikož je dřevo hygroskopický materiál, tak dokáže měnit svoji vlhkost podle podmínek okolního prostředí (relativní vlhkost vzduchu, teplota). Pokud se vlhkost dřeva ustálí za předem daných podmínek je tato vlhkost označována jako rovnovážná a stav, kterého se tímto způsobem docílilo se označuje jako stav vlhkostní rovnováhy

(Gandelová, 2009). Závislost vlhkosti dřeva na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu za normálního atmosférického tlaku znázorněn níže na obrázku (obr. 12).



Obrázek 12 - Závislost vlhkosti dřeva na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu (podle Kollmanna a Cotého, 1968)

3.7.2 Hustota

Hustota dřeva se vyjadřuje podílem jeho hmotnosti a objemu. Nejčastěji se tato veličina vyjadřuje v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ nebo $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Vzhledem k tomu, že je dřevo hygroskopický materiál, tak se jeho hustota určuje obtížněji než u jiných materiálů, jelikož jsou jeho poměrové veličiny (hmotnost a objem) vlhkostí značně ovlivněny. I přes tento fakt, je hustota dřeva jedním z nejpodstatnějších charakteristických znaků, který ovlivňuje převážnou část jeho fyzikálních a mechanických vlastností. Na základě těchto skutečností je hustota dřeva jedním ze základních ukazatelů při výběru a volbě vhodnosti pro jeho další zpracování (mechanické, chemické) nebo způsobu použití (Požgaj et al., 1993).

Druhy dřevin lze rozdělit podle jejich hustoty dřeva, nicméně toto dělení se může v různých publikacích lišit, a to především v rozsahu hustot, do kterých jednotlivé druhy dřevin spadají. Jednotlivé druhy dřevin lze rozdělit podle hustoty suchého dřeva následovně:

- velmi lehké (<400 kg·m⁻³) – topol,
- lehké dřevo (400-500 kg·m⁻³) – jedle, smrk, borovice, lípa,
- mírně těžké (500-600 kg·m⁻³) – vrba, javor, modřín,
- středně těžké (600-700 kg·m⁻³) – bříza, ořech, jasan, jilm, dub, buk,
- těžké (700 kg·m⁻³ a více) – habr, akát, (Čunderlík, 2009).

Podle rozdílných charakteristik poměrových veličin lze hustotu rozlišit na hustotu dřevní substance, hustotu dřeva a redukovanou hustotu dřeva (Matovič, 1993).

3.7.2.1 *Hustota dřevní substance*

Lze ji chápat jako hustotu buněčných stěn, tedy bez buněčných dutin (lumenů), mezibuněčných prostor a jiných submikroskopických dutin. Tato hustota je definována vztahem:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} [kg \cdot m^{-3}]$$

m_s – hmotnost dřevní substance [kg],

V_s – objem dřevní substance [m³] (Gandelová, 2009).

Hustota dřevní substance se pohybuje v rozmezí 1440–1570 kg · m⁻³ a je ovlivněna způsobem jejího zjišťování a chemickém složení dřeva. Buněčná stěna je tvořena základními stavebními látkami s odlišnou průměrnou hustotou (celulóza 1560 kg · m⁻³, hemicelulózy 1500 kg · m⁻³, lignin 1350 kg · m⁻³). Nicméně zastoupení základních stavebních biopolymerů buněčné stěny (vyjádřený průměrem jejich obsahu v anatomických elementech buněk všech pletiv) je u různých druhů dřevin velmi podobné a v důsledku toho nejsou zaznamenávány až tak velké rozdíly v hustotě dřevní substance. Průměrná hodnota této veličiny (ρ_s) se pro všechny dřeviny uvádí 1530 kg · m⁻³. Zjišťování potřebných hodnot pro výpočet probíhá pomocí vážení (hmotnost) a výtlačku tekutiny (objem) látkami nezpůsobující bobtnání (benzen, toluen). Hustota dřevní substance má význam při výpočtech pórovitosti, maximální nasákivosti a je také uplatněna v technologických procesech impregnace dřeva (Horáček, 1998; Solár, 2004).

3.7.2.2 *Hustota dřeva*

Lze ji definovat jako podíl hmotnosti dřeva v přirozeném stavu a jeho objemu. Z hlediska charakteristiky hustoty se používají následující stavy:

- Hustota dřeva v suchém stavu ($w_{\text{abs.}} = 0 \%$),
- Hustota vlhkého dřeva ($w_{\text{abs}} > 0 \%$),
- Hustota dřeva při vlhkosti ($w_{\text{abs}} = 12 \%$) (Gandelová, 2009).

Z praktického hlediska se nejčastěji zjišťuje hustota dřeva při neurčité vlhkosti, která je dána vztahem:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} [kg \cdot m^{-3}]$$

m_w – hmotnost dřeva při vlhkosti w [kg],

V_w – objem dřeva při vlhkosti w [m^3], (Požgaj et al., 1993, ČSN 49 0108).

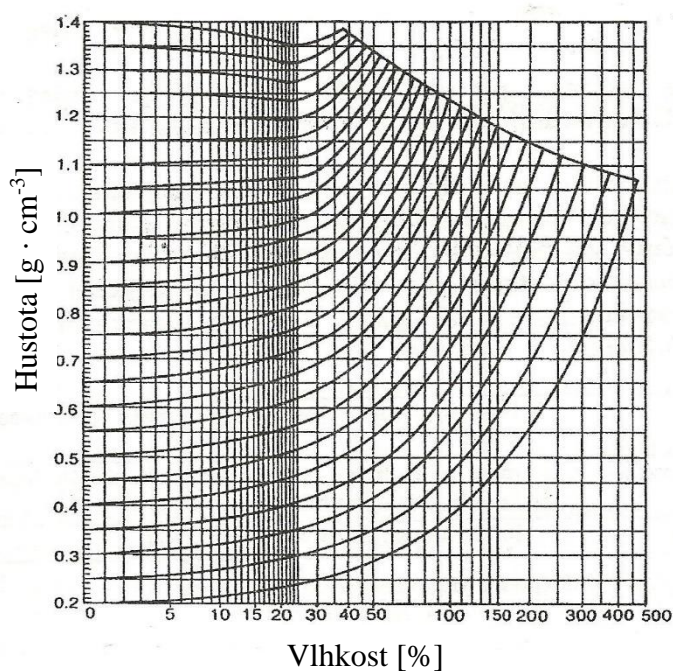
Hustota dřeva v suchém stavu nalézá také časté uplatnění při porovnávání výsledků a teoretických výpočtech. Vzorec pro výpočet se oproti předcházejícímu liší pouze ve vlhkostních indexech jednotlivých veličin, které jsou nahrazeny indexem (0). Tento index značí že výsledná hodnota veličiny byla vypočtena na základě získání hodnot podílových veličin při nulové vlhkosti. Dalším případem je hustota při 12% absolutní vlhkosti. Číselné označení vlhkosti i v tomto případě nahrazuje indexy veličin a výpočet se provádí stejným pravidlem jako u předcházející vlhkosti. S požadavkem na tuto vlhkost se setkáváme u většiny norem týkajících se problematiky a zkoušení dřeva. Této vlhkosti by se mělo dosáhnout při dlouhodobém vystavení dřeva neměnným podmínkám okolního prostředí (např. teplota 20 °C a relativní vlhkost vzduchu 65 %). Nicméně ne vždy je této vlhkosti dosaženo a v případě potřeby se používají přepočtové vzorce na hustotu při požadované vlhkosti (Matovič, 1993; Horáček, 1998).

3.7.2.3 Redukovaná hustota

Redukovaná hustota (ρ_{rw}) udává, kolik sušiny se nalézá v nabobtnalém objemu dřeva. Je vyjádřena podílem hmotnosti absolutně suchého dřeva (m_0) a objemu při určité vlhkosti (V_w). Se stoupající vlhkostí hodnota redukované hustoty klesá, a to až po mez hygroskopicity. Nad touto mezí se hodnota již nemění, jelikož dřevo už dále nebobtná. Nad mezí hygroskopicity je tato hustota také označována jako konvenční (ρ_k), která nalézá uplatnění především při váhových přejímkách suroviny (celulózo-papírenský průmysl) (Gandelová, 2009).

Všechny výše zmíněné hustoty upravuje norma (ČSN 49 0108). Tato norma uvádí základní pravidla a postupy při získávání hodnot pro stanovení jednotlivých hustot. Uvádí také potřebné vzorce pro jejich výpočet. V normě také nechybí přepočtový vzorec na hustotu při požadované vlhkosti (ČSN 49 0108).

Za předpokladu, že je známa hustota dřeva v absolutně suchém stavu, lze hustotu dřeva určit při jakékoliv známé vlhkosti pomocí nomogramů (Kollmann, 1951). Příklad nomogramu je uveden níže na obrázku (obr. 13).



Obrázek 13 - Vliv vlhkosti na hustotu (podle Kollmanna, 1951)

3.7.2.4 Vliv některých faktorů na vlhkost dřeva

Mezi hlavní faktory ovlivňující tuto vlastnost se řadí vlhkost, chemické složení dřeva, věk stromu, poloha v kmeni, šířka letokruhů a podíl letního dřeva v letokruzích. Dále se do těchto faktorů řadí stanovištní a pěstební podmínky a některé vady dřeva (suky, reakční dřevo atd.) (Požgaj et al., 1993, Tsoumis, 1991). Vliv vlhkosti na hustotu je již popsán výše v textu.

Hustota dřeva je ovlivněna jeho chemickým složením, a to nejen zastoupením základních stavebních látek buněčné stěny (celulóza, hemicelulózy, lignin), ale i doprovodnými a extraktivními látkami zvyšující hustotu dřeva především u jádrových dřevin (Horáček, 1998). Hustota dřeva je také ovlivněna šířkou letokruhů a podílem letního dřeva v nich. Tsoumis (1991) ve své práci uvádí, jak moc se

hustota mění v letokruhu u jednotlivých dřevin. Z jeho poznatků je jasné, že podíl letního dřeva má vliv na hustotu především u jehličnatých dřevin, u dřeva listnatých s kruhovitě pórovitou stavbou jsou tyto rozdíly také patrné, ale ne tak velké jako v případě jehličnatých dřevin. Nejmenší rozdíly byly pozorované u listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou. Tsoumis (1991) také uvádí, že se stoupající šířkou letokruhů se hustota dřeva jehličnatých dřevin snižuje, u listnatých dřevin se tato závislost projevuje s opačným trendem. Hustota dřeva se také mění v závislosti na poloze v kmeni a mění se jak s jeho výškou (od báze ke koruně), tak po jeho průměru (od dřeně k obvodu kmene). Tato závislost je značně variabilní a liší se jak ve dřevě jednotlivých druhů dřevin, tak i v rámci jedné dřeviny (Tsoumis, 1991).

3.7.3 Šíření zvuku ve dřevě

Zvukem se rozumí mechanické vlnění, které se šíří v hmotném prostředí. Pro jeho přenos je nutná existence hmotného prostředí, jelikož zvukové vlnění je uspořádaný kmitavý pohyb molekul, na základě, kterého se zvuk přenáší prostřednictvím navzájem působících sil mezi molekulami (Horáček, 1998). Na základě tohoto faktu je šíření zvuku závislé na prostředí. Vztah mezi zvukem a prostředím v kterém se šíří, lze využít u nedestruktivních metod zkoušení materiálů (Bucur a Timell, 2006). Pro lidské ucho jsou zachytitelné zvukové vlny s frekvencí 16-20 000 Hz (Gandelová, 2009). Zvuk jako mechanické vlnění je charakterizováno vlnovou délkou, amplitudou vlnění, frekvencí a rychlostí šíření. Rychlost zvukových vln (c) je závislá na frekvenci a vlnové délce, tento vztah lze vyjádřit pomocí rovnice:

$$c = \lambda \cdot f [m \cdot s^{-1}]$$

, kde:

λ – vlnová délka [m],

f – frekvence [Hz], (Požgaj et al., 1993).

Rychlost zvuku (zvukových vln) je závislá na prostředí, ve kterém se šíří. Zvukové vlny se ve dřevě šíří buď podélně, nebo příčně. Jejich rychlost šíření ve dřevě se může ve velmi zjednodušeném vztahu vyjádřit následujícím vzorcem:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} [m \cdot s^{-1}]$$

E – Youngův modul pružnosti [MPa],

ρ – hustota dřeva [$kg \cdot m^{-3}$], (Gandelová, 2009).

Jelikož je dřevo anizotropní materiál, tak i rychlost šíření zvuku má tento charakter. Obecný poměr jednotlivých hodnot rychlosti šíření zvuku (podél vláken, napříč vláken v radiálním a tangenciálním směru) je:

$$c_{II} : c_r : c_t = 15 : 5 : 3$$

(Gandelová, 2009; Matovič, 1993).

Látka vibruje, pokud na ni působí periodické síly. Pokud dřevo při určitých frekvencích dosahuje maximálních amplitud vibrace, tak jsou tyto frekvence označovány jako vlastní frekvence dřeva (rezonanční frekvence). U dřeva a látek jemu podobných se vyskytují nejčastěji tři druhy vibrací, a to podélné, příčné a torzní (Matovič, 1993). Pokud dřevo nevibruje periodicky, amplitudy se snižují a vrací se do klidu. Vzniklá energie je rozptýlena, a to částečně radiací zvuku a částečně vnitřním třením. U dřeva ve vztahu se zvukem se nejčastěji charakterizují vlastnosti jako je rychlost šíření zvuku, rezonance, akustický vlnový odpor, součinitel zvukové pohltivosti atd. (Horáček 1998). Vztah zvuk-dřevo nalézá široké uplatnění jak při výrobě hudebních nástrojů, tak při určování jeho vlastností. Při určování jeho vlastností se například využívá nedestruktivních metod. Mezi tyto metody se například řadí metoda akustické emise nebo ultrazvuková metoda (Bucur, 2006). Ultrazvukových metod bylo využito i v této práci, a to na potvrzení vzájemné paralelnosti zkušebních těles. Postupy při získávání potřebných dat jednotlivými metodami jsou popsány v kapitole 4.3.2.

3.7.3.1 Vybrané faktory ovlivňující rychlost šíření zvuku ve dřevě

Jelikož je dřevo nehomogenní, anizotropní hygroskopický materiál s pórovitou strukturou, tak jeho vlastnosti v menší či větší míře ovlivňují šíření zvukových vln (Požgaj et al., 1993). Ultrazvukové vlny se v podélném směru šíří rychlostí 5000-6000 $m \cdot s^{-1}$. V příčném směru (kolmo na vlákna) se šíří rychlostí 1000-2000 $m \cdot s^{-1}$, kde rychlost v radiálním směru bývá o 40-50 % větší než v tangenciálním směru. Zvuková vlna během průstupu materiálem mění svojí frekvenci a v důsledku toho dochází ke ztrátám vysokofrekvenční části (tlumivost). Tlumivost dřeva je v příčném směru asi o řád větší než ve směru podélném (Beall, 2002). Rychlost

šíření zvuku je také do značné míry ovlivněna vlhkostí, kdy s rostoucí vlhkostí dřeva rychlost zvukové vlny klesá (Horáček, 1998). Rychlost šíření zvuku se zvyšuje s rostoucí hustotou dřeva, nicméně tento růst není nikterak výrazný a intenzita této závislosti se liší od druhu dřeviny. Jak již bylo výše zmíněno rychlost zvuku je závislá na orientaci dřevních vláken, respektive na směru jeho šíření, s touto skutečností je také spojen odklon dřevních vláken od podélné osy. Rychlost zvuku s rostoucím odklonem dřevních vláken klesá a k maximálnímu útlumu zvukové vlny dochází při odklonu vláken od podélné osy v rozmezí 45-60° (Beall, 2002). Rychlost zvuku se také mění při výskytu vad (hniloba, suky atd.), kdy s rostoucím výskytem těchto vad rychlost zvuku klesá (Reinprecht, 2012; Beall, 2002).

3.7.4 Šířka ročních letokruhů

Letokruh lze charakterizovat jako radiální (tloušťkový) přírůst dřeva. Tento tloušťkový přírůstek se vytváří během vegetačního období a je výsledkem dělivých buněk kambia, jehož činnost bývá z pravidla periodická, a to až na některé výjimky (tropické dřeviny). Jeden letokruh u dřevin vyskytujících se v mírném a chladném pásmu odpovídá přírůstku dřeva za jeden rok, jelikož je tento růst přerušen obdobím vegetačního klidu. Zásadou tohoto období jsou jednotlivé roční přírůsty celkem dobře rozeznatelné, a to až na některé druhy dřevin. Výjimku v ročních přírůstech tvoří takzvané nepravé letokruhy, které bývají nejčastěji zdvojené a vznikají v důsledku působení nepříznivých vlivů (biotických a abiotických činitelů). U stálezelených dřevin tropických a subtropických oblastí se dřevo tvoří kontinuálně, jelikož doba růstu není přerušena obdobím vegetačního klidu. Rozeznatelnost jednotlivých přírůstků je u těchto dřevin značně komplikovaná a jednotlivé přírůstky se nekryjí s věkem stromů, ale například se střídáním období sucha a dešťů (Gandelová, 2009). S přihlédnutím ke kmeni stromu lze jeho letokruhy přirovnat k soustavě navzájem propojených kuželovitých plášťů. Letokruh se na příčném řezu jeví ve formě oválných tvarů, na tangenciálním jako parabolické útvary a na radiálním jako rovnoběžné pásy. Šířka letokruhů je závislá na druhu dřeviny, klimatických podmínkách atd. Šířka letokruhu se u hospodářsky významných dřevin ČR pohybuje v rozmezí 1-5 mm, ale například u topolu (za příznivých podmínek) může tento přírůstek dosahovat až 15 mm. Jednotlivé

letokruhy jsou složeny ze dvou odlišných vrstev dřeva v závislosti na tom, zda vznikaly v jarním nebo letním období. Vrstvy se od sebe liší podílem a výskytem stavebních elementů dřeva (cévy, cévice, parenchym atd.), hustotou, barvou a zastoupením jednotlivých chemických látek a jsou označovány jako jarní a letní dřevo. Rozdíl mezi jarním a letním dřevem je dobře znatelný u dřeva jehličnatých dřevin a listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou. U dřeva listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou není rozdíl mezi jarním a letním dřevem znatelný (Požgaj et al., 1993).

3.7.4.1 Stanovení šířky letokruhů

Vědecká disciplína zabývající se rozborem tloušťkových přírůstků dřeva se nazývá dendrochronologie. Základní postup této metody spočívá v získání vývrtů či výřezových kotoučů z kmene stromu. Na opatřeném materiálu se z jeho příčných řezů měří šířka jednotlivých letokruhů, případně podíl jarního a letního dřeva na šířce letokruhu. Základní pravidla a postupy při zkouškách upravuje norma ČSN 49 0102. Podle této normy se postupuje v případě zjišťování přímé šířky letokruhů a přímého podílu letního dřeva, který je dán vztahem:

$$\%ldř = \frac{\text{\textit{šldř}}}{\text{\textit{šl}}} \cdot 100 [\%]$$

$\%ldř$ – podíl letního dřeva [%],

$\text{\textit{šldř}}$ – šířka letního dřeva [mm],

$\text{\textit{šl}}$ – šířka letokruhu [mm],

(Šlezingerová, 1998; ČSN 49 0102).

Výše popsany způsob nalézá především uplatnění v určování věku stromů, toto datování nalézá široké uplatnění i v dalších vědeckých odvětvích jako je dendroklimatologie nebo dendroekologie. Tyto odvětví zkoumají vztahy mezi jednotlivými přírůsty dřeva a vlivy okolního prostředí (klimatické podmínky, nepříznivé podmínky atd.) (Gandelová, 2009). Pokud je potřeba zjistit šířky jednotlivých letokruhů na zkušebních tělesech, může se postupovat při této analýze jinou metodou než výše uvedenou. Postup této metody může být založen v naskenování čelních ploch zkušebních těles a následovného zpracování získaných

snímků pomocí hardwarového a softwarového vybavení. Na základě této metody se postupovalo i v případě této práce.

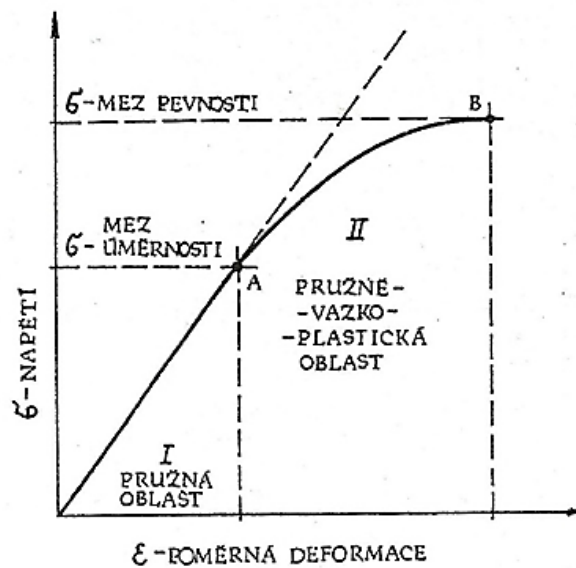
3.7.4.2 Vliv některých faktorů ovlivňující šířku letokruhů.

Ze samé podstaty věci je zřejmé, že šířka a struktura letokruhu závisí především na druhu dřeviny, ale také závisí na stáří stromu, pěstebních opatřeních, klimatických podmínkách, místě výskytu atd. Šířka a struktura je tedy ovlivněna souborem činitelů, které působí na dřevinu v dané lokalitě (Šlezingerová, 1998).

Šířka letokruhů je do značné míry ovlivněna stářím stromu, kdy se stoupajícím věkem se šířka jednotlivých letokruhů snižuje, a to ve směru od dřeně k obvodu kmene. Na tuto hodnotu má také vliv poloha v kmeni, kdy se stoupající výškou (od báze k vrcholu) šířka letokruhů stoupá. Nicméně tyto hodnoty nemusí být vždy pravidlem, jelikož je ovlivňují klimatické podmínky (např. dlouho trvající období sucha v ČR) a pěstební podmínky. Pokud se silně zastíněná světlomilná dřevina dostane ze zástínu prostřednictvím pěstebních opatření (prořezávka, těžba atd.), může u ní dojít v následujících letech k razantním tloušťkovým přírůstkům. Šířka letokruhů se u dřevin mění také v závislosti na stanovištních podmínkách (severní a jižní stráž, nadmořská výška, doba vegetačního období atd.). Se stanovištními podmínkami je též spojena váha a kvalita půdy. Požadavky dřevin na tyto podmínky jsou značně rozličné a závislé na druhu dřeviny. U většiny druhů dřevin je pozorována poměrně silná závislost hustoty dřeva na šířce letokruhů (Gandelová, 2008; Kollmann a Coté, 1968).

3.7.5 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva lze definovat jako jeho schopnost odolávat proti porušení, které je způsobeno účinkem mechanického zatížení. Tato vlastnost (pevnost) je číselně vyjádřena napětím, při kterém se těleso poruší a v důsledku toho je zasažena i soudržnost dřeva. Hranice, nad kterou k takovému stavu dochází je nazývána jako mez pevnosti (Šlezingerová, 1998 b). Obecný tvar pracovního diagramu, který zjednodušeně reprezentuje vztah mezi napětím a deformací při konstantní rychlosti zatěžování, je uveden níže na obrázku (obr. 14).



Obrázek 14 - Obecný tvar pracovního diagramu (Matovič, 1993)

Obecný napětí-ově-deformační (pracovní) diagram lze klasifikovat na dvě části. První lineární část deformační čáry končí na bodu A, a tudíž na mezi úměrnosti (σ_u). Druhá nelineární část začíná na mezi úměrnosti a je zakončena na bodě B, a tedy na mezi pevnosti (σ_p). Při zatížení tělesa mohou nastat rozdílné stavy, které jsou závislé na druhu materiálu, intenzitě působících vnějších sil atd. Pokud těleso zatěžíme jen do meze úměrnosti (bod A), tak se těleso po uvolnění působících vnějších sil vrací do původního stavu, jelikož vznikají pouze pružné (elastické) deformace. Při tomto stavu je napětí v tělese rovnoměrně rozloženo (Gandelová, 2009; Bodig a Jayne, 1982). V lineární oblasti (pružná oblast), kde platí přímá úměra mezi napětím a deformací, lze uplatnit Hookeův zákon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

σ – napětí [Pa],

E – modul pružnosti [Pa],

ε – poměrná deformace,

(Matovič, 1993).

Pokud těleso zatěžíme nad mezí úměrnosti, tak deformace s rostoucím napětím stále vzrůstá, avšak napětí a deformace již nejsou v přímé úměře a deformační čára se mění na křivku. Při tomto stavu už není napětí v tělese rozdělené

rovnoměrně. Po uvolnění působících vnějších sil deformace úplně nezaniká. V pružně-vazko-plastické oblasti vznikají mimo pružných deformací také deformace pružné v čase (viskoelastické) a trvalé (plastické) deformace. K porušení tělesa dochází při napětí nad mezí pevnosti (σ_p). Pružné deformace, které vznikají do meze pevnosti, se na molekulární úrovni projevují zatěžováním vodíkových vazeb mezi jednotlivými polymerovými řetězci, což způsobuje jejich lámání a následnému přetváření vodíkových vazeb. U kovalentních vazeb dochází k deformaci jen v rozsahu benzenového jádra. Na submikroskopické úrovni buněčné stěny se fibrilární struktury v tomto případě posouvají a k trvalým zlomům nedochází. Nad mezí úměrnosti dochází jak k porušení vodíkových vazeb, tak k porušení benzenových jader. V důsledku těchto faktů vznikají nevratné zlomy, které se projevují jako plastické deformace. Podíly jednotlivých deformací na celkové deformaci jsou velmi variabilní a závislé na druhu dřeviny a druhu mechanického namáhání, obsahu vlhkosti atd. (Požgaj et al., 1993; Bodig a Jayne, 1982).

3.7.5.1 Rozlišení pevnosti podle fyzikální povahy veličin

Na základě fyzikální povahy veličin, kterými charakterizujeme pevnost, lze pevnost rozlišit na tři druhy:

Konvenční pevnost

Tuto pevnost lze formulovat jako největší možné napětí, které vystihuje určitý stav při zatížení. Tato pevnost je vyjádřena jako největší napětí, které je vztaženo k základnímu průřezu zkušební vzorku. Ve dřevě tato pevnost nachází uplatnění pouze u pevnosti dřeva v tlaku napříč vláken, kde se na základě stanovených kritérií zjišťuje konvenční mez pevnosti.

Skutečná pevnost

Skutečná pevnost popisuje skutečné napětí, kterého je dosaženo v momentě porušení tělesa. Jako příklad lze uvést jednoosé zatížení zkušební tělesa v tahu, kde se pevnost stanoví podílem síly a plochy příčného průřezu tělesa.

Ideální pevnost

Ideální pevnost dřeva se dá definovat, jako nejvyšší teoretická hodnota pevnosti dřeva, které lze dosáhnout u příslušné dřeviny za určitých podmínek zatěžování. Tato pevnost se dá teoreticky vypočítat na základě vazbových sil, které vznikají mezi atomy. Aplikace výpočtů je vhodná především u kovů, plastů a podobných materiálů. Z důvodu chemického složení dřeva a výskytu různých druhů vazeb by byl tento výpočet pro dřevo značně složitý, spíše nepravděpodobný (Požgaj et al., 1993).

3.7.5.2 Rozdělení pevnosti dřeva

Získávání hodnot pevnosti dřeva se uskutečňuje pomocí zkoušky. Zkouška pro stanovení pevnostní vlastnosti musí probíhat za určitých podmínek. Dodržování musí být také zkušební postup, prostřednictvím kterého se docílí získání hodnot. Všechna tato opatření vedla k zavedení závazných pravidel (norem), které určují zkušební metody a podmínky, při kterých má zkoušení probíhat. Zásadou těchto pravidel je možné vlastnosti navzájem porovnávat.

Pevnostní vlastnosti dřeva lze rozdělit podle různých hledisek, a to:

- podle stavu napjatosti – jednoosý, víceosý,
 - podle způsobu zatížení – tah, tlak, ohyb, smyk a krut,
 - podle účinků zatížení na dřevo – nedestruktivní a destruktivní,
 - podle časového průběhu zatížení – statické, dynamické,
- (Gandelová, 2009).

3.7.5.3 Klasifikace pevnosti podle způsobu a času zatížení

Na hodnoty pevnostních vlastností materiálu má značný vliv způsob zatěžování a doba trvání působících vnějších sil. Za existence tohoto faktu rozeznáváme zatížení dynamické, statické, trvalé kmitavé a trvalé statické.

Dynamické zatížení

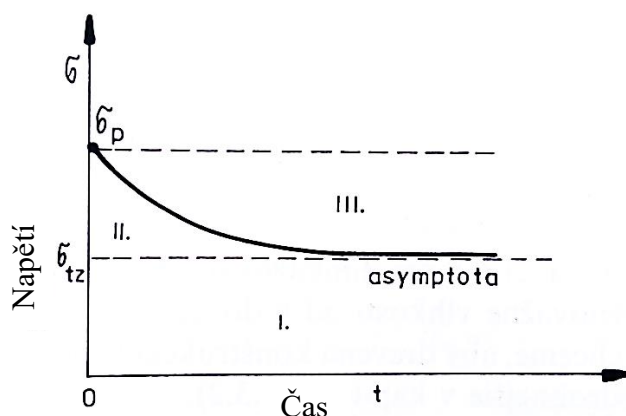
Toto zatížení působí na materiál náraz a plnou silou. Dynamické zatížení působí na materiál ve zlomku sekundy, a to nejčastěji v rámci milisekund. Je vyjádřeno v množství vykonané (spotřebované) práce. Tímto druhem zatížení se podrobněji zabývá kapitola 3.7.6.

Statické zatížení

Jedná se o zatížení nepřerušované s rovnoměrně vzrůstající tendencí. Tempo zatěžování je značně menší, než rychlost šíření deformace (Babiak, 2001). Někteří autoři uvádí (Požgaj, 1993), že doba od zahájení zatěžování tělesa až po jeho porušení by měla být v rozmezí 2-4 minut. Avšak čas se podle typu použitých norem může značně lišit, například norma pro zjišťování meze pevnosti ve statickém ohybu uvádí časový rozsah $1,5 \pm 0,5$ minut (ČSN 49 0115). Dodržení závazných pravidel je nutné, jelikož rychlý nárůst zatížení způsobuje růst hodnot vlastností dřeva. V průběhu zkoušek na zkušebních strojích, prostřednictvím kterých se stanovují vlastnosti dřeva při statickém zatížení, by rychlost zatěžování neměla přesáhnout hodnotu $500 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$ na celý zkušební vzorek. Mírou tohoto zatížení je nejčastěji mez pevnosti, kde nad její hranicí již dochází k porušení zkušebního tělesa (Matovič, 1993).

Trvalé statické zatížení

Trvalou statickou pevnost lze definovat, jako takovou míru mechanického napětí, kterému je schopné dřevo odolávat bez jeho porušení, a to za předpokladu, že vnější síly působí na materiál nekonečně dlouhou dobu. Spojitost mezi pevností dřeva a dobou trvání zatížení lze pozorovat na obecné křivce trvalého zatížení (obr. 15). Na základě této křivky lze vymezit jednotlivé oblasti.



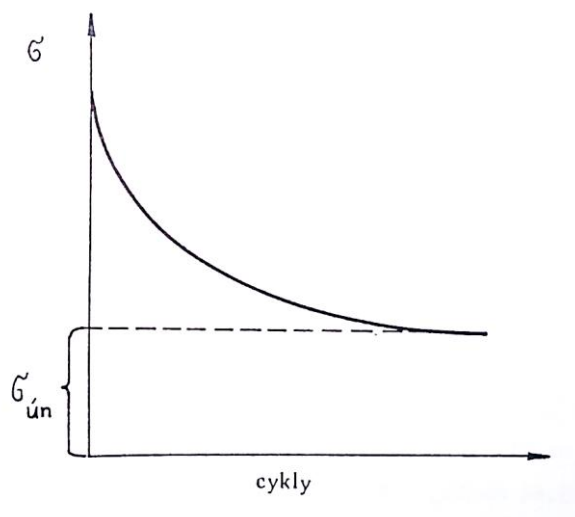
Obrázek 15 - Křivka trvalého zatížení (podle Požgaje et al.; 1993)

Vodorovná asymptota značí největší možné napětí (σ_{tz}), které může (po jeho vzniku) působit po relativně nekonečně dlouhý čas, aniž by došlo k porušení materiálu. Hranice, která tuto oblast značí, je nazývána, jako mez trvalé pevnosti

(σ_{tr}). Pod touto hranicí se nalézá oblast trvalé pevnosti (I.). Druhá oblast (II.) vymezená křivkou trvalého zatížení a dále její asymptotou, značí oblast trvalých pevností dřeva. Třetí oblast (III.) vyjadřuje oblast krátkodobé pevnosti, která je v první řadě ovlivněna rychlostí působících vnějších sil. Hodnoty trvalé pevnosti jsou závislé na druhu materiálu a způsobu namáhání (Požgaj et al. 1993).

Trvalé dynamické zatížení

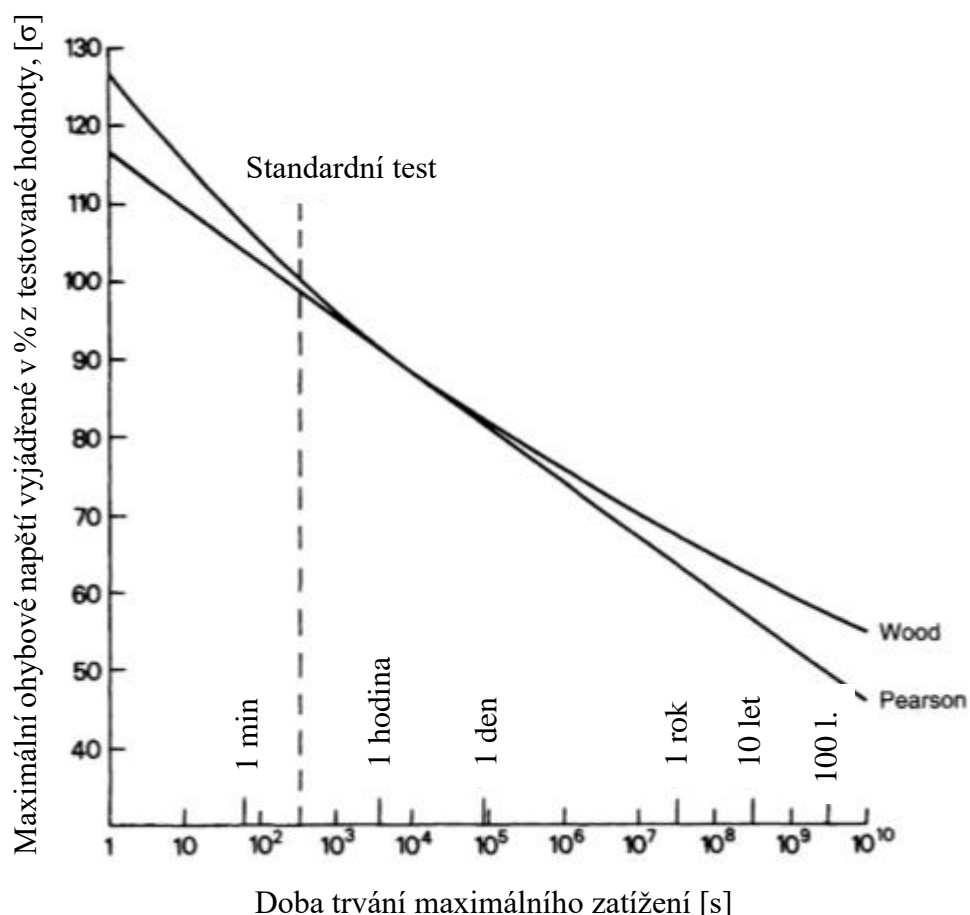
Trvalé dynamické zatížení lze definovat, jako dlouhodobé ztížení, u kterého se střídají cykly zatížení a odtížení. Při tomto typu namáhání dochází k jevu, který je označován jako únava materiálů. Při únavě materiálů dochází při opakovaném cyklickém zatěžování k nevratným trvalým deformacím, které zapříčiňují to, že se dřevo poruší mnohem dříve a při menším zatížení, než je tomu tak u statického zatížení. Hranice, která reprezentuje takové napětí, při kterém zatěžovaný materiál snese bez jeho porušení nekonečný počet cyklů, je označována jako mez únavy. Při cyklickém zatížení jsou s ohledem na působení vnějších sil rozeznávány dva základní případy. V prvním případě dochází k opakovanému zatížení a odtížení a napětí nabývá kladných hodnot (od nuly po maximum). Ve druhém případě maximální hodnota nabývá kladných i záporných hodnot. Vztah mezi napětím a počtem cyklů je znázorněn pomocí Wöhlerovy křivky (obr. 16) (Bodig a Jayne, 1982).



Obrázek 16 - Wöhlerova křivka (Matovič, 1993)

3.7.5.4 Doba zatížení – Madisonova křivka

Z výše zmíněného je patrné, že výsledné hodnoty pevnosti jsou do značné míry ovlivněny způsobem zatížení a dobou trvání působících vnějších sil. Z praktického využití je velmi důležitou proměnnou doba, po kterou je těleso či výrobek zatěžován. Mnoho autorů se již dříve touto problematikou zabývalo a došli k podobným závěrům. Dindwoodie (2000) ve své práci uvádí vliv času na pevnost v ohybu. Tato závislost je obecně známa jako Madisonova křivka. Tvar této křivky je vyobrazen níže (obr. 17). Na obrázku jsou zobrazeny průběhy dvou křivek od různých pozorovatelů (Wood a Pearson), kteří se touto problematikou zabývali, a jejich postupy při získávání dat byly v určitých bodech odlišné. Na demonstraci závislosti pevnosti v ohybu na čase je však tento graf postačující (Dinwoodie, 2000).



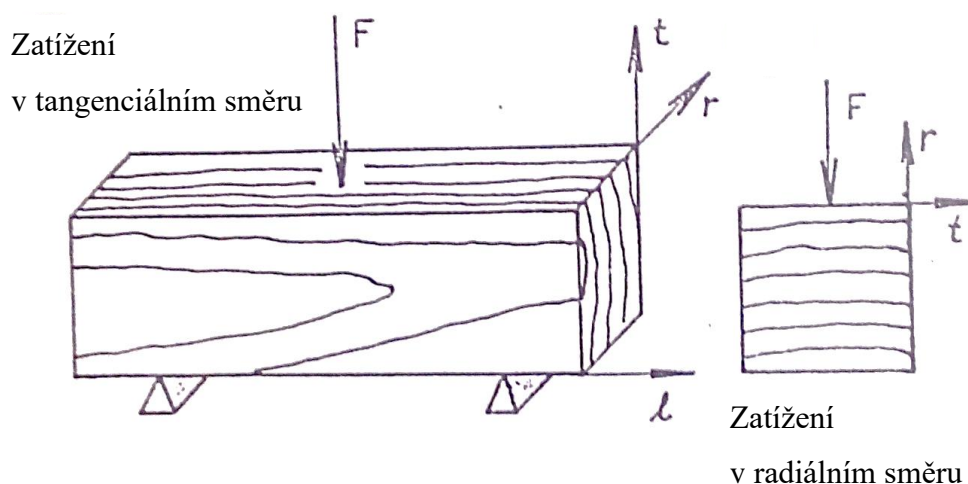
Obrázek 17 - Madisonova křivka Wood a Pearson (podle Dinwoodieho, 2000)

3.7.5.5 Pevnost dřeva ve statickém ohybu

Jak už bylo výše zmíněno, pevnost lze chápat jako schopnost dřeva odporovat jeho porušení vlivem vnějších (mechanických) působících sil. Základní ukazatel pro tuto vlastnost je mez pevnosti (Bodig a Jayne, 1982). Dřevo se z praktického hlediska často využívá na výrobu konstrukčních prvků (trámy, nosníky atd.), na základě tohoto faktu je pevnost v ohybu považována za jednu z ústředních vlastností dřeva (Novák, 2018). S přihlédnutím k anatomické stavbě dřeva (průběh vláken) lze pevnost v ohybu klasifikovat na:

- pevnost v ohybu, kde orientace vláken je shodná s podélnou osou zkušební vzorku a síla působí v radiálním nebo tangenciálním směru kolmo na vlákna,
- pevnost v ohybu, kde orientace vláken je kolmá na podélnou osu zkušební vzorku a síla působí rovnoběžně s vlákny, nebo kolmo na vlákna, (Požgaj et al., 1993).

Pro praktické využití je nejčastěji sledována pevnost v ohybu, kde orientace vláken je shodná s podélnou osou zkušební vzorku a síla působí v radiálním nebo tangenciálním směru (Babiak, 2001). Směry působícího zatížení jsou uvedeny níže na obrázku (obr. 18).



Obrázek 18 - Zatížení dřeva při ohybu (podle Matoviče, 1993)

V laboratorních podmínkách je podle normy (ČSN 49 0115) sledována pevnost v ohybu, kde orientace vláken se shoduje s podélnou osou zkušební tělesa a zatížení působí v tangenciálním směru kolmo na vlákna (tangenciální ohyb). Určení statické pevnosti v ohybu vychází ze zatěžování zkušební tělesa uloženého na

dvou podpěrách. Síla F působí na těleso v pomyslném středu těchto dvou podpěr, a tudíž i ve středu zatěžovaného tělesa. Při výpočtu výsledného napětí (σ_{max}) se vychází z Navierova vzorce, a to následujícím vztahem:

$$\sigma_{max} = \frac{3 \cdot F \cdot l_0}{2 \cdot b \cdot h^2} [MPa]$$

F – síla zatížení [N],

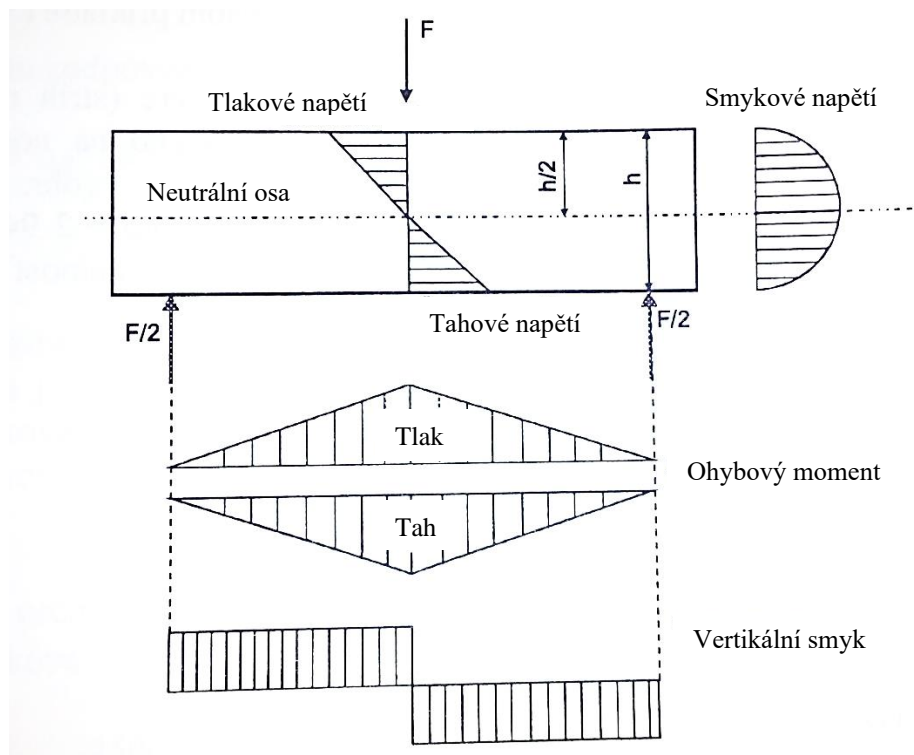
l_0 – vzdálenost mezi středy podpěr [mm],

b – šířka zkušebního tělesa [mm],

h – výška zkušebního tělesa [mm].

Tento vztah, který je vyjádřen vztahem mezi ohybovým momentem a průřezovým modulem je založen na předpokladu lineárního průběhu napětí, tedy po mezí úměrnosti. Nad mezí úměrnosti již průběh napětí nemá lineární charakter, nicméně pro praktické účely se používá tento zjednodušený výpočet, jelikož výpočet vycházející ze skutečného průběhu napětí by byl do jisté míry komplikovaný (Požgaj et al., 1993).

Je dobré si uvědomit, že při zatěžování tělesa vzniká více složek napětí. Tento stav zatěžování je také označován jako kombinované zatěžování. Vlivem zatěžování tělesa vzniká v jeho horní části tlakové napětí a v jeho spodní části tahové napětí. Zóna přechodu mezi tlakovým a tahovým napětím v nedeformovatelné části zkušebního tělesa bez normálových napětí je nazývána jako neutrální osa. Dále mezi tlakovým a tahovým napětím vzniká i smykové napětí (Babiak, 2001). Vznik jednotlivých druhů napětí při jednoduchém ohybu zkušebního tělesa je znázorněn níže na obrázku (Obr. 19).



Obrázek 19 - Průběh ohybového momentu a jednotlivých složek napětí při zatížení v ohybu (podle Babiaka 2001)

3.7.5.6 Faktory ovlivňující statickou pevnost v ohybu

Mezi základní faktory, které ovlivňují tuto mechanickou vlastnost lze zařadit hustotu, vlhkost, teplotu, odklon dřevních vláken, přirozené vady, směr zatížení, poměr vzdálenosti podpěr k výšce tělesa (štíhlostní poměr). Podle Matoviče (1993) se stoupající hustotou dřeva se statická pevnost v ohybu zvyšuje, nicméně s určitou variabilitou. Také dále uvádí, že při zvyšující se od absolutní vlhkosti od 0 % hodnoty pevnosti v ohybu rostou, a to až do hodnot v rozmezí 5-8 % absolutní vlhkosti, poté nabývají opačného trendu až do meze hygroskopicity. Pokud se zvýší vlhkost o 1 % (v rozmezí $w_{\text{abs}} = 8-30\%$), tak se pevnost v ohybu sníží o 4 %. Na základě této skutečnosti je stanoven opravný koeficient α (0,04) který se používá ve vzorci pro přepočítání hodnoty pevnosti v ohybu na požadovanou vlhkost (ČSN 49 0115). Pevnost v ohybu se snižuje se zvyšující teplotou a k zintenzivnění dochází, pokud do tohoto vztahu vstupuje vlhkost. Také odklon vláken negativně ovlivňuje tuto vlastnost. S rostoucím odklonem vláken od podélné osy zkušebního tělesa pevnost v ohybu klesá (Dinwoodie, 2000). Tato veličina je také ovlivněna poměrem vzdáleností podpěr od sebe (l) a výškou tělesa (h). Pokud je tento poměr ve vztahu $l/h < 14$, tak dochází ke snižování hodnot pevnosti v ohybu. K ustálení a

optimálnímu poměru dochází v rozmezí $l/h = 14-20$. Při laboratorních experimentech by se měla volit vzdálenost podpěr $l/h \geq 14$, nicméně tento vztah norma na zjišťování meze pevnosti ve statickém ohybu nespĺňuje ($l/h = 12$), jelikož je tento vztah do značné míry ovlivněn plochou příčného průřezu (Požgaj et al., 1993; ČSN 49 0115). Někteří autoři uvádějí (Požgaj et al., 1993; Bodig, 1982), že mez v pevnosti při tangenciálním ohybu může být o 10-12 % vyšší než v radiálním ohybu, a to pouze u dřeva jehličnatých dřevin. U listnatých dřevin jsou tyto rozdíly při statickém ohybu zanedbatelné v rozmezí 2-4 %. Do jaké míry jsou tyto tvrzení odpovídající, bylo primárním cílem této práce.

3.7.6 Houževnatost dřeva

Houževnatostí dřeva lze chápat jako spotřebovanou mechanickou práci, která je potřebná na vznik plastické deformace. Je úzce spjatá s plastičností dřeva, tedy schopností plasticky se deformovat před zlomem. S ohledem na druh zatížení, lze u dřeva rozlišit houževnatost na statickou a dynamickou (rázovou) (Gandelová, 2009).

3.7.6.1 Statická houževnatost dřeva

Statickou houževnatostí se rozumí mechanická vlastnost, která reprezentuje spotřebovanou mechanickou energii na vznik plastické deformace. Čím více se spotřebuje práce na vznik plastické deformace, tím je vyšší houževnatost dřeva. Z rovnice výpočtu koeficientu viskozity (λ_2), lze vyjádřit vztah mezi napětím a plastickou deformací a to následovně:

$$\sigma^2 = 2 \cdot \lambda_2 \cdot c \cdot \varepsilon_{pl}$$

σ – napětí [Pa],

λ_2 – koeficient dynamické viskozity [Pa · s],

c – rychlost zatížení (MPa · h⁻¹),

ε_{pl} – plastická deformace.

Pokud se v této rovnici použije integrování působícího napětí, dle deformace v rozpětí plastické deformace, získá se tímto způsobem měrná energie deformační práce. Výpočet pro získání rovnice je následující:

$$w_{pl} = \int_0^{\varepsilon_{pl}} \sigma \cdot d\varepsilon = \sqrt{2 \cdot \lambda_2 \cdot c} \int_0^{\varepsilon_{pl}} \varepsilon^{\frac{1}{2}} \cdot d\varepsilon = \frac{2}{3} \sqrt{2 \cdot \lambda_2 \cdot c \cdot \varepsilon_{pl}^3} [Pa]$$

w_{pl} – měrná energie deformační práce [Pa]

σ – působící napětí [Pa]

λ_2 – koeficient dynamické viskozity [Pa · s]

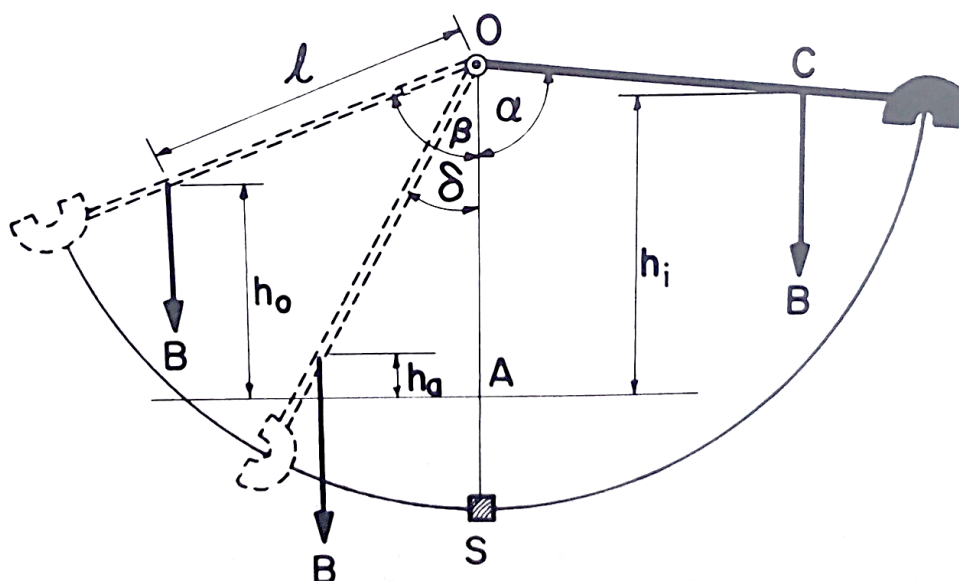
c – rychlost zatížení (MPa · h⁻¹)

ε_{pl} – plastická deformace.

Za předpokladu, že u některých materiálů je deformační práce značně malá a velikost plastické deformace skoro zanedbatelná, označují se takovéto materiály jako křehké. Dřevo se řadí mezi houževnaté materiály, a pokud se u dřeva dosáhne nízká houževnatost a dobrá plastičnost, je vhodné pro ohýbání, lisování, tvarování apod. (Požgaj et al.,1993).

3.7.6.2 Rázová (dynamická) houževnatost dřeva

Rázovou houževnatost, též označovanou jako přerážecí práce, lze definovat jako schopnost dřeva pohlcovat práci při dynamickém (rázovém) zatížení. Základem tohoto namáhání je zjistit míru vykonané práce, která byla spotřebována na přeražení zkušebního tělesa za předem stanovených podmínek. Práce, která byla spotřebována na porušení tělesa se nejčastěji vyjadřuje na plochu průřezu (J · cm⁻²) v místě přeražení (Matovič, 1993). Na zjištění této hodnoty používáme nejčastěji tzv. Charpyho kladivo. Základní princip této zkoušky je uveden níže na obrázku (obr. 20).



Obrázek 20 - Princip přerážecího kladiva (Bodig a Jayne, 1982)

Na kinematickém schématu lze pozorovat kyvadlové rameno opatřené přerážecím kladivem, jehož tíhu značí bod B s těžištěm v bodě C , které je ve vzdálenosti l od bodu otáčení O . Před započatím pohybu se těžiště nachází v maximální výšce h_i , tato výška je měřena od nejnižšího možného bodu, tedy bodu A . Pokud kladivo na své pohybové křivce nemá žádnou překážku, a tudíž pohyb kyvadla není nějak omezen, dosáhne na levé straně výkyvu maximální hodnoty h_0 . Tato výška h_0 je nižší než výška h_i , a to z důvodu ztráty energie způsobené třením. Za podmínky, že dojde k přelomení vzorku o průřezu S kladivem, sníží se výška výkyvu na levé straně na hodnotu h_a . Rozdíl mezi energií kyvadla před kontaktem (W_0) a energií po kontaktu (W_a) je roven energii potřebné k přeražení tělesa (Bodig a Jayne, 1982). Tento vztah se dá vyjádřit následujícím zápisem:

$$W = W_0 - W_a [J]$$

Energii potřebnou k přeražení tělesa můžeme též vyjádřit jako rozdíl potenciálních energií kyvadla, a to vztahem:

$$W = B \cdot h_0 - B \cdot h_a = B \cdot (h_0 - h_a) [J]$$

kde: $B = m \cdot g$ [N],

m – hmotnost [kg],

g – gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$].

Výška h_o a h_a mohou být vyjádřeny pomocí goniometrické funkce a úhlů α a δ , a to následovně:

$$h_o = l - l \cdot \cos \beta = l \cdot (1 - \cos \beta) [m]$$

$$h_a = l - l \cdot \cos \delta = l \cdot (1 - \cos \delta) [m].$$

Po dosazení do vzorce je následující rovnice pro výpočet spotřebované práce dána vztahem:

$$W = B \cdot l \cdot (\cos \beta - \cos \delta) [J],$$

(Bodig a Jane, 1982).

Jelikož se práce spotřebovaná na přeražení tělesa přepočítává na plochu průřezu, tak se pro výpočet rázové houževnatosti (A_w) používá vzorec:

$$A_w = \frac{W}{b \cdot h} [J \cdot cm^{-2}]$$

W – spotřebovaná práce [J],

b, h – příčné rozměry zkušebního tělesa [cm],

(Požgaj et al., 1993).

Po vykonání zkoušky lze posuzovat na zkušebních tělesech charakteristiku zlomů. Dřevo houževnaté má zlom členitý, nepravidelný s podlouhlými vytrhanými třískami. Málo houževnaté (křehké) dřevo má zlom málo členitý, schodovitý až rovný (Matovič, 1993; Kollmann a Coté, 1968).

3.7.6.3 Faktory ovlivňující rázovou houževnatost dřeva

Rázová houževnatost je do velké míry ovlivněna vlhkostí zkušebních vzorků. Ke změnám těchto hodnot dochází jen v určitém vlhkostním rozsahu, a to nejčastěji v rozmezí 5-25 % absolutní vlhkosti. Pokud se za těchto podmínek zvýší vlhkost o jedno procento, dojde ke snížení hodnoty rázové houževnatosti o 2 %. Na základě tohoto faktu je stanoven opravný koeficient α (0,02), který se používá ve vzorci pro přepočet hodnoty rázové houževnatosti pro požadovaný obsah vlhkosti (Matovič, 1993; ČSN 49 0117). Hodnoty této vlastnosti jsou také ovlivněny velikostí zkušebního tělesa, přesně řečeno mezi poměrem rozestupů podpěr od sebe (l) a výškou zkušebního vzorku (h). Optimální poměr by měl být $l/h \geq 12$, pokud je

$l/h < 12$, tak hodnota rázové houževnatosti prudce stoupá. Při $l/h > 12$ hodnota stoupá mírně (Gandelová, 2009). Vliv na hodnotu rázové houževnatosti má také potřebný čas na přeražení tělesa, i když je tento okamžik velmi krátký, a to v řádu milisekund, do jisté míry může tuto vlastnost ovlivnit. Tímto problémem se ve svoji práci zabýval Jansson, který tento čas ovlivňoval změnou výškových parametrů (Janson, 1992). Při získávání hodnot rázové houževnatosti u více materiálů, které následně podléhají vzájemnému porovnání, by se měla u všech měření dodržet ta samá metodika za použití toho samého zařízení (Charpyho kladivo), jinak by výsledné hodnoty mohly být značně ovlivněny.

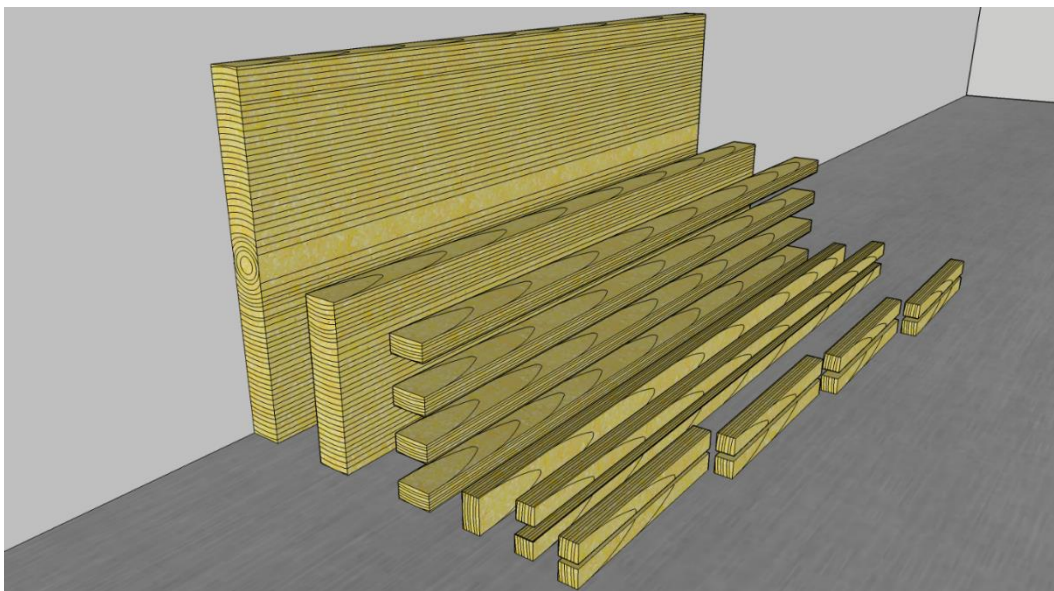
Na rázovou houževnatost má také vliv směr zatěžování. Požgaj (1993) uvádí, že u dřeva s výrazným rozdílem mezi jarním a letním dřevem, tedy u dřevin jehličnatých a listnatých s kruhovitě pórovitou stavbou, je spotřebovaná práce (A_w) v rozsahu o 25-50 % vyšší v radiálním směru než ve směru tangenciálním. U roztroušeně pórovitých dřevin nezaznamenal významné rozdíly. Do jaké míry jsou tyto rozdíly odpovídající bylo primárním cílem této práce.

Tyto rozdíly jsou nepochybně závislé na anatomické struktuře jednotlivých druhů dřev a na procentuálním zastoupení jednotlivých stavebních elementů (tracheje, tracheidy, parenchymatické buňky, libriformní vlákna atd) dřeva na jeho celkovém objemu. Vliv také bude mít chemické zastoupení základních stavebních prvků dřeva (celulóza, hemicelulóza, lignin).

4 Metodika

4.1 Příprava vzorků

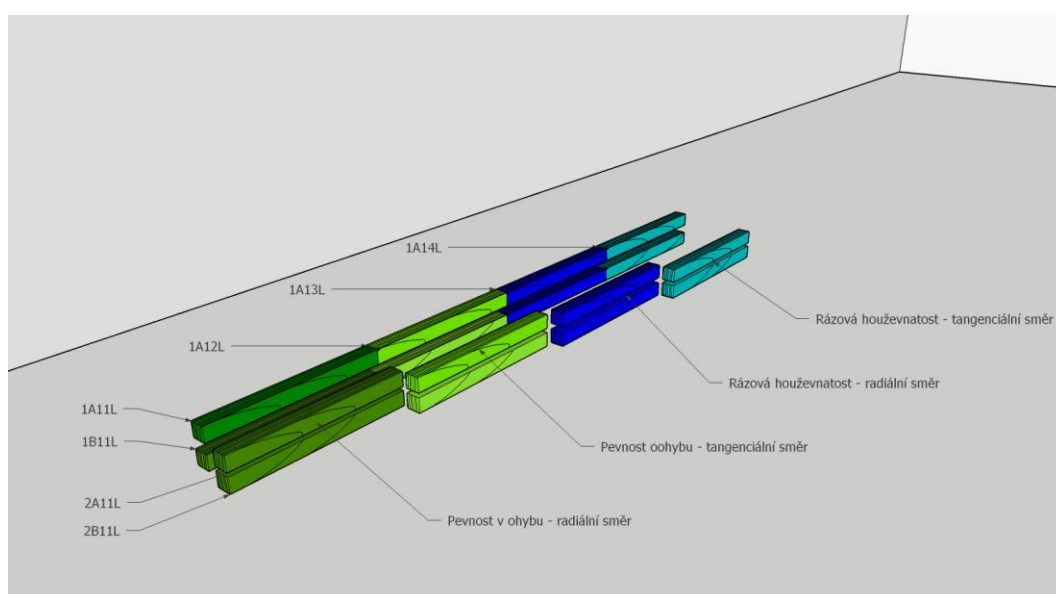
Při výrobě zkušebních těles se vycházelo z normy ČSN 49 0101, která určuje základní požadavky na zpracování materiálu (tolerance rozměrů, úprava vlhkosti) a další náležitosti, které jsou potřebné pro manipulaci s materiálem a následné vyhotovení zkušebních těles. Vzorky byly vyrobeny z dřeva listnatých dřevin, a to ze dvou zástupců s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva a tří zástupců roztroušeně pórovitou stavbou dřeva. Do dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva byl zařazen dub letní (*Quercus robur* L.) a jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.). Do dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva byl zahrnut buk lesní (*Fagus sylvatica* L.), lípa srdčitá (*Tilia cordata* Mill.) a bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth). Z těchto pěti druhů dřevin bylo zhotoveno celkem 800 zkušebních těles, tedy od každého druhu 160 kusů. Výběr materiálu probíhal osobně, jelikož byl kladen velký důraz na kvalitu materiálu, a to především na eliminaci výskytu vad a dále na co největší pomyslnou kolmost letokruhů k ploše fošny. Průběh dělení fošny na jednotlivé přířezy, až po finální zkušební tělesa, je schematicky znázorněn na obrázku níže (obr. 21).



Obrázek 21 - Uložení vzorků ve fošně (autor)

Vzorky byly vyrobeny o rozměrech 20 × 20 × 300 mm. Každému ze zkušebních těles byl přidělen pětimístný kód, který zaručil přesnou alokaci, a tudíž nám zajistil

spolehlivou identifikaci s ohledem na to, z jakého místa fošny byl pořízen. Způsob kódování lze spatřit na obrázku (obr. 22). První číslo označuje polohu v kmeni (ve fošně od kraje), následující písmeno určuje uložení vzorků nad sebou, další číslo v pořadí kódu stanovuje tzv. kvartu, která je složena ze čtyř zkušebních těles za sebou. Uložení jednotlivého zkušebního tělesa v lati udává následující číslice a poslední písmeno vymezuje, zda byl vzorek vymanipulován z pravé či levé strany (od dřene) fošny. Zeleně označené latě podléhaly zkoušce statické pevnosti v ohybu a modré k určení dynamické pevnosti v ohybu, a to samozřejmě s přihlédnutím ke směru zatížení, jak je také na obrázku znázorněno.



Obrázek 22 - Kódování vzorků (autor)

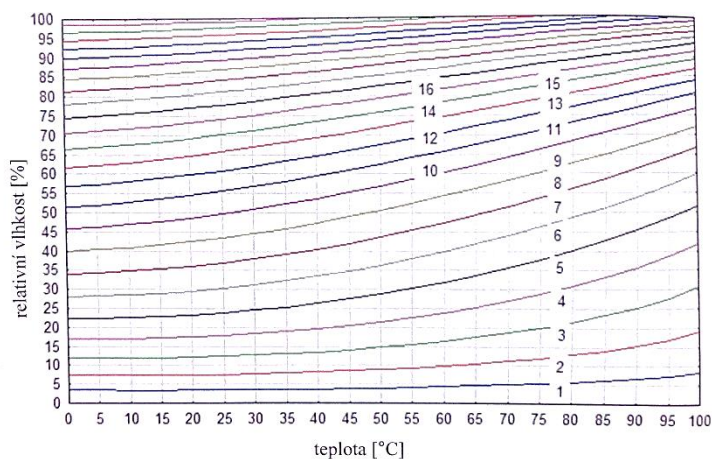
4.2 Úprava vlhkosti zkušebních těles – klimatizování

Po přípravě vzorků a jejich řádného označení následovalo jejich klimatizování. Tento proces se uskutečnil za pomoci klimatizační skříně (obr. 23). Klimatizační skříň umožňuje nastavení dvou základních parametrů, které ovlivňují výslednou vlhkost dřeva. Jelikož pro určování fyzikálních a mechanických vlastností je doporučována absolutní vlhkost materiálu okolo 12 %, musely být tyto parametry (teplota a relativní vlhkost vzduchu) nastaveny tak, aby této hodnoty bylo dosaženo. Běžně se pro dosažení tohoto stavu v klimatizačních skříních volí teplota 20 °C a relativní vlhkost vzduchu 65 %, toto u daného typu klimatizační skříně nebylo možné docílit z důvodu absence vlastního chladicího zařízení. Proto se musela

zvolit vyšší teplota, než je dosahována v okolí zařízení. Stanovila se tedy teplota 30 °C a relativní vlhkost vzduchu 67,5 %, stanovení těchto hodnot probíhalo na základě Čulického diagramu (obr. 24). Klimatizování zkušebních těles probíhalo až do bodu, kdy se váha těchto vzorků přestala měnit a dosáhlo se takzvaného stavu rovnovážné vlhkosti. Jak již bylo uvedeno, klimatizování zkušebních těles je jeden ze základních požadavků před zjišťováním jednotlivých vlastností pomocí laboratorních zkoušek. Tento proces nám zaručuje stejné vlhkosní podmínky v rámci jednotlivých druhů dřev, které podléhaly následovnému určování jejich fyzikálních a mechanických vlastností.



Obrázek 23 - Klimatizační skříň (autor)



Obrázek 24 - Čulického diagram (Borůvka, 2016)

4.3 Měření fyzikálních a mechanických vlastností

Všechna měření byla prováděna v zázemí laboratoří Fakulty lesnické a dřevařské. V následujících kapitolách jsou popsány jednotlivé postupy při získávání potřebných dat, které podléhaly následnému zpracování. Kapitoly navazují na sebe tak, jak probíhaly jednotlivé práce za sebou.

4.3.1 Hustota

Při určení hustoty se vycházelo z postupu, který uvádí norma ČSN 49 0108. Tato norma vymezuje základní postup spočívající ve stanovení objemu a hmotnosti dřeva při určité vlhkosti. Rozměry zkušebních těles byly měřeny pomocí digitálního posuvného měřítka od firmy Kinex (6040-27-150), s přesností měření na 0,01 mm.

Vážení jednotlivých vzorků se uskutečnilo za použití laboratorní váhy značky Kern (PCB 2500-2), a to s přesností na 0,01 g. Pro výpočet hustoty byl použit následující vzorec:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} [kg \cdot m^{-3}]$$

m_w – hmotnost dřeva při vlhkosti w [kg],

V_w – objem dřeva při vlhkosti w [m³],

(ČSN 49 0108).

4.3.2 Ověření paralelnosti vzorků

Po výrobě a na-klimatizování vzorků následovalo jejich ověření paralelnosti. Toto ověřování probíhalo třemi různými nedestruktivními metodami založenými na šíření ultrazvukové vlny (UZ). Každá z metod měla společnou výslednou veličinu, ale lišila se v pracovním postupu při získání této hodnoty. Cílem bylo posoudit u každé metody čas, za který UZ vlna projde dřevem v jednotlivých zkušebních tělesech, která na sebe v rámci lati navazovala a podléhala té samé zkoušce s ohledem na směr zatěžování, který byl v rámci této práce zkoumán. Čas průchodu UZ vlny ve zkušebních tělesech na bázi zkoušky, které podléhaly, měl být téměř shodný nebo podobný bez významných statistických rozdílů. Jen za těchto předpokladů mohlo dojít k navazujícím zkouškám, jelikož tímto způsobem došlo k eliminaci chyb, které by jinak vznikly na základě rozdílných vlastností materiálu. Vyloučení těchto potenciálních chyb umožnilo lépe definovat jak se zkoušený materiál v jednotlivých směrech (radiální, tangenciální) chová a získané veličiny měly větší vypovídající hodnotu.

4.3.2.1 Ultrazvuková metoda – čas průchodu UZ vlny

Pro měření času, za který UZ vlna projde materiálem byl použit přístroj FAKOPP Ultrasonic Timer (UT-06/2013) (obr. 25). Toto zařízení je opatřeno dvěma odnímatelnými piezoelektrickými snímači. Pro stanovení průchodu času byly upotřebeny dva typy těchto sond, lišící se tvarem a konstrukcí (klínové, kvádrové) v závislosti na aplikované metodě, tedy jakého způsobu bylo užito k dosažení potřebných veličin. Princip zařízení je založen na elektronovém vybuzení (excitaci) v piezoelektrických sondách, ve kterých následně dojde ke generaci krátkého

ultrazvukového impulsu a zároveň s tím se spustí stopky (časovač), jakmile impuls projde skrze materiál ke druhé sondě, která jej přijme, stopky se zastaví. Výsledný čas v mikrosekundách (μs) je následně demonstrován na displeji zařízení (Fakopp Bt., 2019).



Obrázek 25 - FAKOPP Ultrasonic Timer (autor)

První metoda spočívala v přiřkládání klínových sond na plochu (radiální, tangenciální) zkušebního tělesa v předem dané vzdálenosti. Měření probíhalo ve vzdálenostech 60, 100, 140, 180 a 220 mm od sebe, avšak k porovnání paralelnosti byl upotřeben čas jen ze vzdálenosti 140 mm. Ostatní časy byly využity pro korekci a následný výpočet dynamického modulu pružnosti, který však není primárním tématem této práce a je uveden jako doplňující vlastnost v přílohách. Pro jeho výpočet se vychází ze vzorce, který je uveden v kapitole 3.7.3. Po jednoduché matematické úpravě tohoto vzorce, lze získat vzorec pro výpočet dynamického modulu který je dán následujícím vztahem:

$$E = c^2 \cdot \rho [Pa]$$

, kde:

c – rychlost zvuku [$m \cdot s^{-1}$],

ρ – hustota dřeva [$kg \cdot m^{-3}$].

Druhá metoda spočívala v přiřkládání kvádrových piezoelektrických snímačů na čela zkušebních těles, tedy na plochu, která vznikla příčným řezem. Vzdálenost sond od sebe odpovídala v tomto případě celkové délce tělesa. Princip buzení UZ vlny a její detekce je shodný, jako prvním případě. I v této metodě lze na základě získaných veličin vypočítat dynamický modul pružnosti, avšak korekce se v tomto případě určuje přiložením sond k sobě a odečtením výsledné hodnoty, kterou nám zařízení naměří.

4.3.2.2 Rezonanční metoda – metoda s využitím zesilovače

Tato metoda spočívala ve zjištění frekvence, tedy počtu opakování periodického děje (kmitů) za jednotku času. Z naměřené frekvence (Hz) byl za použití standartního vzorce vypočten čas potřebný pro průchod testovaným materiálem. Tento čas byl upotřeben pro následné porovnávání paralelnosti zkušebních těles. Pro získání potřebné veličiny se postupovalo za předem stanovených postupů a při upotřebením různého typu zařízení a softwarového vybavení. Celý postup včetně využitého zařízení a softwarové podpory je popsán níže v textu.

Zkušební tělesa byly uloženy na dvě gumové podložky, z důvodu odizolování, které nám zaručilo správný přechod iniciované energie (zvukové frekvence) skrze materiál. Každá z podložek byla umístěna pod tělesem ve vzdálenosti 66 mm od svislice jeho čel. Na takto uložený vzorek byl iniciován náraz do čela tělesa, a to rychlým úderem ocelového kladívka, které mělo hmotnost v rozmezí 0,5 – 5 % váhy zkoušeného vzorku. U druhého čela vzorku byl nainstalován mikrofon (Behringer ECM 8000), který snímal zvuk úderu. Tento získaný signál byl následovně převeden ke zpracování do zesilovače (Steinberg UR22 MK2). Zesilovač následně již upravený (zesílený) signál poslal do počítače k dalšímu zpracování. V počítači následovalo zpracování signálu za pomoci softwaru FFT (Fast Fourier Vibration analyzer) analyzátor, který nám po nastavení potřebných parametrů (citlivost, frekvenční rozsah atd.), zaslaná data zpracoval na výslednou frekvenci (Hz) (příloha 1). Výsledná frekvence se musela pohybovat v rozmezí +/- 20 % předpokládané frekvence, která se vypočetla podle vzorce:

$$f = \frac{2500}{l} [Hz]$$

, kde:

l – délka zkušebního tělesa [m],

(Fakopp Bt., 2019).

Jestliže nebylo splněno tohoto předpokladu, celý proces se opakoval. Pokud i po několikanásobném opakování testu docházelo k získání výsledné hodnoty neshodující se s rozptylem předpokládané frekvence, byla i tak posouzena tato hodnota za správnou a zaznamenána k dalšímu zpracování. Demonstrativní (názorné zapojení aparatury je znázorněno na obrázku níže (obr. 26). Získané hodnoty (Hz) podléhaly přepočtu pro fázovou rychlost šíření vlnění podle následujícího vzorce:

$$c = 2 \cdot l \cdot f \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

l – délka zkušebního tělesa [m],

f – frekvence [Hz].

Pro přepočet na čas, byl použit základní vzorec:

$$t = \frac{l}{c} \text{ [\mu s]},$$

(Fakopp Bt., 2019).



Obrázek 26 - Aparatura pro FFT analyzér (autor)

4.3.3 Pevnost v ohybu při statickém zatížení

Pro získání potřebných hodnot při stanovení pevnosti v ohybu byl použit zkušební stroj TIRA 2850 S (50 kN) od Firmy Tempos (obr. 27.), která v ČR zastupuje výrobce tohoto zařízení. Tento stroj je určen ke zkoušení dřevěných, ale i ostatních materiálů. Zařízení je vybaveno softwarem TIRA-test (příloha 2), prostřednictvím kterého lze nastavit základní parametry (rozměry těles, rychlost zatížení, hraniční hodnoty atd.), které jsou nezbytné pro vykonání zkoušky. Postup zkoušky je založen na působení síly kolmo na vlákna zkušebního tělesa s přihlédnutím ke směru zatěžování (radiální, tangenciální), který byl v rámci jednotlivých druhů dřev řešen. Zkušební těleso pravoúhlého tvaru o určitém průřezu (šířky – b, výšky – h) bylo uloženo na dvou podpěrách o určitém průměru a vzdálenosti jejich středů od sebe, a to podle požadavků uvedených v normě ČSN 49 0115. Na takto uložený zkušební vzorek začala působit síla přenášená pomocí zatěžovací hlavy s konstantní rychlostí posunu. Síla přenášená zatěžovací hlavou působila do pomyslného středu vzdálenosti mezi dvěma podpěrami, a tudíž i do středu zkušební vzorku. Doba (rychlost posunu) zatěžování materiálu musela být nastavena tak, aby k porušení tělesa došlo za 1, 5 minuty s odchylkou $\pm 0,5$ min. Průběh zkoušky je zachycen na snímcích v příloze (příloha 3). Prostřednictvím tenzometru (snímače síly) a softwarového vybavení TIRA-test byla zjištěna maximální hodnota síly F. Po zjištění všech potřebných hodnot pro stanovení pevnosti v ohybu, následoval výpočet podle základního vzorce:

$$\sigma_{max} = \frac{3 \cdot F \cdot l_0}{2 \cdot b \cdot h^2} [MPa]$$

F – síla zatížení [N],

l_0 – Vzdálenost mezi středy podpěr [mm],

b – šířka zkušebního tělesa [mm],

h – výška zkušebního tělesa [mm],

(ČSN 49 0115).



Obrázek 27 - TIRA 2850 S (autor)



Obrázek 28 - Zatížení tělesa (autor)

Po vykonání zkoušky byly získány také hodnoty, z kterých lze stanovit statický modul pružnosti. Avšak určení této vlastnosti nebylo primárním cílem této práce a její hodnoty jsou uvedeny v přílohách pouze jako doplňující vlastnost. Pro výpočet statického modulu pružnosti byl použit následující vzorec:

$$E_w = \frac{l^3 \cdot \Delta F}{4 \cdot b \cdot h^3 \Delta f} [MPa]$$

l – vzdálenost mezi středy podpěr [mm],

b – šířka tělesa [mm],

h – výška tělesa [mm],

ΔF – rozdíl mezi silami ($F_2 - F_1$) [N],

Δf – rozdíl průhybu ($a_2 - a_1$) [mm], (ČSN EN 310).

4.3.4 Rázová houževnatost

Při stanovení rázové houževnatosti (A_w) se vycházelo z normy ČSN 49 0117. Tato norma udává základní postup, na jehož základě se uskutečnila přerážecí práce, a to za pomoci Charpyho kladiva (obr. 29). Před provedením samotné zkoušky bylo nutné znát příčné rozměry zatěžovaného tělesa ve středu jeho délky s přesností na 0,01 mm. Pro získání šířky potřebných rozměrů bylo použito posuvné měřítko a poté následoval samotný proces zkoušení. Tato zkouška spočívala v uložení

zkušební tělesa na podpěry s přihlédnutím ke směru zatěžování, který byl v rámci jednotlivých druhů dřevin zkoumán. Poté se takto uložené zkušební těleso porušilo úderem kladiva za předem daných podmínek, průběh zkoušky je zachycen na snímcích v příloze (příloha 4). Po provedení zkoušky se ze stupnice odečetla pohlcená práce (J), která byla potřebná na přeražení zkoušeného materiálu. Takto získaná hodnota se přepočítala na plochu tělesa, na kterou byla spotřebována, a to pomocí vzorce:

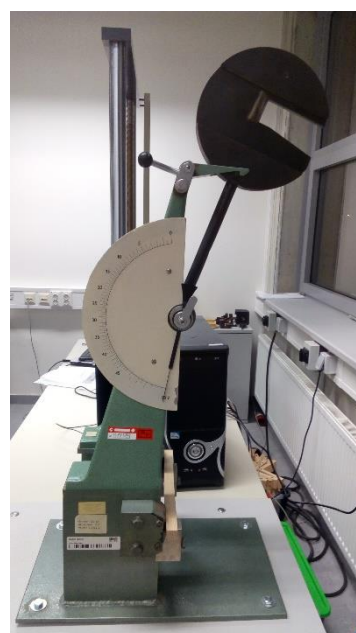
$$A_w = \frac{W}{b \cdot h} [J \cdot cm^{-2}]$$

W – práce spotřebovaná na přeražení tělesa [J],

b, h – rozměry tělesa [cm],

(ČSN 49 0117).

Již po vykonání zkoušky lze kvalitu tedy houževnatost vizuálně posuzovat podle kvality zlomu, avšak tato metoda je závislá na subjektivním názoru pozorovatele a jeho zkušenostech. Pokud je zlom velmi členitý s dlouhými vytrhanými třískami jedná se o houževnaté dřevo. Je-li zlom málo členitý, hladký až rovný jedná se o dřevo křehké a málo houževnaté.



Obrázek 29 - Charpyho kladivo (autor)

4.3.5 Šířka letokruhů – letokruhovú analýza

Stanovení šířky letokruhů probíhalo za použití skeneru, na kterém byly naskenovány čelní plochy vzorků v rozlišení 800 dpi. Následovalo měření jednotlivých letokruhů prostřednictvím softwarového programu NIS Elements. Každé zkušební těleso podléhalo dílčímu měření a samotnému vyhodnocení. Z jednotlivých šířek letokruhů byl následovně vypočten jejich průměr vyjadřující počet obrazových bodů (px). Takto získaná hodnota byla poté přepočtena na milimetry podle následujícího vzorce:

$$l = \frac{px \cdot 25,4}{dpi} [mm]$$

l – šířka letokruhu [*mm*],

px – počet obrazových bodů,

dpi – rozlišení snímku.

4.3.6 Stanovení vlhkosti po na-klimatizování

Po vykonání všech potřebných zkoušek následovalo stanovení vlhkosti. Ze zkušebních vzorků jednotlivých druhů dřev byly vymanipulovány tělesa o rozměrech 20 × 20 × 30 mm, poté následovalo jejich klimatizování stejným způsobem, který je již popsán v kapitole 4.2. Takto upravená tělesa byla zvážena na laboratorní váze zn Kern (PCB 2500-2). Po tomto kroku následoval proces, jehož smyslem bylo získat hmotnost zkušebních těles v absolutně suchém stavu, tedy při absolutní vlhkosti 0 %. Tento stav byl docílen za pomoci sušárny BINDER (9010-2012), kde na materiál působila teplota 103 °C, a to až po bodu, kdy se váha zkušebních těles přestala měnit. Poté následoval opětovný proces vážení. Po získání všech potřebných hodnot se postupovalo při výpočtu vlhkosti podle vzorce:

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 [\%]$$

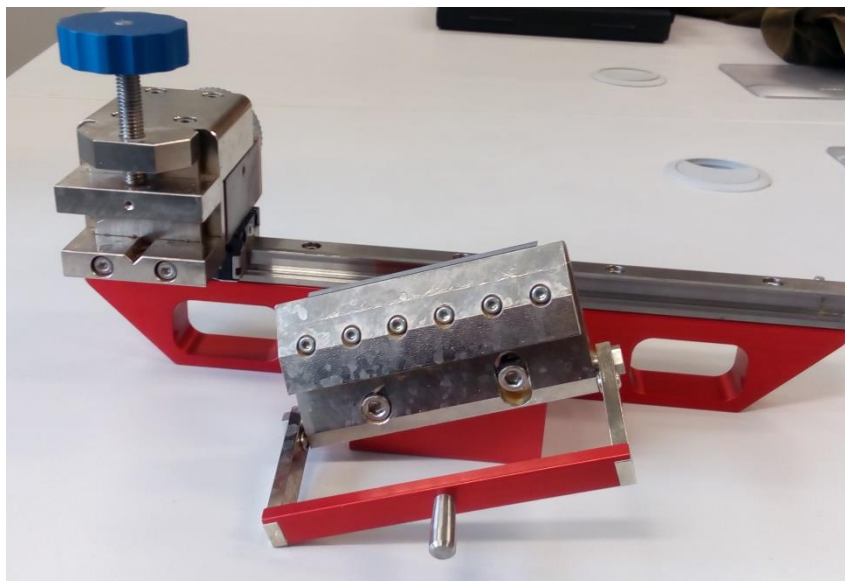
m_w – hmotnost vlhkého dřeva [*kg*],

m_0 – hmotnost absolutně suchého dřeva [*kg*],

(ČSN 49 0103).

4.3.7 Obrazová analýza – příprava vzorků a pořízení snímků

Po uskutečnění všech potřebných zkoušek včetně vlhkosti, se následně provedl mikroskopický rozbor. Tento rozbor spočíval ve výrobě preparátů z adekvátních druhů dřev. Preparáty byly pořízeny prostřednictvím mikrotomu (obr. 30), a to ve všech směrech řezu (příčný, radiální, tangenciální) s ohledem na jejich členění vztahující se ke struktuře dřeva. Z vytvořených preparátů se následně obstaraly snímky prostřednictvím zařízení, které je společně s postupem popsáno níže v textu.



Obrázek 30 - Mikrotom GSL 1 (autor)

Ze zkušebních vzorků byla vymanipulována za pomoci dláta a pilky tělesa o rozměrech 1 x 1 x 1 cm. Takto upravená tělesa se ponořila do nádoby s vodou, dokud nedošlo k změknutí dřeva, po dosažení požadovaného stavu (změkčení) se jednotlivá tělíska upevnila do mikrotomu (GSL 1 – microtone) tak, aby směr řezu odpovídal požadavku na finální preparáty. Pomocí mikrotomu opatřeného nožem byly seříznuty preparáty o tloušťce 20 mikrometrů (μm). Takto vytvořené preparáty se uložily na podložní sklíčko a pomocí aplikace glycerolu došlo k jejich dočasnému upevnění. Po přípravě všech potřebných sklíček následovalo proplachování preparátů vodou tak, aby se odstranil glycerol. Poté následoval proces odvodňování, tohoto stavu bylo dosaženo pomocí alkoholu a xylenu. Proces spočíval v promývání jednotlivých vzorků pomocí ethanolu o různých koncentracích (50 %, 70 %, 90 % a 96 %), poté čistým ethanolem (bezvodý ethylalkohol) a nakonec xylenem. Promývání prostřednictvím pipety muselo být velmi důsledné, a to za podmínky dodržení vzestupné řady koncentrací, jak je uvedeno výše. Xylen zajistil úplné odvodnění a posloužil jako indikátor zbylé vody, což se projevuje jeho zbledáním. Následovalo obarvení preparátů roztokem modře (Astra Blue FM) a safraninu (Safranin O) v poměru 1 : 1, z důvodu řádného probarvení, bylo potřeba, působit roztokem na materiál minimálně po dobu pěti minut. Pro vypláchnutí nadbytečného barviva se opakoval postup za použití

stoupající ethanolové řady a xylenu. Pro konečné upevnění na podložní sklíčko byla použita syntetická pryskyřice zn. Eukitt. Pryskyřice byla nanesa v přiměřeném množství na preparát a poté byla i sním přikryta krycím sklíčkem. Krycí sklíčko se následně k podložnímu sklíčku zafixovalo pomocí magnetu, který byl odejmut až po konečném vytvrzení pryskyřice. Zbytky pryskyřice byly ze sklíček odstraněny pomocí žiletky. Následovalo pořízení snímků digitálním fotoaparátem typu Nikon D7100, který byl upevněn k mikroskopu (Nikon Eclipse 80i), prostřednictvím kterého se dosahovalo požadovaného zvětšení. Opatřené snímky byly následně upraveny (pootočený, ořezány atd. ...) podle požadavků a použity pro popis mikroskopické stavby vybraných dřevin.

4.3.8 Vyhodnocení dat

Data a výsledky zkoumaných vlastností byly zpracovány v grafické a tabelární podobě. Grafy byly zpracovány prostřednictvím programu STATISTICA 13 (Statsoft INC., USA), v tomto programu byla použita jednofaktorová a vícefaktorová analýza ANOVA, která posloužila pro trendové vystižení zkoumaných vlastností. Pro tabelární zpracování byl použit program MS Excel 2019 (Microsoft Corporation, USA). V grafické podobě byly znázorněny jednotlivé vlastnosti v závislosti na druhu dřeviny a směru zatížení (radiální a tangenciální směr). Grafy byly doplněny příslušnými tabulkami se základními statistickými údaji (počet vzorků, průměr, minimum, maximum, variační koeficient, směrodatná odchylka) hodnocených vlastností, či jejich procentuálními změnami v závislosti na směru působících vnějších sil.

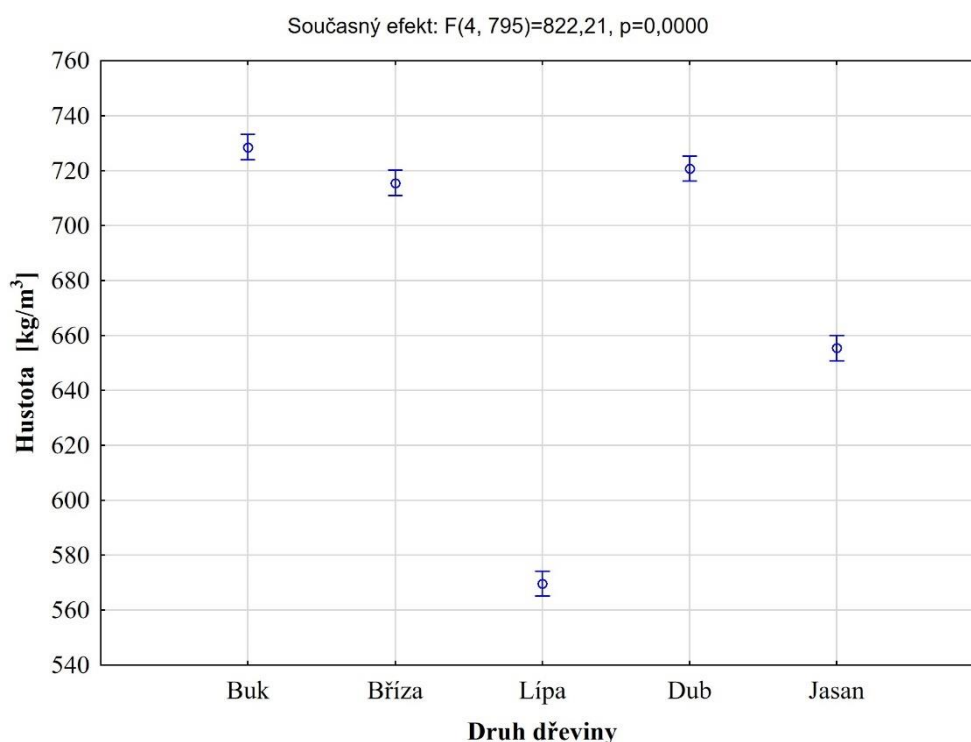
Pro vyjádření závislosti vybraných vlastností byly použity grafy lineární regrese doplněnými základními údaji, jako je rovnice přímky (y), koeficient determinace (r^2), korelační koeficient (r) a hodnota p (statistická významnost). Pro jednotlivé statistické analýzy byla použita hladina významnosti $\alpha = 0,05$ %. Jelikož by grafů pro vyjádření některých vlastností bylo příliš mnoho, použily se z nich pouze korelační koeficienty převedené do tabelární podoby. Hodnoty vybraných vlastností byly též porovnány s dostupnou literaturou.

5 Výsledky a diskuze

V této části práce jsou jednotlivé výsledky prezentovány v grafické a tabelární podobě. K jejich zpracování došlo prostřednictvím softwarových programů, které jsou již uvedeny v kapitole 4.3.8. Některé výsledné hodnoty jsou porovnány s dostupnými údaji v literatuře.

5.1 Hustota

Na grafu (graf 1) jsou znázorněny zjištěné hustoty dřeva u jednotlivých zkoumaných dřevin. Graf je doplněn základními statistickými údaji (tab. 1). Nejvyšší průměrná hustota byla zaznamenána u bukového dřeva a to $729 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a nejnižší u lipového dřeva $570 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Hustota dřeva je značně variabilní závislá na mnoha faktorech (Zobel a Buijtenen, 1989; Tsoumis, 1991). Zjištěné hustoty jednotlivých druhů dřev se shodují s rozmezím hustot uváděných v literatuře (tab.2) a to až na dřevo dubu, u kterého byla zjištěna nepatrně vyšší hustota. Průměrné hustoty dřev zkoumaných dřevin nevykazovaly žádné extrémní hodnoty, které by znemožňovaly stanovení vybraných vlastností, kterými se tato práce zabývá.



Graf 1 - Hustoty dřev vybraných dřevin

Tabulka 1 - Hustota, základní statistické údaje

Hustota [kg/m ³]						
Dřevina	Počet vzorků	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Var. koef. [%]
Buk	160	729	673	802	25	3,4
Bříza	160	716	616	800	31	4,3
Lípa	160	570	509	639	31	5,4
Dub	160	721	647	811	41	5,7
Jasan	160	655	609	701	13	2,0

Tabulka 2 - Hustoty uváděné v literatuře

Hustota [kg/m ³]			
Dřevina	Tsoumis (1991)	Wagenfür (2000)	Ross et al. (2010)
Buk	740	720	640
Bříza	730	650	620
Lípa	540	530	—
Dub	690	690	610
Jasan	700	680	600

5.2 Vlhkost

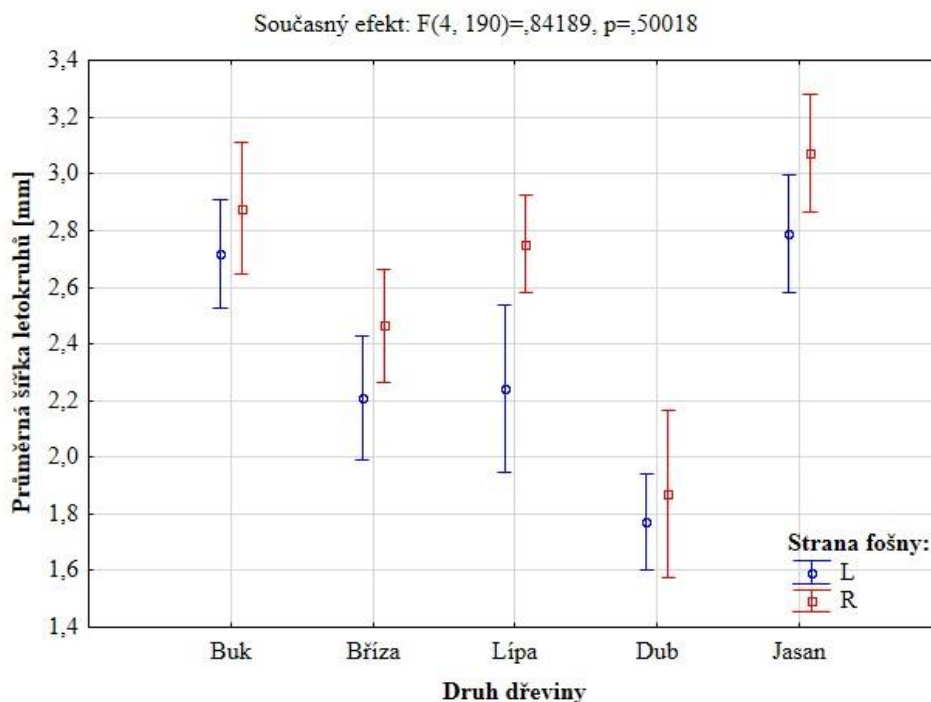
Po na-klimatizování těles byly u dřev jednotlivých druhů dřevin zjištěny vlhkosti, které jsou uvedeny níže (tab. 3). Při klimatizování byly nastaveny takové parametry, aby bylo dosaženo 12 % absolutní vlhkosti dřeva, to bylo s malými odchylkami téměř u všech druhů dosaženo až na dřevo lípy. Lípa dosáhla jiné rovnovážné vlhkosti a to 10,2 %, k podobným hodnotám došel ve své práci i Novák (2018), který po na-klimatizování zkušebních těles dřeva lípy zjistil absolutní vlhkost 10,6 %. Tento stav může být vysvětlen tím, že dřevo lípy má výrazně rozdílnou mez hygroskopicity než dřevo ostatních druhů dřevin, které byly v této práci řešeny, a tudíž za stejných podmínek (teplota, relativní vlhkost vzduchu) dosahuje jiné rovnovážné vlhkosti.

Tabulka 3 - Rovnovážné vlhkosti dřeva vybraných druhů dřevin, základní statistické údaje

Vlhkost [%]						
Dřevina	Počet vzorků	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Var. koef. [%]
Buk	40	11,9	10,9	12,8	0,5	4,1
Bříza	40	11,7	11,1	12,4	0,3	2,4
Lípa	40	10,2	9,6	10,7	0,3	2,8
Dub	40	11,5	10,2	12,2	0,4	3,8
Jasan	40	12,0	11,1	12,7	0,4	3,3

5.3 Šířka letokruhů

Na grafu (graf 2) jsou vyobrazeny zjištěné průměrné šířky letokruhů u jednotlivých druhů dřevin. Šířka a struktura letokruhů je značně proměnlivá ovlivněna velkým množstvím činitelů. Šířka letokruhu se mění jak po průměru kmene, tak po jeho délce (Kollmann a Coté, 1968, Tsoumis, 1991). Z uvedeného grafu vyplývá, že průměrná šířka letokruhů vybraných dřevin je rozdílná v závislosti na tom, zdali vzorky byly vymanipulovány z levé či pravé strany fošny vzhledem k uložení dřevě v jednotlivých fošnách. Avšak statisticky významný se potvrdil pouze u lipového dřeva.



Graf 2 - Průměrná šířka letokruhů vybraných dřevin

Graf je také doplněn základními statistickými údaji, které jsou vyobrazeny níže (tab. 4). Z tabulky je patrné, že největší mírou variability se vykazuje lipové dřevo, naopak nejmenší mírou variability vykazuje dubové dřevo.

Tabulka 4 - Průměrná šířka letokruhů vybraných dřevin, základní statistické údaje

Průměrná šířka letokruhů [mm]						
Dřevina	Počet vzorků	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Var. koef. [%]
Buk	40	2,8	1,6	3,7	0,4	15,2
Bříza	40	2,4	1,5	3,4	0,5	21,0
Lípa	40	2,6	1,7	4,0	0,6	23,1
Dub	40	1,8	1,1	2,4	0,3	18,0
Jasan	40	2,9	1,3	3,6	0,5	18,4

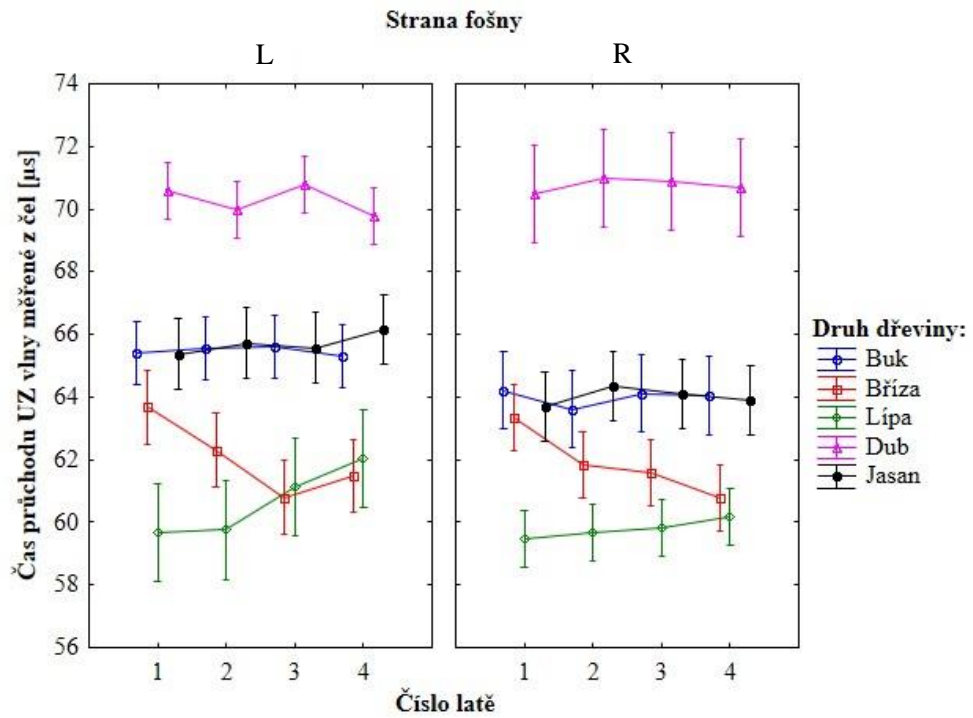
Tsoumis (1991) ve své práci uvádí, že šířka letokruhů ovlivňuje výslednou hustotu dřeva, k podobným závěrům dochází ve své práci i Kollmann a Côté (1968), na základě této skutečnosti byla řešena závislost hustoty na šířce letokruhů, a to pomocí grafů lineární regrese (příloha 5). Z tabulky je patrné (tab.5), že poměrně vysoká závislost hustoty na šířce letokruhů byla potvrzena u lipového dřeva s korelačním koeficientem $r = -0,6037$, střední závislost byla potvrzena u dubového a jasanového dřeva. Malou závislost vykazovalo březové ($r = -0,2686$) a bukové ($r = 0,2618$) dřevo, avšak u těchto dvou dřevin nebyla potvrzena statistická významnost (p – hodnota), kterou jsou doplněny grafy v příloze (příloha 5).

Tabulka 5 - Závislost hustoty na šířce letokruhů vybraných dřevin

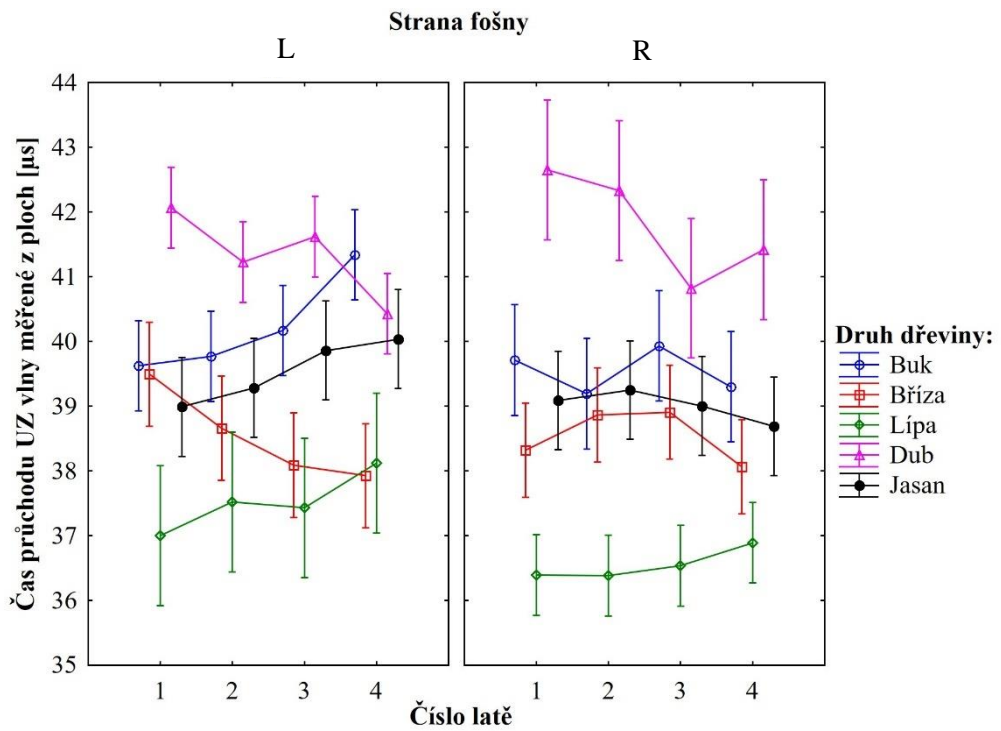
Závislost hustoty na šířce letokruhů	
Dřevina	Korelační koeficient
Buk	0,2618
Bříza	-0,2686
Lípa	-0,6037
Dub	0,4609
Jasan	0,4574

5.4 Ověření paralelnosti zkušebních těles

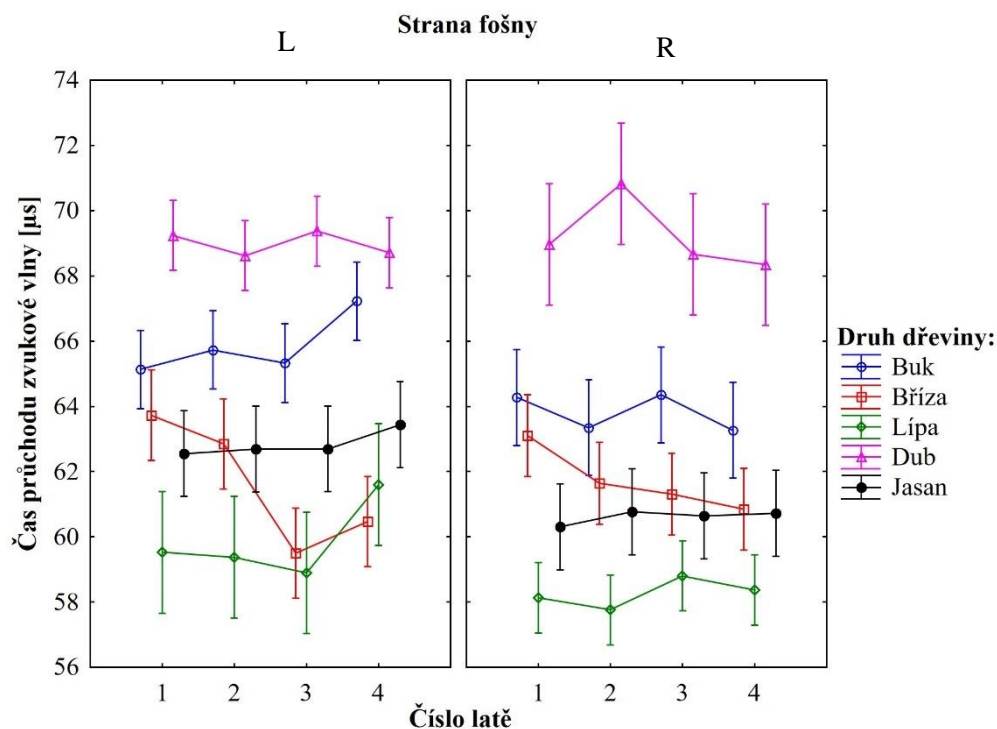
Jelikož je šíření zvuku závislé na prostředí, tak lze vztah mezi zvukem a prostředím v kterém se šíří využít u nedestruktivních metod zkoušení materiálů (Bucur a Timell, 2006). Beall (2002) ve své práci došel k závěru, že rychlost zvuku s rostoucím odklonem dřevních vláken klesá a k maximálnímu útlumu zvukové vlny dochází při odklonu vláken od podélné osy v rozmezí 45-60°. Reinprech (2012) ve své práci uvádí, že rychlost zvuku se také mění při výskytu vad (hniloba, suky atd.), kdy s rostoucím výskytem těchto vad rychlost zvuku klesá. Na základě těchto skutečností, se pro ověření paralelnosti vzorků přistoupilo k porovnání časů potřebných pro přechod zvukové vlny dřevem (graf 3, 4, 5). Pro porovnání byly použity tři metody, tyto metody jsou již popsány v kapitole 4.3.2. Po vyhodnocení dat byly sledovány především rozdíly mezi zkušebními vzorky, které na sebe v rámci jedné zkoušky navazovaly. Tedy pro stanovení statické pevnosti v ohybu byly porovnávány první dva zkušební (číslo latě 1 a 2) vzorky a pro stanovení dynamické pevnosti následující zkušební tělesa (číslo latě 3 a 4). Systém číslování a uložení jednotlivých vzorků je popsán v kapitole 4.1. U první metody (graf 3) nebyla mezi zkušebními vzorky, které v rámci zkoušky na sebe navazují, zaznamenána žádná statistická významnost, a tudíž byla potvrzena paralelnost zkušebních těles, která byla potvrzena i mnohonásobným porovnáním prostřednictvím Duncanového testu, avšak pro velkou rozsáhlost tento test není v této práci uveden. U druhé metody (graf 4) byla též potvrzena paralelnost zkušebních těles, které v rámci zkoušky na sebe navazovaly, avšak mezi vzorky byly sledovány větší rozdíly než u první metody. Největší rozdíly byly zaznamenány u dubového dřeva, a to u zkušebních těles z levé strany fošny (L), které podléhaly zkouškám statické pevnosti v ohybu (číslo latě 1 a 2). U třetí metody byla též potvrzena paralelnost zkušebních těles s menšími rozdíly než u předchozí metody. Z uvedených grafů (graf 3, 4, 5) vyplývá, že jednotlivé metody se liší v hodnotách, a to jak v rámci jednotlivých dřevin, tak i v sekcích zkušebních těles. I přes tuto skutečnost, byla potvrzena paralelnost vzorků u všech metod, a tudíž zabezpečila větší vypovídající hodnoty následujících zkoumaných vlastností (pevnost dřeva v ohybu při statickém a dynamickém zatížení v radiálním a tangenciálním směru).



Graf 3 - Čas průchodu UZ vlny měřené z čel zkušebních těles vybraných dřevin



Graf 4 - Čas průchodu UZ vlny měřené z ploch zkušebních těles vybraných dřevin



Graf 5 - Čas průchodu zvukové vlny u zkušebních těles vybraných dřevin

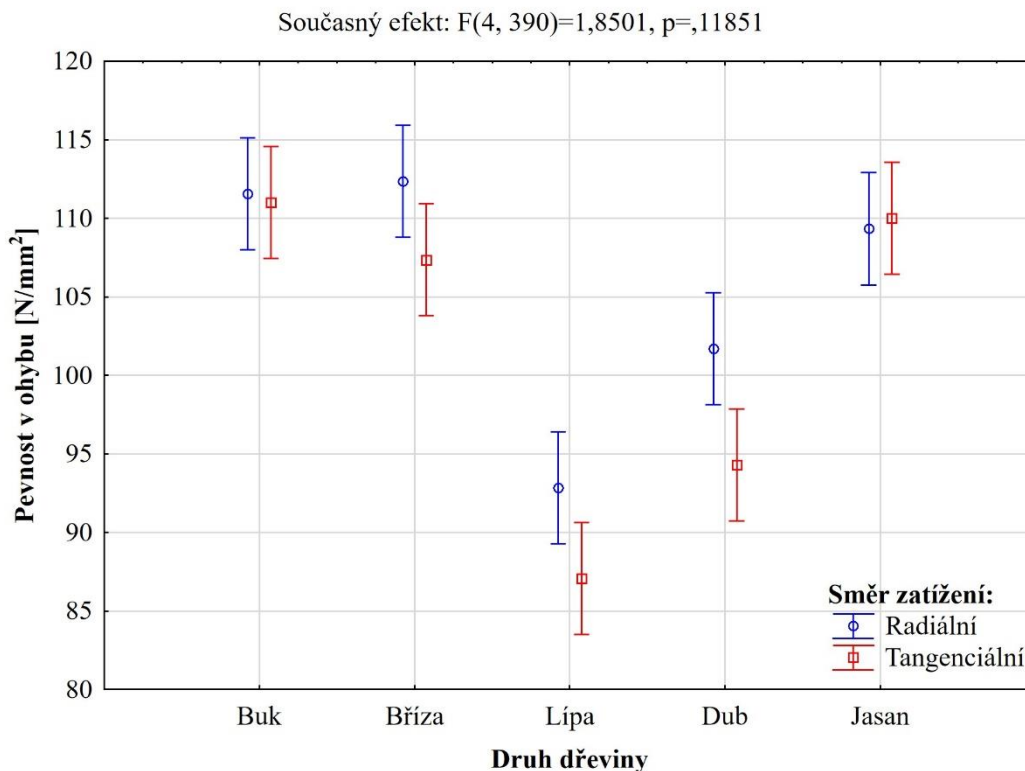
Ze získaných dat (čas, vzdálenost sond od sebe, hustota dřeva) lze stanovit dynamické moduly pružnosti prostřednictvím postupů, které jsou uvedeny v kapitole 4.3.2. Avšak stanovení dynamických modulů pružnosti u vybraných dřevin nebylo primární součástí této práce, a proto jsou uvedeny v přílohách (příloha 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12). Z uvedených grafů (příloha 6, 8, 10) vyplývá, že u všech metod dosahovalo nejvyšších hodnot dynamického modulu pružnosti březové dřevo, a to v rozmezí 16 883-18 513 MPa střední hodnoty. Nejnižších hodnot dynamického modulu pružnosti dosahovalo u všech metod dubové dřevo, a to v rozmezí 13 259-14 332 MPa střední hodnoty. U dubového dřeva byla také prokázána největší míra variability, a to opět u všech metod (příloha 7, 9, 11), nejnižší míru variability vykazovalo jasanové dřevo. Na grafu (příloha 12) jsou pro porovnání zobrazeny zjištěné hodnoty všemi metodami u všech vybraných dřevin. Z tohoto grafu je patrné, že nejvyšších středních hodnot dynamického modulu pružnosti bylo dosaženo u všech zkoumaných dřevin za použití ultrazvukové metody, kde byly piezoelektrické snímače přikládány na plochy vzorků a nejnižších středních hodnot bylo dosahováno u druhé ultrazvukové metody (snímače byly přikládány na koncové čela vzorků). Nepatrně vyšší střední hodnoty dynamického

modulu pružnosti jsou patrné u rezonanční metody. Oberhofnerová et al. (2016) ve své práci stanovila dynamický modul pružnosti u smrkového a dubového dřeva prostřednictvím ultrazvukové metody (piezoelektrické snímače byly přikládány na plochy zkušebních těles) a rezonanční metody, a došla k podobným rozdílům mezi středními hodnotami dynamického modulu pružnosti u dubového dřeva jako v této práci. Avšak u smrkového dřeva nebyly zaznamenány až tak velké rozdíly v závislosti na použité metodě. K malým rozdílům u smrkového dřeva v závislosti na použité metodě došel ve své práci i Holeček et al. (2016). Na základě těchto skutečností lze vyvodit, že u listnatých dřevin dochází k větším rozdílům hodnot dynamického modulu pružnosti v závislosti na použité metodě než u jehličnatých dřevin. Tuto skutečnost lze vysvětlit tím, že dřevo jehličnatých dřevin má jednodušší anatomickou stavbu, než je tomu u listnatých dřev a šíření zvukové vlny je do jisté míry touto anatomickou stavbou ovlivněno.

5.5 Statická pevnost v ohybu

Z uvedeného grafu (graf 6) je zřejmé, že nejvyšších hodnot statické pevnosti v ohybu dosahovalo březové dřevo při zatěžování zkušebních těles v radiálním směru. Střední hodnota meze pevnosti v ohybu byla v tomto případě 112,4 MPa. Nejnižší střední hodnoty dosahovalo lipové dřevo při zatížení v tangenciálním směru a to 87,1 MPa. Bukové a jasanové dřevo se vykazovalo podobnými průměrnými hodnotami statické pevnosti v ohybu v obou dvou směrech zatížení, a to v rozmezí 109,3-111,6 MPa. Střední hodnota pevnosti v ohybu u dubového dřeva se vykazovala 94,3 MPa v tangenciálním směru a 101,7 MPa v radiálním směru zatížení. Všechny zjištěné hodnoty statické pevnosti v ohybu u vybraných dřevin při zatížení v radiálním nebo tangenciálním směru jsou uvedeny níže v tabulkách (tab. 6, 7). Z uvedené tabulky (tab. 6) je patrné, že největší míru variability v hodnotách meze pevnosti v ohybu při zatížení v tangenciálním směru vykazovalo dubové dřevo a nejnižší míra variability byla sledována u jasanového dřeva, stejný trend byl potvrzen i u hodnot při zatížení v radiálním směru (tab. 7). Z uvedeného grafu (graf 6) také vyplývá, že největší rozdíly ve středních hodnotách pevnosti v ohybu dosahovalo dřevo dubu, nižší rozdíly byly sledovány u dřeva lípy a břízy. Dřevo buku a jasanu nevykazovalo téměř žádné rozdíly v hodnotách statické pevnosti v ohybu v závislosti na směru zatížení zkušebních těles.

Někteří autoři uvádějí (Požgaj et al., 1993; Güray, 2019), že mez v pevnosti při tangenciálním ohybu může být o 10-12 % vyšší než v radiálním ohybu u dřeva jehličnatých dřevin. Požgaj (1993) ve své práci uvádí, že u listnatých dřevin jsou tyto rozdíly při statickém ohybu zanedbatelné v rozmezí 2-4 %. Na základě tohoto tvrzení byla vytvořena tabulka (tab. 8), v které jsou znázorněny rozdíly statické pevnosti v ohybu v závislosti na směru zatěžování (radiální a tangenciální ohyb).



Graf 6 - Pevnost v ohybu při statickém zatížení u vybraných dřevin

Tabulka 6 - Pevnost v ohybu při statickém zatížení v tangenciálním směru, základní statistické údaje

Pevnost v ohybu – tangenciální směr [N/mm ²]						
Dřevina	Počet vzorků	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Var. koef. [%]
Buk	40	111,0	96,1	123,1	6,6	6,0
Bříza	40	107,4	74,3	132,4	12,7	11,8
Lípa	40	87,1	55,1	103,9	10,6	12,2
Dub	40	94,3	65,5	131,7	17,8	18,9
Jasan	40	110,0	100,6	117,9	3,8	3,5

Tabulka 7 - Pevnost v ohybu při statickém zatížení v radiálním směru, základní statistické údaje

Pevnost v ohybu – radiální směr [N/mm ²]						
Dřevina	Počet vzorků	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Var. koef. [%]
Buk	40	111,6	93,5	129,9	9,4	8,4
Bříza	40	112,4	71,9	132,4	12,3	10,9
Lípa	40	92,8	65,7	107,6	9,3	10,0
Dub	40	101,7	65,9	134,2	17,7	17,4
Jasan	40	109,3	97,8	117,8	5,0	4,6

V tabulce níže (tab. 8) jsou uvedeny změny středních hodnot statické pevnosti v ohybu u dřev vybraných dřevin v závislosti na směru zatěžování. Tyto změny jsou vyjádřeny procentuálně a vztažené k tomu, jak se změnila střední hodnoty statické pevnosti v ohybu při radiálním zatížení proti hodnotám zjištěným v tangenciálním ohybu. Z tabulky je patrné, že největší rozdíl byl zaznamenán u dřeva dubu a to 7,9 %, menšími rozdíly se vykazovalo dřevo lípy 6,6 % a břízy 4,7 %, u dřeva buku a jasanu jsou tyto rozdíly zanedbatelné. Statisticky významné rozdíly středních hodnot mezi směry zatěžování byly prokázány u dřeva buku a lípy, pro mnohonásobné porovnání byl použit Duncanův test (příloha 13).

Tabulka 8 - Procentuální změny statické pevnosti v ohybu v závislosti na směru zatěžování

Dřevina	Směr zatížení	Procentuální změna statické pevnosti v ohybu proti referenčním vzorkům (ref. tang. směr) [%]
Buk	Rad.	0,5
Bříza	Rad.	4,7
Lípa	Rad.	6,6
Dub	Rad.	7,9
Jasan	Rad.	-0,6

Dinwoodie ve své práci uvádí, že pevnost v ohybu je do značné míry ovlivněna výskytem vad a odklonem dřevních vláken od podélné osy, avšak v této práci byl kladen velký důraz na kvalitu zkoušeného materiálu a ověřována paralelnost zkušebních těles, které zaručily co nejvyšší vypovídající hodnoty zkoumaných vlastností. Z výše uvedeného je patrné (tab. 8), že u dřev některých druhů listnatých dřevin (dub, bříza) bylo dosahováno větších a statisticky významných rozdílů ve

středních hodnotách meze pevnosti v ohybu v závislosti na směru zatěžování, než ve své práci uvádí Požgaj et al. (1993). I přes tuto skutečnost jsou tyto rozdíly považovány za zanedbatelné a autoři (Tsoumis, 1991; Požgaj et al., 1993, Ross et al., 2010) ve svých pracích uvádějí pouze hodnoty statické pevnosti v ohybu, které byly získány standardizovanými postupy tedy v tangenciálním směru (tab. 9).

Tabulka 9 - Hodnoty statické pevnosti v ohybu dostupné v literatuře

Statická pevnost v ohybu [N/mm ²]				
Dřevina	Směr zatížení	Tsoumis (1991)	Požgaj et al. (1993)	Ross et al. (2010)
Buk	Tangenciální	103	124	103
Bříza	Tangenciální	114	127	114
Lípa	Tangenciální	60	—	60
Dub	Tangenciální	105	85	71
Jasan	Tangenciální	106	125	103

Zjištěné hodnoty statické pevnosti v ohybu při zatížení v tangenciálním směru (tab. 6) u dřev vybraných druhů dřevin se shodují s rozmezím hodnot uváděných v literatuře (tab. 9) a to až na dřevo lípy, u kterého byla střední hodnota meze pevnosti ve statickém ohybu podstatně vyšší, a to o 27,1 MPa. Podobně i Pelit et al. (2018) ve své práci uvádí, že jím zjištěná hodnota statické pevnosti v ohybu u dřeva lípy je 60, 9 MPa, což je též podstatně nižší hodnota, než která je uváděna v této práci.

Podle Matoviče (1993) se stoupající hustotou dřeva se statická pevnost v ohybu zvyšuje, nicméně s určitou variabilitou. Na základě této skutečnosti byly vytvořeny grafy lineární regrese. Jelikož by bylo grafů příliš mnoho, tak jsou v příloze pro přehled uvedeny pouze tři (příloha 14), ze zbylých grafů byly převedeny korelační koeficienty do tabelární podoby (tab. 10). Z uvedené tabulky (tab. 10) vyplývá, že vysoká závislost statické pevnosti v ohybu na hustotě byla potvrzena u dřeva dubu s vysokými korelačními koeficienty ($r = 0,7426$; $0,8047$). Střední závislost byla potvrzena u jasanového dřeva s korelačními koeficienty $r = 0,3696$ a $r = 0,4745$. Střední závislost meze pevnosti v ohybu na hustotě byla též potvrzena u dřeva břízy, ale pouze v radiálním ohybu s korelačním koeficientem $r = - 0,4940$. Malá závislost byla sledována u lipového dřeva v tangenciálním ohybu s korelačním

koeficientem $r = 0,3335$. U výše zmíněných závislostí statické pevnosti v ohybu na hustotě byla prokázána statistická významnost (p – hodnota), u zbylých výše neuvedených případů byly sledovány nízké závislosti bez statistické významnosti.

Tabulka 10 - Závislost statické pevnosti na hustotě vybraných dřevin

Závislost statické pevnosti na hustotě		
Dřevina	Směr zatížení	Korelační koeficient
Buk	Radiální	0,2240
	Tangenciální	0,2023
Bříza	Radiální	-0,4940
	Tangenciální	0,0771
Lípa	Radiální	0,0356
	Tangenciální	0,3335
Dub	Radiální	0,7426
	Tangenciální	0,8047
Jasan	Radiální	0,3696
	Tangenciální	0,4745

Ze získaných dat při stanovení statické pevnosti v ohybu bylo možné vypočítat statický modul pružnosti podle vzorce, který je uveden v kapitole 4.3.3, avšak stanovení tohoto modulu nebylo primárním cílem této práce, a tudíž jsou jeho hodnoty uvedeny v příloze (příloha 15, 16, 17) jako doplňující vlastnost. Z uvedeného grafu (15) vyplývá, že nejvyšších hodnot statického modulu pružnosti dosahovalo dřevo břízy při zatěžování zkušebních těles v radiálním směru. Střední hodnota statického modulu pružnosti byla v tomto případě 11 643 MPa. Nejnižší střední hodnoty dosahovalo dřevo lípy při zatížení v tangenciálním směru a to 9 332 MPa. Ostatní střední hodnoty statických modulů pružnosti v závislosti na směru zatížení u vybraných dřevin nabývají hodnot mezi maximální a minimální střední hodnotou uvedenou výše. Podrobný přehled je uveden v tabulkách v přílohách (příloha 16, 17). Z uvedených tabulek vyplývá, že největší míru variability v hodnotách statického modulu pružnosti vykazovalo dřevo dubu, nejmenší míra variability byla sledována u dřeva jasanu, v obou dvou případech byla tato proměnlivost prokázána jak v radiálním, tak tangenciálním směru zatěžování.

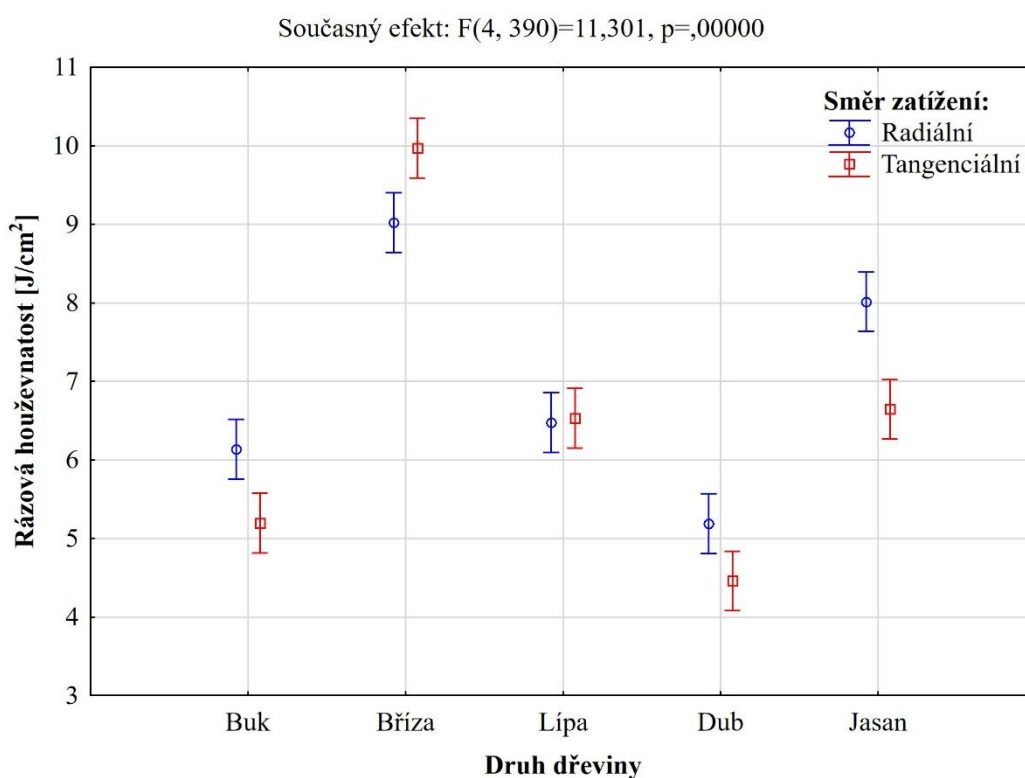
V závislosti na směrech zatížení byly pomocí mnohonásobného porovnání (Duncanův test) prokázány statisticky významné rozdíly středních hodnot statického modulu pružnosti, a to u dřeva buku, lípy, dubu a jasanu, u březového dřeva nebyl zaznamenán statisticky významný rozdíl (příloha 18).

Novák (2018) ve své práci uvádí, že mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti je poměrně vysoká závislost. Na základě tohoto tvrzení, byly vytvořeny grafy lineární regrese. Jelikož by grafů bylo příliš mnoho, tak byly příslušné korelační koeficienty převedeny do tabelární podoby (příloha 19). Z tabulky je patrné že závislost statických a dynamických modulů pružnosti je značně proměnlivá a závislá jak na druhu dřeviny, tak na směru zatěžování a použité metodě při stanovení dynamického modulu pružnosti. U bukového a dubového dřeva byla prokázána téměř ve všech případech střední až vysoká závislost statických a dynamických modulů pružnosti, a to až na závislost statického modulu pružnosti v tangenciálním směru a dynamického modulu stanoveného pomocí ultrazvukové metody (z ploch zkušebních těles), kde nebyla pozorována statistická významnost (p – hodnota). Střední až vysoká závislost byla prokázána u dřeva jasanu, a to ve všech případech. U dřeva lípy byla sledována střední závislost, a to až na závislost mezi statickým modulem pružnosti v radiálním směru a dynamickými moduly pružnosti stanovenými ultrazvukovými metodami. U březového dřeva byla prokázána statisticky významná závislost pouze mezi statickým modulem pružnosti v radiálním směru a dynamickým modulem pružnosti stanoveným pomocí rezonanční metody. Všechny hodnoty korelačních koeficientů jsou uvedeny v tabulce (příloha 19).

5.6 Rázová (dynamická) houževnatost dřeva

Z uvedeného grafu (graf 7) vyplývá, že nejvyšších hodnot rázové (dynamické) houževnatosti dosahovalo dřevo břízy při zatěžování zkušebních těles v tangenciálním směru. Střední hodnota rázové houževnatosti byla v tomto případě $10 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$. Nejnižší střední hodnoty dosahovalo dubové dřevo v tangenciálním směru a to $4,5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$. U bukového dřeva byla zjištěna střední hodnota rázové houževnatosti $6,1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ v radiálním směru a $5,2 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ v tangenciálním směru zatížení. U lipového dřeva nebyl v průměrných hodnotách rázové houževnatosti v závislosti na směru zatížení pozorován téměř žádný rozdíl se střední hodnotou

6,5 J cm⁻². Největší rozdíly v průměrných hodnotách dynamické houževnatosti byly zaznamenány u jasanového dřeva, kde v radiálním směru byla 8 J cm⁻² a v tangenciálním směru zatížení 6,6 J · cm⁻². Všechny zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách (tab. 11, 12). Z uvedených tabulek je zřejmé, že největší míru variability v hodnotách dynamické houževnatosti vykazovalo dřevo dubu a nejmenší míra variability byla sledována u jasanového dřeva, a to jak při zatížení v tangenciálním (tab. 11) tak radiálním (tab. 12) směru.



Graf 7 - Rázová (dynamická) houževnatost u dřev vybraných druhů dřevin

Tabulka 11 – Rázová houževnatost při zatížení v tangenciálním směru, základní statistické údaje

Rázová houževnatost – tangenciální směr [J/cm ²]						
Dřevina	Počet platných	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Var. koef. [%]
Buk	40	5,2	2,8	6,9	1,1	21,2
Bříza	40	10,0	5,6	12,4	1,8	18,1
Lípa	40	6,5	3,8	8,3	1,0	14,9
Dub	40	4,5	2,8	7,5	1,0	23,5
Jasan	40	6,6	5,4	7,9	0,6	8,7

Tabulka 12 - Rázová houževnatost při zatížení v radiálním směru, základní statistické údaje

Rázová houževnatost – radiální směr [J/cm ²]						
Dřevina	Počet platných	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Var. koef. [%]
Buk	40	6,1	4,3	7,4	0,7	12,0
Bříza	40	9,0	4,8	12,1	1,9	21,4
Lípa	40	6,5	4,7	9,1	1,0	15,8
Dub	40	5,2	2,7	9,6	1,5	29,0
Jasan	40	8,0	6,1	9,5	0,7	8,3

Z uvedeného grafu (graf. 7) také vyplývá, že střední hodnoty rázové houževnatosti jsou závislé jak na druhu dřeviny, tak na směru zatěžování zkušebních těles. Patrné rozdíly v závislosti na směru zatěžování jsou u dřeva buku, dubu, břízy a jasanu. Požgaj (1993) ve své práci uvádí, že u dřeva s výrazným rozdílem mezi jarním a letním dřevem, tedy u dřevin jehličnatých a listnatých s kruhovitě pórovitou stavbou, je spotřebovaná práce na porušení zkušebního tělesa (rázová houževnatost) v rozsahu o 25–50 % vyšší v radiálním než v tangenciálním směru zatěžování. U dřeva druhů listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva nezaznamenal žádné významné rozdíly. Na základě tohoto tvrzení byla vytvořena tabulka (tab. 13), v které jsou znázorněny rozdíly dynamické houževnatosti v závislosti na směru zatěžování (radiální a tangenciální).

Tabulka 13 - Procentuální změny rázové houževnatosti v závislosti na směru zatěžování

Dřevina	Směr zatížení	Procentuální změna rázové (dynamické) houževnatosti proti referenčním vzorkům (ref. tang. směr) [%]
Buk	Rad.	18,1
Bříza	Rad.	-9,5
Lípa	Rad.	-0,8
Dub	Rad.	16,3
Jasan	Rad.	20,6

V tabulce výše (tab. 13) jsou uvedeny změny středních hodnot rázové houževnatosti u dřev vybraných dřevin v závislosti na směru zatěžování. Tyto změny jsou vystiženy procentuálně a vztahené k tomu, jak se změnilly střední hodnoty dynamické houževnatosti při radiálním zatížení proti hodnotám

v zjištěném v tangenciálním směru. Z tabulky je patrné, že největší rozdíl středních hodnot byl zaznamenán u dřeva jasanu a to 20,6 %, nepatrně menší rozdíly byly pozorovány u dřeva buku 18,6 % a dubu 16,3 %. U dřeva břízy byl zaznamenán rozdíl s opačným trendem než u dřev výše zmíněných a to - 9,5 %. Lipové dřevo se nevykazovalo téměř žádným rozdílem (-0,8 %), tento rozdíl lze považovat za zanedbatelný. Statisticky významné rozdíly středních hodnot rázové houževnatosti v závislosti na směru zatěžování byly prokázány u dřeva buku, břízy, dubu a jasanu, u lipového dřeva nebyl prokázán statisticky významný rozdíl. Pro mnohonásobné porovnání byl použit Duncanův test (příloha 20). Z výše uvedených údajů je patrné, že u dřeva listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou byly prokázány statisticky významné rozdíly středních hodnot rázové houževnatosti v závislosti na směru zatěžování. Požgaj (1993) ve své práci uvádí, že hodnoty dynamické houževnatosti v závislosti na směru zatížení jsou u dřeva listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou shodné. Toto tvrzení tato práce nepotvrdila, jelikož u bukového dřeva byl zjištěn velký (18,1 %) a statisticky významný rozdíl. Též u dřeva břízy byl prokázán statisticky významný rozdíl ve středních hodnotách rázové houževnatosti, avšak v tomto případě nabýval záporné hodnoty (-9,5 %). Tuto zvláštnost lze vysvětlit tím, že i přes důkladný výběr materiálu a jeho ověření paralelnosti bylo po vykonání zkoušek zjištěno prostřednictvím obrazové analýzy, že se březové dřevo vykazuje na příčném řezu výrazným ale okem nepatrným zvlněním letokruhů (kap. 3.2.2.2; obr. 3-A). Z toho lze vyvodit, že toto zvlnění velkou mírou ovlivnilo hodnoty rázové houževnatosti.

Celkově lze usoudit, že hodnoty rázové houževnatosti mezi jednotlivými zkoumanými dřevinami i směry zatěžování, jsou do značné míry ovlivněny anatomickou stavbou dřeva jednotlivých druhů dřevin a procentuálním zastoupením základních stavebních elementů (tracheje, tracheidy, parenchymatické buňky, libriformní vlákna atd). Dále lze usoudit, že anatomická stavba a procentuální podíl jednotlivých stavebních elementů (na celkovém objemu dřeva) se při stanovení dynamické houževnatosti více projevuje a podílí na rozdílu hodnot (radiální tangenciální směr zatížení), než je tomu u pevnosti v ohybu při statickém zatížení. Hodnoty také budou ovlivněny jak submikroskopickou stavbou dřeva (fibrilární struktura) tak zastoupením základních stavebních biopolymerů dřeva

(celulóza, hemicelulózy, lignin) v jednotlivých anatomických elementech dřeva. Conrad et al. (2003) řešil ve své práci výsledky více autorů a došel k závěrům, že při porušení dřeva dochází k rozdílnému šíření trhlin na mikroskopické a submikroskopické úrovni dřeva v závislosti na směru zatížení, z čeho lze vyvodit, že rozdílné šíření trhlin u dřeva jednotlivých vybraných dřevin bude mít též vliv na výsledné hodnoty dynamické houževnatosti.

Pro porovnání zjištěných hodnot rázové houževnatosti byla vytvořena tabulka (tab. 14) s údaji, které ve svých pracích uvádějí autoři.

Tabulka 14 - Hodnoty rázové houževnatost dostupné v literatuře

Rázová houževnatost [J/cm ²]					
Dřevina	Směr zatížení	Bodig a Jayne (1982)	Tsomis (1991)	Požgaj et al. (1993)	Ross et al. (2010)
Buk	Tangenciální	—	7,8	8,1	—
	Radiální	—	—	—	—
Bříza	Tangenciální	7,3	8,3	8,3	10,9
	Radiální	9,3	—	—	14,1
Lípa	Tangenciální	—	4,9	—	—
	Radiální	—	—	—	—
Dub	Tangenciální	6,5	7,4	4,7	7,5
	Radiální	6,2	—	—	7,5
Jasan	Tangenciální	—	6,7	8,1	—
	Radiální	—	—	—	—

Z uvedené tabulky je patrné, že většina hodnot dynamické houževnatosti je uváděna pouze v tangenciálním směru zatížení. Ze všech druhů dřevin, kterými se tato práce zabývala byly dostupné hodnoty dynamické houževnatosti při radiálním směru zatížení pouze u dřeva dubu a břízy. Z tabulky vyplývá (tab. 14) že získané údaje z literatury se ve značné míře liší od zjištěných údajů v této práci. Rozdíly ve středních hodnotách dynamické houževnatosti u dřeva dubu a břízy byly statisticky významné a neshodují se získanými údaji v literatuře, též se neshodují ani hodnoty rázové houževnatosti při tangenciálním směru zatížení u lipového a bukového dřeva. Hodnoty rázové houževnatosti dřeva jasanu při tangenciálním směru zatížení se téměř shodují s údaji uváděnými Požgajem et al. (1993). Z výše uvedeného je patrné, že hodnoty rázové houževnatosti jsou velmi variabilní a závislé jak od druhu dřeviny, tak směru zatěžování. Cílem této práce bylo také zajistit co největší

paralelnost zkušebních těles a tím zaručit vyšší vypovídající hodnoty jednotlivých zkoumaných vlastností dřeva, jaký postup pro toto ověření zvolili výše zmínění autoři neuvádí, a tudíž i tento fakt může ovlivnit výsledné hodnoty vlastností.

Tabulka 15 - Závislost rázové houževnatosti na hustotě vybraných dřevin

Závislost rázové houževnatosti na hustotě		
	Směr zatížení	Korelační koeficient
Buk	Radiální	0,3824
	Tangenciální	0,1854
Bříza	Radiální	0,5386
	Tangenciální	0,2552
Lípa	Radiální	-0,1828
	Tangenciální	0,0987
Dub	Radiální	-0,2472
	Tangenciální	-0,2219
Jasan	Radiální	0,1873
	Tangenciální	0,2916

V této práci byla potvrzena ve většině případů statisticky významná závislost statické pevnosti v ohybu na hustotě (kap. 5.5; tab. 10). Na základě této skutečnosti byly vytvořeny grafy lineární regrese pro vyjádření závislosti rázové houževnatosti na hustotě. Jelikož by bylo grafů příliš mnoho, tak jsou pro přehled uvedeny pouze čtyři (příloha 21), ze zbylých grafů byly převedeny korelační koeficienty do tabelární podoby (tab. 15). Z uvedené tabulky vyplývá, že závislost rázové houževnatosti na hustotě u dřev vybraných dřevin nejsou až tak velké, jak tomu bylo v případě pevnosti v ohybu při statickém zatížení. Statisticky významná závislost dynamické houževnatosti (při zatížení v radiálním směru) na hustotě byla potvrzena pouze u dřeva buku s korelačním koeficientem $r = 0,3284$ a břízy ($r = 0,538$). U ostatních případů byly sledovány nízké závislosti a nebyla prokázána statistická významnost.

Pozn.: Pro jednodušší orientaci a stručný přehled byla vytvořena souhrnná statistická tabulka všech stanovených vlastností dřeva jednotlivých druhů dřevin, které byly v rámci této práce řešeny (příloha 22).

6 Závěr

Výzkum měl být primárně prováděn na dřevě dubu (*Quercus robur* L.) a buku (*Fagus sylvatica* L.), tedy druhů zastupujících listnaté dřeviny s kruhovitě a roztroušeně pórovitou stavbou dřeva. Pro větší komplexnost byly do této práce zahrnuty i další zástupci listnatých dřevin. Do dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva byl dále zařazen jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.) a do dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva byla také zahrnuta bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth) a lípa srdčitá (*Tilia cordata* Mill.).

Hlavním smyslem této práce bylo zjistit, zdali u dřeva vybraných dřevin nedochází ke změnám hodnot pevnosti v ohybu při statickém a dynamickém zatížení v závislosti na směru působící vnější síly (radiální a tangenciální směr zatížení). Před vykonáním jednotlivých zkoušek byl kladen velký důraz na výběr materiálu a vhodný výrobní postup zkušebních těles, který zajistil v co největší možné míře jejich paralelnost, která zabezpečila alespoň částečnou eliminaci heterogenity dřeva a zajistila lepší vypovídající hodnoty determinující některou z posuzované vlastnosti. Paralelnost zkušebních těles byla ověřena metodami založenými na šíření zvuku ve dřevě (ultrazvuková, rezonanční).

Výsledky ukazují, že hodnoty statické pevnosti v ohybu byly u dřeva některých vybraných dřevin ovlivněny směrem zatížení. Statisticky významné rozdíly mezi středními hodnotami v závislosti na směru zatěžování se potvrdily u dřeva dubu a lípy. U zbylých dřevin nebyly prokázány statisticky významné rozdíly. Výsledky dále ukazují, že u hodnot rázové houževnatosti byly též pozorovány statisticky významné rozdíly v závislosti na směru působení vnější síly (radiální a tangenciální směr zatížení), a to u dřeva buku, břízy, dubu a jasanu. U lipového dřeva nebyl prokázán statisticky významný rozdíl. V procentuálním vyjádření rozdílů středních hodnot pevnosti v ohybu při statickém a dynamickém zatížení v závislosti na směru zatížení byly u výše zmíněných dřevin pozorovány větší rozdíly u dynamické houževnatosti, kde dochází k zatížení materiálu v řádu milisekund a navíc se projevuje stavba dřeva a zastoupení jeho základních stavebních elementů.

Tato práce měla poukázat na rozdíly statické a dynamické pevnosti v ohybu s ohledem na směr zatěžování. V některých případech byly pozorovány statisticky

významné odchylky v závislosti na směru působících vnějších sil (radiální a tangenciální zatížení) a to především u rázové houževnatosti, kde byly pozorovány poměrně velké procentuální rozdíly středních hodnot téměř u všech dřevin včetně dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva, u kterých ostatní autoři nezaznamenaly téměř žádné změny. Na základě této skutečnosti nastává otázka, zdali by se těchto poznatků nedalo využít v praxi, a to především u výrobků ze dřeva kde se rázové zatížení očekává (mosty, sportovní náčiní, nářadí, atd). Avšak výroba takovýchto výrobků s požadovanou orientací základních stavebních pletiv dřeva (vzhledem k očekávanému zatížení) by byla ve většině případů značně nákladná a problematická, a to jak z pohledu vymanipulování kvalitního materiálu (radiálního řeziva), tak i jeho zabudování do konečného výrobku (především u rozměrných výrobků).

Navzdory těmto faktům, tato práce přinesla poznatky o rozdílech hodnot statické a dynamické pevnosti v ohybu s přihlédnutím ke směru působících vnějších sil (radiální a tangenciální zatížení) a přispěla k rozšíření databáze, která je pro dřeviny vyskytujících se v ČR v tomto ohledu neúplná.

7 Použité zdroje

7.1 Literatura

BABIAK, Marián a Ján DUBOVSKÝ. *Problémy z mechanických vlastností dreva: príručka*. Zvolen: Is born hey Cortana Technická univerzita vo Zvolene, 2001. 71 s. ISBN 80-228-1076-2.

BALABÁN, Karel. *Nauka o dřevě: část I. - Anatomie dřeva*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1955. 216 s. Lesnická knihovna. Velká řada. Svazek 16.

BARNA, Milan, Ján KULFAN a Eduard BUBLINEC, ed. *Buk a bukové ekosystémy Slovenska: Beech and beech ecosystems of Slovakia*. Bratislava: Veda, 2011. 636 s. ISBN 978-80-224-1192-9.

BEDNAŘÍK, František a Oldřich MAUER. *Předosevní příprava lípy srdčité (Tilia cordata Mill.) fermentací po sběru semen ve voskové zralosti: certifikovaná metodika (osvědčení 42943/2014-MZE-16222/M85)*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014. 28 s. ISBN 978-80-7375-990-2.

BERTOVIÁ, Lídia, ed. *Flóra slovenska IV/1*. Bratislava: Veda, 1984. 432 s.

BODIG, Jozsef a Benjamin JAYNE. *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982. 712 s. ISBN 0-442-00822-8.

BORŮVKA, Vlastimil a Marián BABIAK. *Vlastnosti dřeva v příkladech*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2016. 139 s. ISBN 978-80-213-2618-7.

BUCUR, Voichita, TIMELL, T. E. a Rupert WIMMER, ed. *Acoustics of wood*. 2nd edition. Berlin: Springer - Verlag. Springer series in wood science, 2006. 393 s. ISBN 3-540-26123-0.

ČUNDERLÍK, Igor. *Štruktúra dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. 135 s. ISBN 978-80-228-2061-5.

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

GANDELOVÁ, Libuše, Petr HORÁČEK a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009. 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

- GANDELOVÁ, Libuše a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ. *Stavba dřeva*. 2., nezměn. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014. 187 s. ISBN 978-80-7375-966-7.
- GOLIAŠOVÁ, Kornélia a Eleonóra MICHALKOVÁ, ed. *Flóra Slovenska*. Bratislava: Veda, 2006. 342 s. ISBN 80-224-0922-7.
- HORÁČEK, Petr. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1988. 128 s. ISBN 80-7157-347-7.
- HORÁČEK, Petr. *Encyklopedie listnatých stromů a keřů*. Brno: Computer Press, 2007. 748 s. ISBN 978-80-251-1708-8.
- KOLLMANN, Franz. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. 2. vyd. Berlin: Springer-Verlag, 1951. 1050 s.
- KOLLMANN, Franz F.P. a Wilfred A.Jr. COTÉ, 1968. *Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1968. 592 s. ISBN 978-3-642-87930-2.
- LYSÝ, František a Pavel JIRŮ. *Nauka o dřevě*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954. n. p., 760 s.
- MATOVÍČ, Anton. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. 212 s. ISBN 80-7157-086-9.
- MUSIL, Ivan a Jana MÖLLEROVÁ. *Lesnická dendrologie*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2005. 216 s. ISBN 80-213-1367-6.
- NĚMEC, Jan, Václav JANDÁČEK a Bohumil HURDA. *Dřevo: historický lexikon: [tradice z pohledu dneška]*. Praha: Grada, 2005. 80 s. ISBN 80-247-1187-7.
- NOVÁK, David. *Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva lípy*. Praha, 2018. 98 s. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita. Vedoucí práce Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.
- NOVÁK, Vladimír a kol. *Dřevařská technická příručka*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1970. 748 s.
- PAGAN, Jozef a Dušan RANDUŠKA. *Atlas dřevín*. Bratislava: Vydavateľstvo Obzor, 357 s. 1978.

PATŘIČNÝ, Martin. *Velká kniha o dřevě*. Vydání druhé (v Euromedia Group první). Praha: Euromedia Group, 272 s. Universum (Euromedia Group), 2019. ISBN 978-80-7617-829-8.

PAULE, Ladislav. *K výskytu borkovitých forem foriem buka na Slovensku*. *Živa*. **1972**(4), 1972. 129-131.

POŽGAJ, Alexander a kol. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.

PRKNOVÁ, Hana, ed. *Jasan - strom roku 2008: Ash - tree of the year 2008: sborník z konference: Kostelec nad Černými lesy, 26.11.2008*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2008. 68 s. ISBN 978-80-213-1847-2.

PRKNOVÁ, Hana, ed. *Bříza - strom roku 2010: Birch - Tree of the Year 2010*. Sborník z konference: Kostelec nad Černými lesy 23. září 2010. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2010. 117 s. ISBN 978-80-213-2098-7.

REINPRECHT, Ladislav. *Ochrana dreva: vysokoškolská učebnica: 453 strán, vrátane 83 tabuliek a 220 obrázkov*. 2. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2012. 453 s. ISBN 978-80-228-2351-7.

ROSS, Robert J. et al. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Edice ke stému výročí. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. 508 s. ISBN 9781484859704.

SCHMULSKY, Rubin, P. David JONES a Karen LILLEY. *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. 6. vyd. Iowa: Wiley-Blackwell, 2011. 477 s. ISBN 978-0-8138-2074-3.

SOLÁR, Rastislav. *Chémia dreva*. 2. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2004. 102 s. ISBN 80-228-1420-2.

ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila, Petr HORÁČEK a Libuše GANDELOVÁ. *Nauka o dřevě*. 2. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998. 184 s. ISBN 80-7157-194-6.

ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila a Libuše GANDELOVÁ. *Stavba dřeva: (cvičení)*. 2., nezměň. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2012. 129 s. ISBN 978-80-7375-168-5.

TSOUMIS, George. *Wood as Raw Material: Source, Structure, Chemical Composition, Growth, Degradation and Identification*. Dotisk-přepr. vydání. Great Britain: Elsevier, 1968. 276 s. ISBN 9781483159522.

TSOUMIS, George T. *Science and technology of wood: Structure, Properties, Utilization*. 2. vyd. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 494 s. ISBN 0-442-23985-8.

ÚRADNÍČEK, Luboš a Petr MADĚRA. *Dřeviny České republiky*. Písek: Matice lesnická, 2001. 333 s. ISBN 80-86271-09-9.

VYSKOT, Miroslav. *Pěstění dubu*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1958. 284 s.

WAGENFÜHR, Rudi. *Holzatlas*. 5. vyd., Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2000. 707 s. ISBN 3-446-21390-2.

ZEIDLER, Aleš a Vlastimil BORŮVKA. *Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin - podklady pro cvičení*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2016. 89 s. ISBN 978-80-213-2674-3.

ZOBEL, Bruce J. a Johannes P. VAN BUIJTENEN. *Wood variation: its causes and control*. Berlin: Springer - Verlag. Springer series in wood science, 1989. 363 s. ISBN 978-3-642-74071-8.

Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky: Report on the state of forests and forestry in the Czech Republic: stav k 2018. Praha: Ministerstvo zemědělství v nakladatelství Lesnická práce, 2019. 110 s. ISBN 978-80-7434-530-2.

7.2 Elektronické dokumenty

BEALL, F. C. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology* [online]. 2002, **36**(3), 197-212 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00226-002-0138-4>. DOI: 10.1007/s00226-002-0138-4. ISSN 0043-7719.

BUTTERFIELD, B. G. a B. A. MEYLAN. *Three-dimensional structure of wood: An Ultrastructural Approach* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1980. [cit. 2020-05-04]. DOI: 10.1007/978-94-011-8146-4. ISBN 978-94-011-8148-8.

Fakopp Bt - UltraSonic Timer. *Fakopp Localization Page* [online] 2019. Copyright © Fakopp Enterprise Bt. [cit. 01.06.2020]. Dostupné z: <https://fakopp.com/en/product/ultrasonic/>

CONRAD, Michalel P.C., Greorgy D. SMITH a Göran FERNULUND. *Fracture of solid wood: A review of structure and properties at different length scales. Wood and Fiber Science* [online]. 2003, **2003**(4), 570-584 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/310/310>. ISSN 0735-6161.

GÜRAY, Ersan, Ali KASAL, Selçuk DEMIRCI, Erkan CEYLAN a Tolga KUŞKUN. Effects of Cross-sectional Geometry and Force Direction on Bending Strength and Modulus of Elasticity of Some Softwood Beams. *BioResources* [online]. 2019, **14**(4), 9258-9270 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effects-of-cross-sectional-geometry-and-force-direction-on-bending-strength-and-modulus-of-elasticity-of-some-softwood-beams/> DOI: 10.15376/biores.14.4.9258-9270. ISSN 19302126.

HOLEČEK, Tomáš, Miroslav GAŠPARÍK, Rastislav LAGAŇA, Vlastimil BORŮVKA a Eliška OBERHOFNEROVÁ. Measuring the Modulus of Elasticity of Thermally Treated Spruce Wood using the Ultrasound and Resonance Methods. *BioResources* [online]. 2016, **12**(1), 819-838 [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/10728>. DOI: 10.15376/biores.12.1.819-838. ISSN 1930-2126.

JANSSON, Bengt. *Impact Loading of Timber Beams* [online]. Vancouver, Canada, 1992. 132 s. disertační práce. The University of British Columbia, 1992. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0050473>

OBERHOFNEROVÁ, Eliška, Karolina ARNETOVÁ, Tomáš HOLEČEK, Vlastimil BORŮVKA a Jan BOMBA. Determination of Correlation between Destructive and Nondestructive Test Methods Applied on Modified Wood Exposed to Natural Weathering. *BioResources* [online]. 2016, **11**(2), 5155-5168 [cit. 2020-

06-09]. Dostupné z: <http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/9094>. DOI: 10.15376/biores.11.2.5155-5168. ISSN 1930-2126.

PELIT, Hüseyin, Mehmet BUDAKÇI a Abdullah SÖNMEZ. Density and some mechanical properties of densified and heat post-treated Uludağ fir, linden and black poplar woods. *European Journal of Wood and Wood Products* [online]. 2018, 76(1), 79-87 [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00107-017-1182-y> DOI: 10.1007/s00107-017-1182-y. ISSN 0018-3768.

ZICHA, Ondřej, ed. Biological Library: Taxonomic tree of plants and animals with photos. *BioLib.cz* [online]. Praha: BioLib, 1999. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.biolib.cz/>

7.3 Normy

ČSN 49 0101 Drevo. Všeobecné požiadavky na fyzikálne a mechanické skúšky. 1980

ČSN 49 0102 Skúšky vlastností rasteňného dreva. Metóda zisťovania priemernej šírky letokruhov a priemerného podielu letného dreva. 1988

ČSN 49 0103 Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškách. 1979

ČSN 49 0108 Drevo. Zisťovanie hustoty. 1993

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

ČSN 49 0117 Drevo. Rázová húževnatosť v ohybe. 1980

ČSN EN 310 Desky ze dřeva. Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu. 1996

8 Seznam příloh

Příloha 1 - Grafické rozhraní softwaru FFT analyzer 105

Příloha 2 - Grafické rozhraní softwaru TIRA-test 105

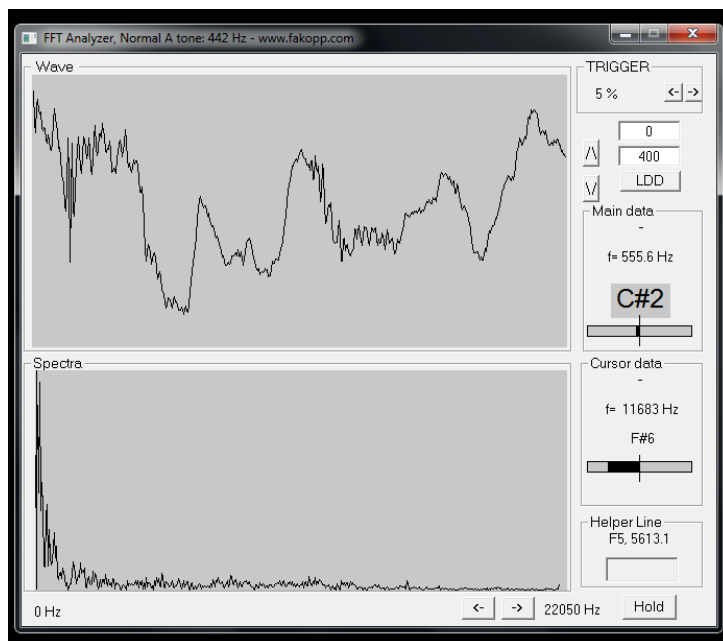
Příloha 3 - Průběh zkoušky pevnosti v ohybu při statickém zatížení (dub)..... 106

Příloha 4 - Průběh zkoušky pevnosti v ohybu při dynamickém zatížení (dub) .. 107

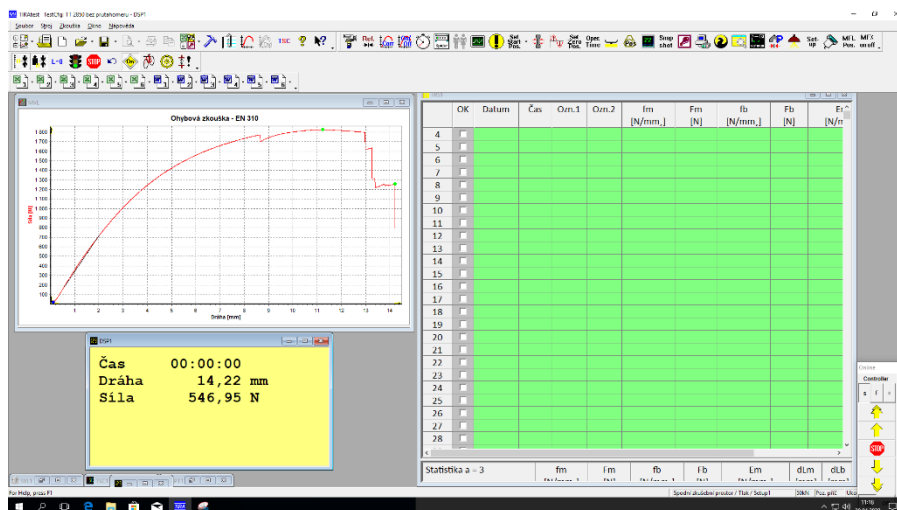
Příloha 5 - Grafy závislosti hustoty dřeva na šířce letokruhů vybraných dřevin 108

Příloha 6 – Dynamický modul pružnosti u vybraných dřevin, UZ metoda z čel	109
Příloha 7 - Dynamický modul pružnosti, UZ metoda z čel, základní statistické údaje	109
Příloha 8 - Dynamický modul pružnosti vybraných dřevin, UZ metoda z ploch	110
Příloha 9 - Dynamický modul pružnosti, UZ metoda z ploch, základní statistické údaje	110
Příloha 10 - Dynamický modul pružnosti vybraných dřevin, rezonanční metoda	111
Příloha 11 - Dynamický modul pružnosti, rezonanční metoda, základní statistické údaje	111
Příloha 12 - Porovnání dynamických modulů vybraných dřevin.....	112
Příloha 13 - Výsledky mnohonásobného porovnání radiálního a tangenciálního ohybu při statickém zatížení; Duncanův test	113
Příloha 14 - Grafy závislosti pevnosti v ohybu na hustotě	114
Příloha 15 - Statický modul pružnosti u vybraných dřevin.....	115
Příloha 16 - Statický modul pružnosti při zatížení v radiálním směru, základní statistické údaje	115
Příloha 17 - Statický modul pružnosti při zatížení v tangenciálním směru základní statistické údaje	115
Příloha 18 - Výsledky mnohonásobného porovnání statického modulu pružnosti vybraných dřevin, radiální a tangenciální směr, Duncanův test	116
Příloha 19 - Závislost statických a dynamických modulů pružnosti vybraných dřevin.....	117
Příloha 20 - Výsledky mnohonásobného porovnání rázové houževnatosti vybraných dřevin, radiální a tangenciální směr, Duncanův test	118
Příloha 21 - Grafy závislosti rázové houževnatosti na hustotě	119
Příloha 22 - Souhrnná tabulka vlastností pro vybrané dřeviny	120

9 Přílohy

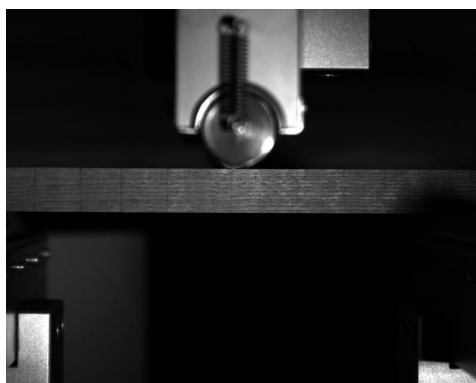


Příloha 1 - Grafické rozhraní softwaru FFT analyzer



Příloha 2 - Grafické rozhraní softwaru TIRA-test

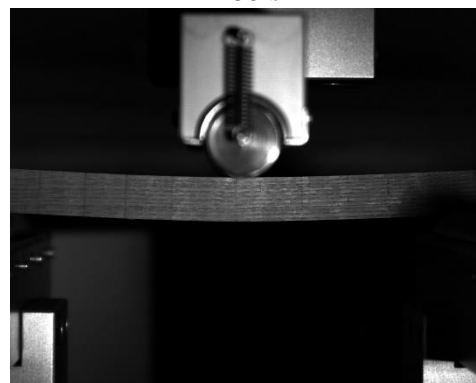
0 s



30 s



60 s



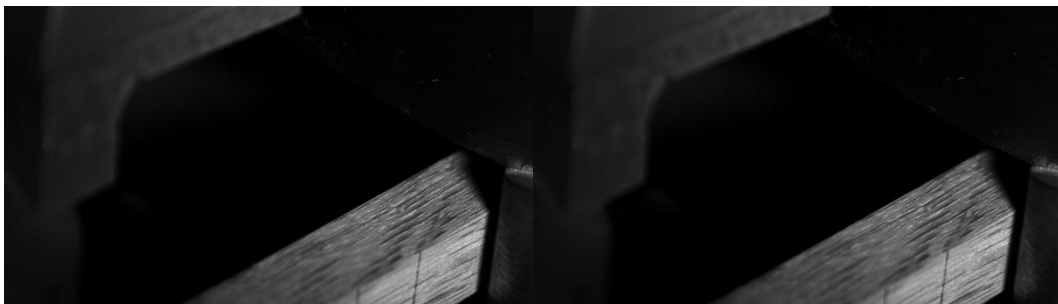
90 s



Příloha 3 - Průběh zkoušky pevnosti v ohybu při statickém zatížení (dub)

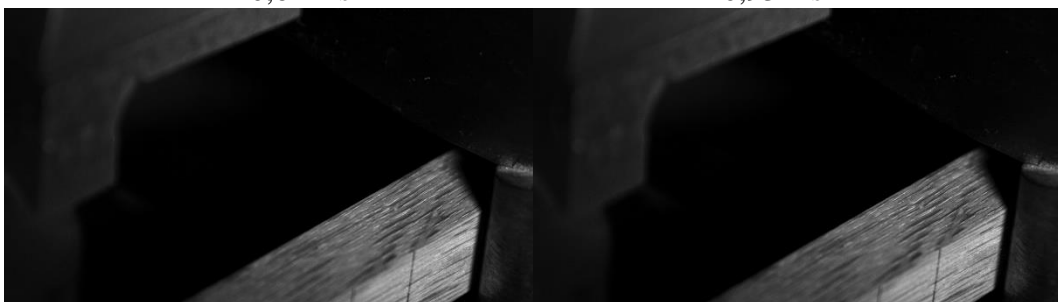
0 ms

0,31 ms



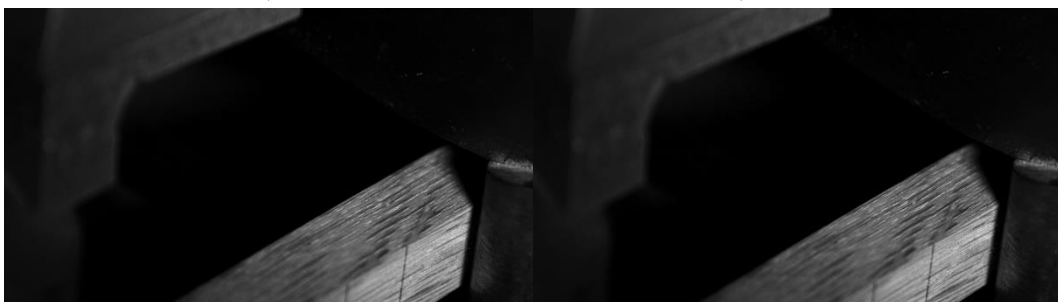
0,62 ms

0,93 ms



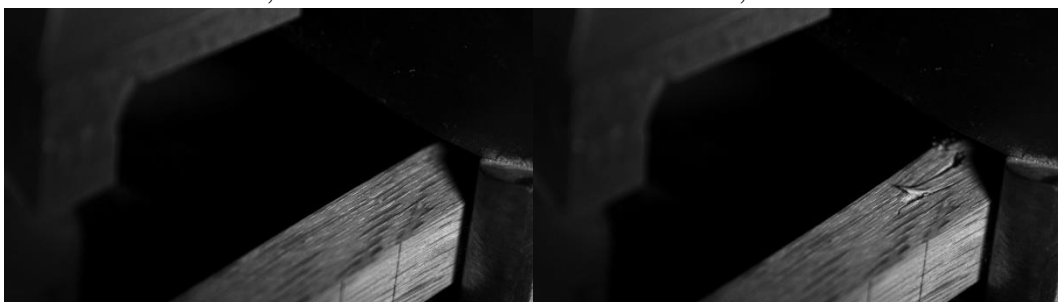
1,24 ms

1,55 ms

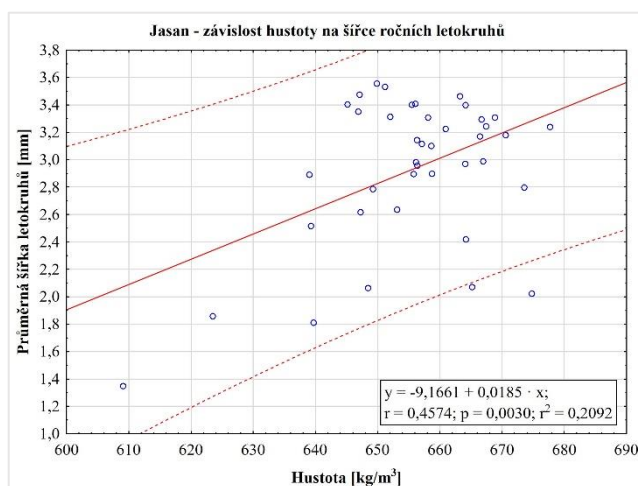
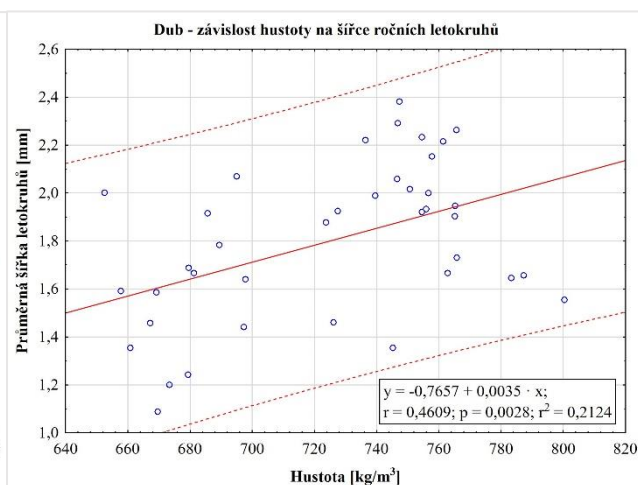
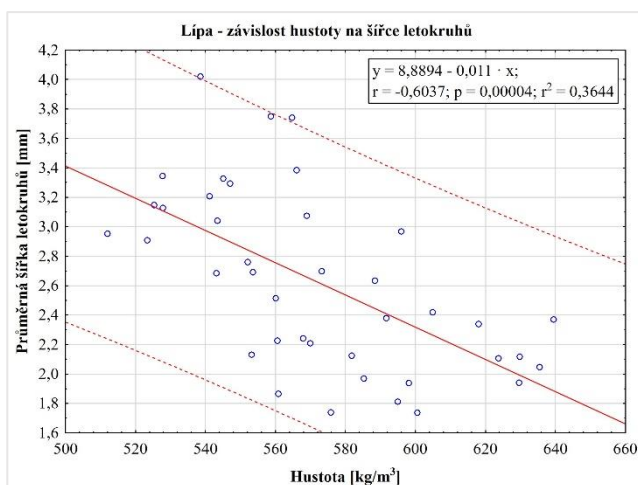
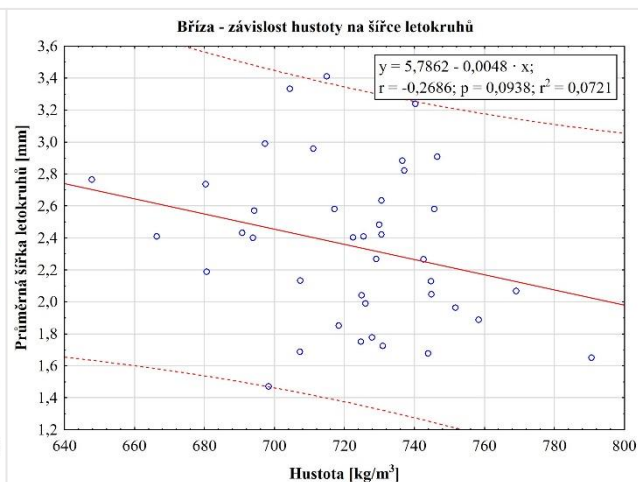
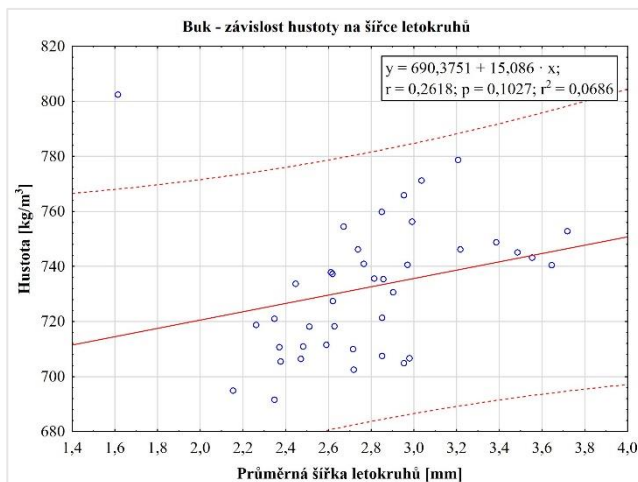


1,86 ms

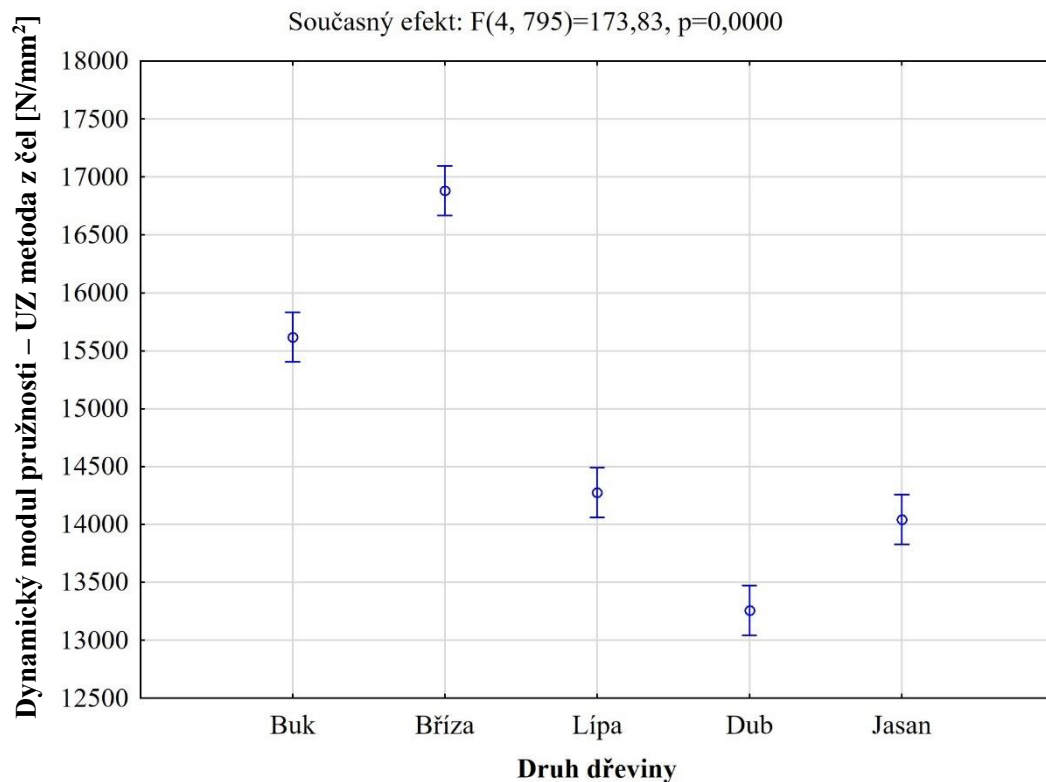
2,17 ms



Příloha 4 - Průběh zkoušky pevnosti v ohybu při dynamickém zatížení (dub)



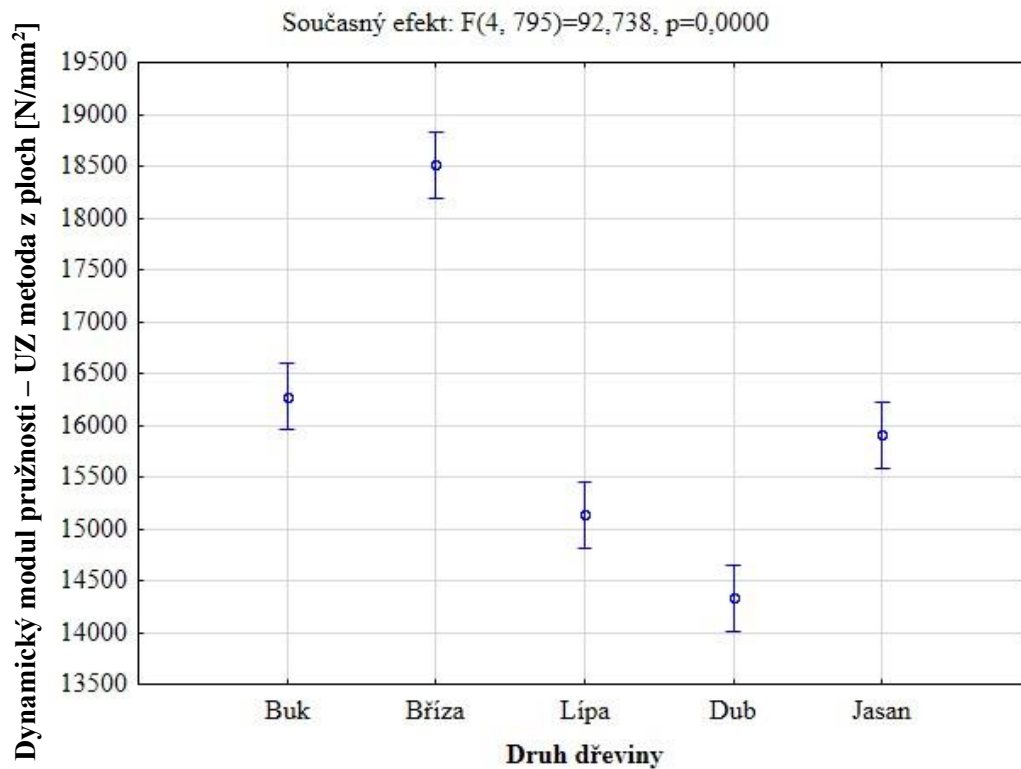
Příloha 5 - Grafy závislosti hustoty dřeva na šířce letokruhů vybraných dřevin



Příloha 6 – Dynamický modul pružnosti u vybraných dřevin, UZ metoda z čel

Dynamický modul pružnosti stanovený UZ metodou měřenou z čel vzorků [N/mm ²]						
Dřevina	Počet platných	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Var. koef. [%]
Buk	160	15617	13551	19095	1037	6,6
Bříza	160	16883	9872	20295	1622	9,6
Lípa	160	14276	11643	16833	1092	7,7
Dub	160	13259	9232	17102	2020	15,2
Jasan	160	14041	12738	16482	701	5,0

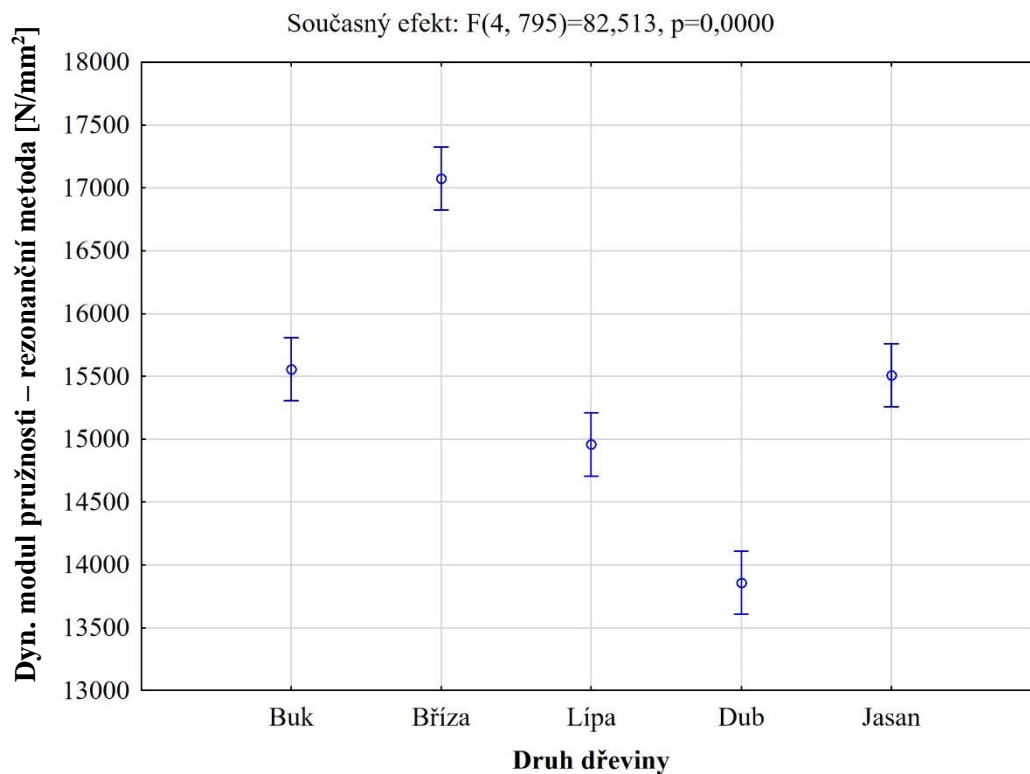
Příloha 7 - Dynamický modul pružnosti, UZ metoda z čel, základní statistické údaje



Príloha 8 - Dynamický modul pružnosti vybraných dřevin, UZ metoda z ploch

Dynamický modul pružnosti stanovený UZ metodou měřenou z ploch vzorků [N/mm ²]						
Dřevina	Počet platných	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Var. koef. [%]
Buk	160	16276	12299	22329	1688	10,4
Bříza	160	18513	10635	30941	2856	15,4
Lípa	160	15136	10718	19540	1607	10,6
Dub	160	14332	8163	19543	2323	16,2
Jasan	160	15905	11264	22933	1554	9,8

Príloha 9 - Dynamický modul pružnosti, UZ metoda z ploch, základní statistické údaje

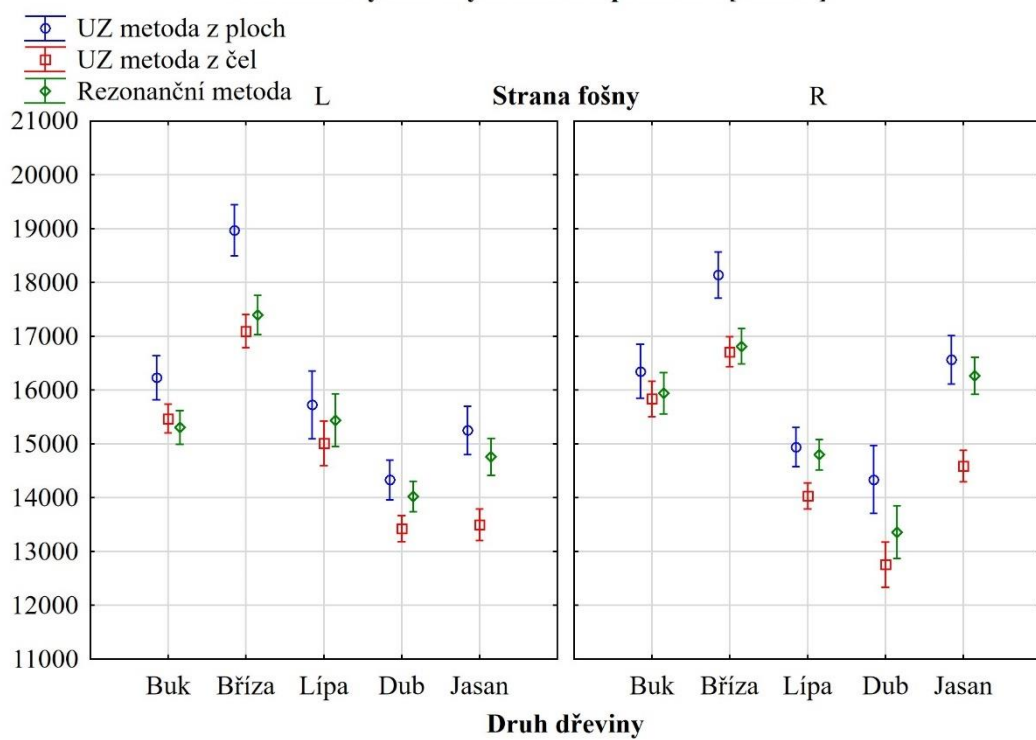


Příloha 10 - Dynamický modul pružnosti vybraných dřevin, rezonanční metoda

Dynamický modul pružnosti stanovený rezonanční metodou [N/mm ²]						
Dřevina	Počet platných	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Var. koef. [%]
Buk	160	15557	12552	18634	1142	7,3
Bříza	160	17074	9300	21082	1857	10,9
Lípa	160	14959	11700	18476	1345	9,0
Dub	160	13857	8720	18956	2404	17,3
Jasan	160	15511	13841	19092	886	5,7

Příloha 11 - Dynamický modul pružnosti, rezonanční metoda, základní statistické údaje

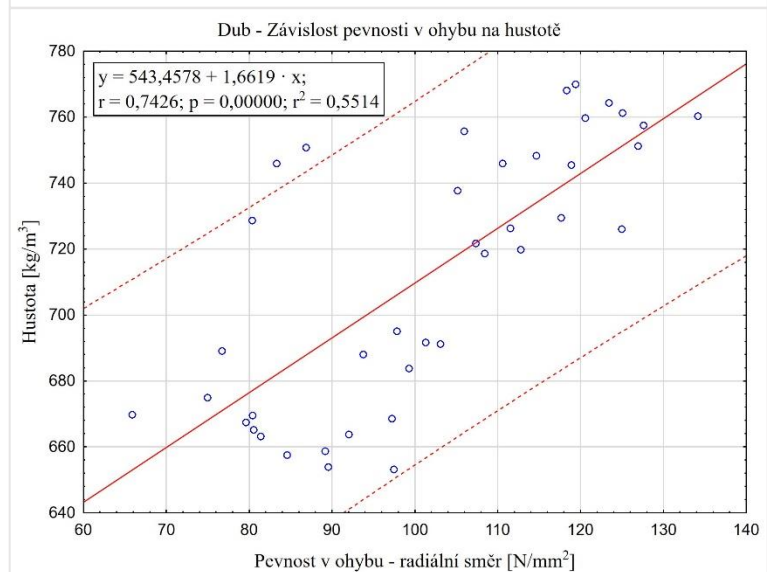
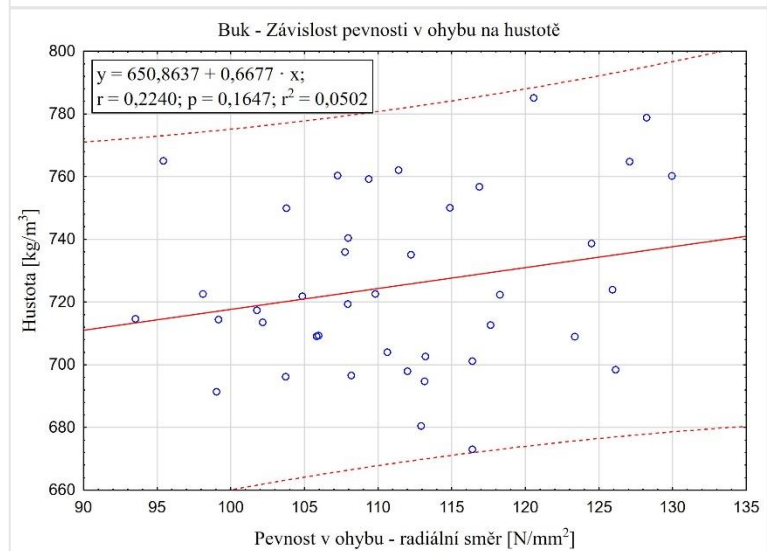
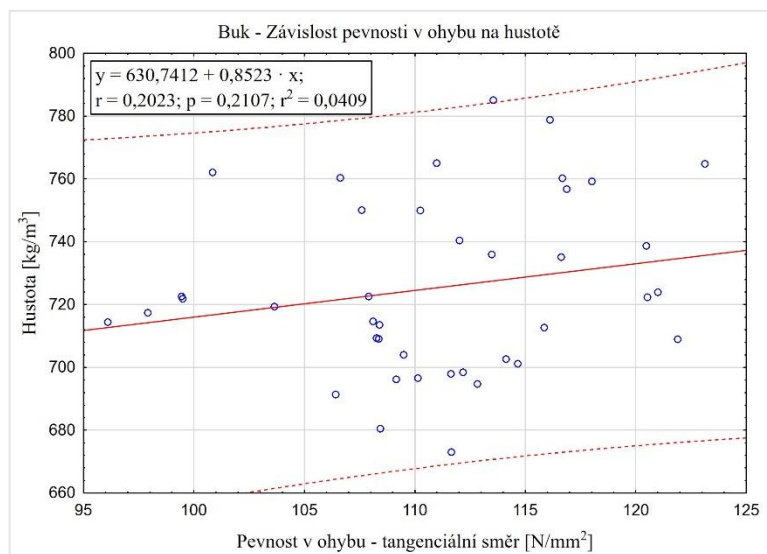
Porovnání dynamických modulů pružnosti [N/mm²]



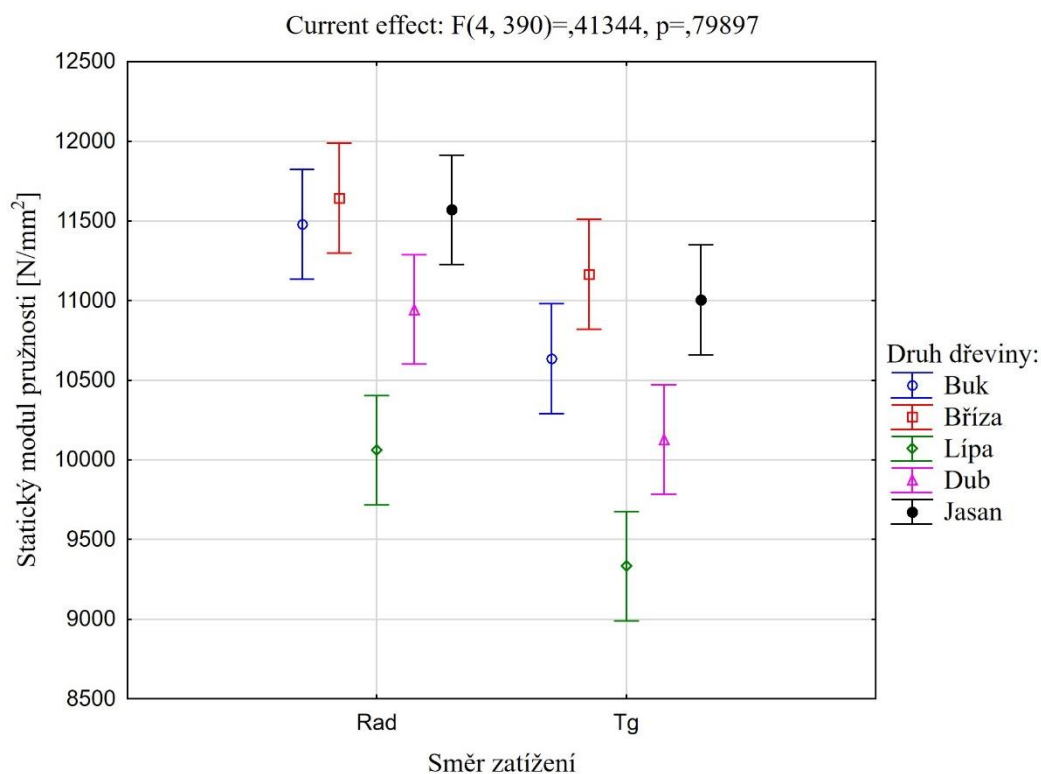
Příloha 12 - Porovnání dynamických modulů vybraných dřevin

Pevnost v ohybu; Post Hoc analýza – Duncanův test													
	Buk		Bříza		Lípa		Dub		Jasan				
	Rad	Tg	Rad	Tg	Rad	Tg	Rad	Tg	Rad	Tg			
Buk	Rad	0,827277	0,760965	0,146084	0,000005	0,000001	0,000330	0,000004	0,432807	0,567589			
	Tg	0,827277	0,626327	0,197061	0,000004	0,000005	0,000656	0,539764	0,693012				
Bříza	Rad	0,760965	0,626327	0,088807	0,000001	0,000001	0,000110	0,302290	0,410998	0,410998			
	Tg	0,146084	0,197061	0,088807	0,000003	0,000004	0,027420	0,441489	0,333998	0,333998			
Lípa	Rad	0,000005	0,000004	0,000001	0,000003	0,024830	0,000003	0,000780	0,000004	0,000004			
	Tg	0,000001	0,000005	0,000001	0,000004	0,024830	0,000003	0,000003	0,000004	0,000004			
Dub	Rad	0,000330	0,000656	0,000110	0,027420	0,000780	0,000003	0,003834	0,004127	0,002210			
	Tg	0,000004	0,000004	0,000011	0,567968	0,006784	0,003834	0,000003	0,000003	0,000004			
Jasan	Rad	0,432807	0,539764	0,302290	0,441489	0,000004	0,004127	0,000003	0,792885	0,792885			
	Tg	0,567589	0,693012	0,410998	0,333998	0,000004	0,002210	0,000004	0,792885				

Příloha 13 - Výsledky mnohonásobného porovnání radiálního a tangenciálního ohybu při statickém zatížení; Duncanův test



Priloha 14 - Grafy závislosti pevnosti v ohybu na hustotě



Příloha 15 - Statický modul pružnosti u vybraných dřevin

Statický modul pružnosti – radiální směr [N/mm ²]						
Dřevina	Počet vzorků	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Var. koef. [%]
Buk	40	11479	9271	13516	905	7,9
Bříza	40	11643	6410	13650	1410	12,1
Lípa	40	10061	8246	12028	856	8,5
Dub	40	10944	7707	13946	1901	17,4
Jasan	40	11570	10294	12641	599	5,2

Příloha 16 - Statický modul pružnosti při zatížení v radiálním směru, základní statistické údaje

Statický modul pružnosti – tangenciální směr [N/mm ²]						
Dřevina	Počet vzorků	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Var. koef. [%]
Buk	40	10635	9387	12325	675	6,3
Bříza	40	11165	9125	13156	858	7,7
Lípa	40	9332	6675	10952	887	9,5
Dub	40	10127	7307	12895	1596	15,8
Jasan	40	11004	10172	12122	433	3,9

Příloha 17 - Statický modul pružnosti při zatížení v tangenciálním směru základní statistické údaje

Statistický modul pružnosti; Post Hoc analýza – Duncanův test														
	Buk		Bříza		Lípa		Dub		Jasan					
	Rad	Tg	Rad	Tg	Rad	Tg	Rad	Tg	Rad	Tg	Rad	Tg	Rad	Tg
Buk	Rad		0,001460	0,535356	0,203949	0,000004	0,000005	0,046652	0,000004	0,710816	0,068854			
	Tg	0,001460		0,000152	0,049023	0,000003	0,211781	0,039945	0,000431	0,160195				
Bříza	Rad	0,535356	0,000152		0,076896	0,000001	0,403898	0,000671	0,001380	0,000004	0,807772	0,000741	0,034542	
	Tg	0,203949	0,049023	0,076896		0,000026	0,000004	0,403898	0,000671	0,001380	0,000004	0,000741	0,034542	
Lípa	Rad	0,000004	0,026589	0,000001	0,000026		0,003236	0,000671	0,786994	0,000005	0,000321	0,000004	0,807772	
	Tg	0,000005	0,000003	0,000001	0,000004	0,003236		0,000004	0,001872	0,000001	0,000004	0,000004	0,034542	
Dub	Rad	0,046652	0,211781	0,010863	0,403898	0,000671	0,000004		0,001380	0,021474	0,807772	0,000741	0,034542	
	Tg	0,000004	0,039945	0,000005	0,000069	0,786994	0,001872	0,001380		0,000004	0,000741	0,000741	0,034542	
Jasan	Rad	0,710816	0,000431	0,768984	0,121574	0,000005	0,000001	0,021474	0,000004					
	Tg	0,068854	0,160195	0,018817	0,515831	0,000321	0,000004	0,807772	0,000741	0,034542				

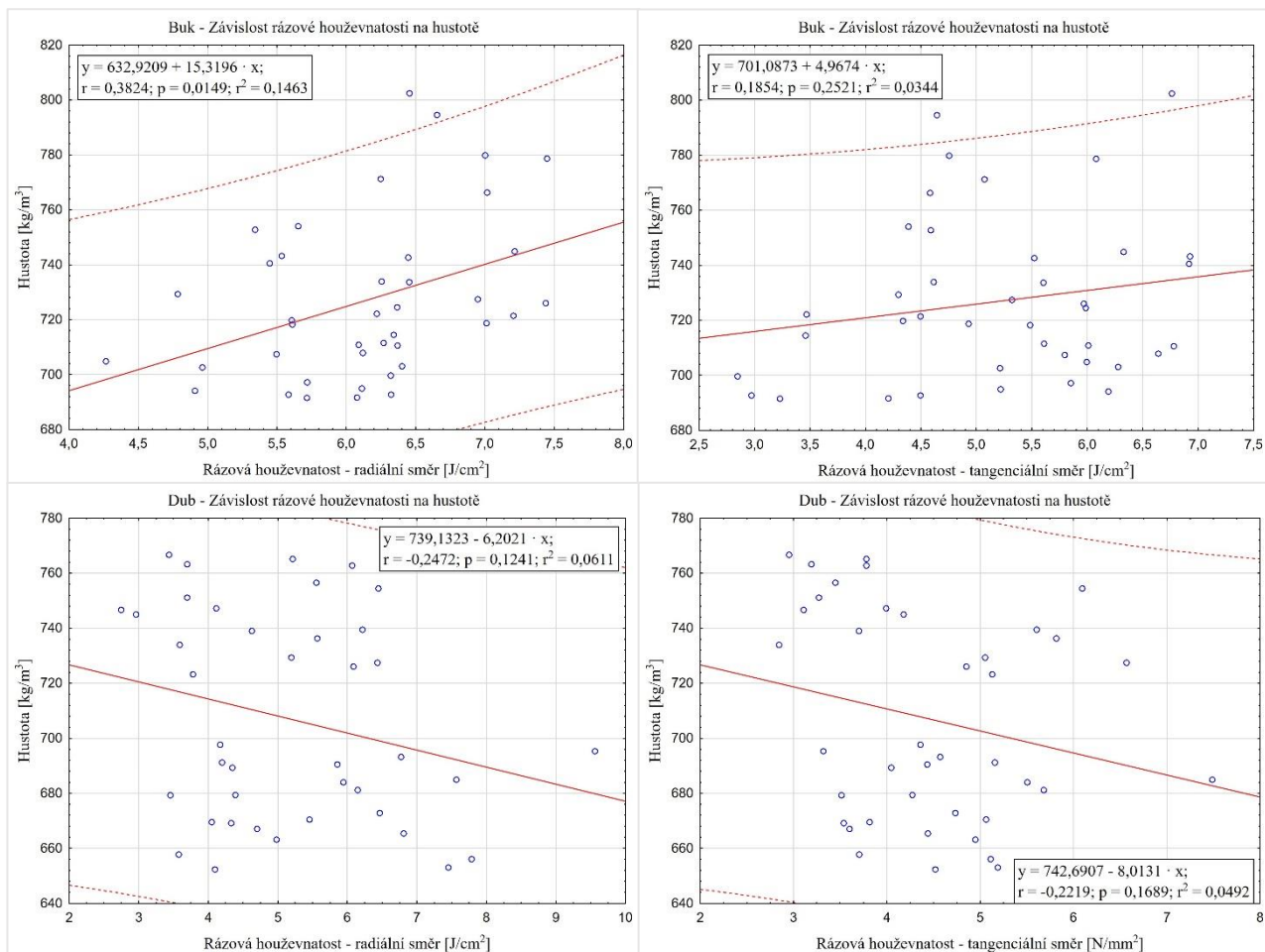
Příloha 18 - Výsledky mnohonásobného porovnání statického modulu pružnosti vybraných dřevin, radiální a tangenciální směr, Duncanův test

Závislost statických a dynamických modulů (závislost je vyjádřena korelačním koeficientem)										
	Statický modul pružnosti									
	Buk		Bříza		Lípa		Dub		Jasan	
	Rad.	Tg.	Rad.	Tg.	Rad.	Tg.	Rad.	Tg.	Rad.	Tg.
Dynamický modul pružnosti – UZ metoda z ploch [Mpa]	0,4268	0,3117	0,0339	-0,0284	0,2703	0,4594	-0,3831	-0,2965	0,3678	0,3629
Dynamický modul pružnosti – UZ metoda z čel [Mpa]	0,5225	0,4376	0,1492	-0,1415	0,2271	0,4823	0,9185	0,9179	0,8047	0,8009
Dynamický modul pružnosti – Resonanční metoda (FFT analyzér) [Mpa]	0,5787	0,3893	0,332	0,1283	0,341	0,4015	0,9303	0,9132	0,8142	0,8471

Pozn: Hodnoty korelačních koeficientů [F], u kterých byla prokázána statistická významnost (p – hodnota) jsou zvýrazněny červeně.

Rázová houževnatost – Post Hoc analýza – Duncanův test										
	Buk		Bříza		Lípa		Dub		Jasan	
	Rad	Tg	Rad	Tg	Rad	Tg	Rad	Tg	Rad	Tg
Buk	Rad	0,000581	0,000004	0,000004	0,211361	0,172343	0,000749	0,000003	0,000004	0,087005
	Tg	0,000581	0,000004	0,000005	0,000014	0,000004	0,975244	0,009513	0,000004	0,000005
Bříza	Rad	0,000004	0,000005	0,000510	0,000004	0,000003	0,000005	0,000001	0,000230	0,000011
	Tg	0,000004	0,000005	0,000510	0,000004	0,000004	0,000001	0,000011	0,000011	0,000003
Lípa	Rad	0,211361	0,000014	0,000004	0,840825	0,000007	0,000006	0,000004	0,000011	0,560109
	Tg	0,172343	0,000004	0,000003	0,840825	0,000006	0,000006	0,000004	0,000011	0,671599
Dub	Rad	0,000749	0,975244	0,000005	0,000007	0,000006	0,007588	0,000004	0,000004	0,000004
	Tg	0,000003	0,009513	0,000001	0,000004	0,000004	0,007588	0,000005	0,000004	0,000004
Jasan	Rad	0,000004	0,000004	0,000230	0,000003	0,000011	0,000004	0,000005	0,000009	0,000009
	Tg	0,087005	0,000005	0,000011	0,000003	0,560109	0,000004	0,000004	0,000009	0,000009

Příloha 20 - Výsledky mnohonásobného porovnání rázové houževnatosti vybraných dřevin, radiální a tangenciální směr, Duncanův test



Příloha 21 - Grafy závislosti rázové houževnatosti na hustotě

Souhrnný přehled fyzikálních a mechanických vlastností vybraných dřevin					
\bar{x} (σ)					
Veličina	Buk	Bříza	Lípa	Dub	Jasan
Hustota [kg/m ³]	729 (25)	716 (31)	570 (31)	721 (41)	655 (13)
Vlhkost [%]	11,9 (0,5)	11,7 (0,3)	10,2 (0,3)	11,5 (0,4)	12,0 (0,4)
Průměrná šířka letokruhů [mm]	2,8 (0,4)	2,4 (0,5)	2,6 (0,6)	1,8 (0,3)	2,9 (0,5)
Pevnost v ohybu – radiální směr [N/mm ²]	111,6 (9,4)	112,4 (12,3)	92,8 (9,3)	101,7 (17,7)	109,3 (5,0)
Pevnost v ohybu – tangenciální směr [N/mm ²]	111,0 (6,6)	107,4 (12,7)	87,1 (10,6)	94,3 (17,8)	110,0 (3,8)
Rázová houževnatost – radiální směr [J/cm ²]	6,1 (0,7)	9,0 (1,9)	6,5 (1,0)	5,2 (1,5)	8,0 (0,7)
Rázová houževnatost – tangenciální směr [J/cm ²]	5,2 (1,1)	10,0 (1,8)	6,5 (1,0)	4,5 (1,0)	6,6 (0,6)
Dynamický modul pružnosti stanovený UZ metodou měřenou z ploch vzorků [N/mm ²]	16276 (1688)	18513 (2856)	15136 (1607)	14332 (2323)	15905 (1554)
Dynamický modul pružnosti stanovený UZ metodou měřenou z čel vzorků [N/mm ²]	15617 (1037)	16883 (1622)	14276 (1092)	13259 (2020)	14041 (701)
Dynamický modul pružnosti stanovený rezonanční metodou [N/mm ²]	15557 (1142)	17074 (1857)	14959 (1345)	13857 (2404)	15511 (886)
Statický modul pružnosti – radiální směr [N/mm ²]	11479 (905)	11643 (1410)	10061 (856)	10944 (1901)	11570 (599)
Statický modul pružnosti – tangenciální směr [N/mm ²]	10635 (675)	11165 (858)	9332 (887)	10127 (1596)	11004 (433)

Příloha 22 - Souhrnná tabulka vlastností pro vybrané dřeviny