

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Porovnání vybraných pevnostních charakteristik dřeva
topolu osiky a olše lepkavé ze stejného stanoviště**

Bakalářská práce

Autor: Vadim Kuzmyk

Vedoucí práce: doc. Ing. Vlastimil Borůvka, PhD., Dipl. Mgmt.

2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vadim Kuzmyk

Dřevařství
Zpracování dřeva

Název práce

Porovnání vybraných pevnostních charakteristik dřeva topolu osiky a olše lepkavé ze stejného stanoviště

Název anglicky

Comparison of selected strength characteristics of European aspen and black alder wood from the same location

Cíle práce

Cílem práce je porovnání pevnosti v tlaku, pevnosti v ohybu a rázové houževnatosti dřeva topolu osiky (*Populus tremula* L.), případně i vrby jívy (*Salix caprea* L.), a olše lepkavé (*Alnus glutinosa* Gaertn.) stejného geografického původu (stanoviště, lokalita, porost).

Metodika

- 1) Zpracovat literární rešerši o daných dřevinách, posuzovaných vlastnostech a vlivu faktorů na ně (včetně geografického původu).
- 2) Odebrat reprezentativní vzorníky z vybraného stanoviště a připravit zkušební tělesa. Vzorky před jakýmkoliv měřením na-klimatizovat v prostředí klimatizační komory s relativní vlhkostí vzduchu 65 % a teplotou 20 °C.
- 3) Následovat bude primárně stanovení pevnosti v tlaku, rázové houževnatosti a pevnosti v ohybu (případně i pružnostní charakteristiky, tj. modulu pružnosti). Experimenty v každém případě zahrnují i stanovení hustoty a ověření vlhkosti v době zkoušky; vše podle platných norem.
- 4) Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě.
- 5) Pokusit se analyzovat rozdíly v posuzovaných vlastnostech dřeva těchto dřevin, jejich možné příčiny, a to i z pohledu užitkových vlastností.

Harmonogram práce:

leden 2022 až duben 2022 – oficiální zadání práce do aplikace UIS

květen 2022 až prosinec 2022 – práce na literární rešerši

červenec 2022 až únor 2023 – příprava materiálu a experimentální část (měření a získávání dat)

listopad 2022 až březen 2023 – statistické vyhodnocení dat

únor 2023 až březen 2023 – stanovení závěrů a zhodnocení

březen 2023 až duben 2023 – finalizace práce a odevzdání práce do aplikace UIS



Doporučený rozsah práce

40 – 50 stran (bez příloh)

Klíčová slova

dřevo, topol osika, olše lepkavá, pevnost v tlaku, pevnost v ohybu, rázová houževnatost, variabilita vlastností, lokalita

Doporučené zdroje informací

- BODIG, J., JAYNE, B. A. (1982). Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold Company, New York. 712 s.
- BORŮVKA, V., BABIAK, M. (2016). Vlastnosti dřeva v příkladech. 1. vydání, Praha ČZU. 139 s. ČSN 49 0103, ČSN 49 0108, ČSN 49 0110, ČSN 49 0115, ČSN 49 0116, ČSN 49 0117.
- DINWOODIE, J. M. (2000). Timber: Its nature and behavior. Taylor & Francis New York, USA. 258 s.
- HORÁČEK, P. (1998). Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 124 s.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. (1997). Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání, Bratislava: Príroda. 485 s.
- ROSS, R. J. (2010). Wood handbook: wood as an engineering material. Centennial ed., USDA Forest Service. 509 s.
- TSOUMIS, G. (1991). Science and technology of wood – structure, properties, utilization. New York: Chapman and Hall. 497 s.
- WAGENFÜHR, R. (2000). Holzatlas. Leipzig: Fachbuchverlag. 707 s.
- ZOBEL, B. J., VAN BUITENEN, J. P. (1989). Wood variation, its causes and control. Springer-Verlag Berlin. 363 s.
-

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Vlastimil Borůvka, PhD., Dipl. Mgmt.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 12. 7. 2022

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 31. 8. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 25. 03. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Porovnání vybraných pevnostních charakteristik dřeva topolu osiky a olše lepkavé ze stejného stanoviště" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne _____

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Vlastimilovi Borůvkovi, Ph.D., Dipl. Mgmt. za vedení při vypracovávání této bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Davidovi Novákovi za rady a pomoc při měření a zpracování dat. Na konec bych rád poděkoval konzultantovi doc. Ing. Aleši Zeidlerovi, Ph.D. za jeho připomínky k práci.

Porovnání vybraných pevnostních charakteristik dřeva topolu osiky a olše lepkavé ze stejného stanoviště

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá stanovením a porovnáním vybraných mechanických vlastností dřeva topolu osiky (*Populus tremula* L.), olše lepkavé (*Alnus glutinosa* Gaertn.), vrby jívy (*Salix caprea* L.) a břízy bělokoré (*Betula pendula* Roth.) ze stejného stanoviště. Práce se skládá z teoretické části a experimentální části.

Teoretická část pojednává o geometrické a morfologické hladině jednotlivých zkoumaných dřevin společně s jejich využitím. Dále je zde rozvedena problematika hodnocených fyzikálních a mechanických vlastností dřeva.

Experimentální část se zabývá metodikou a řádným stanovením zkoumaných vlastností v souladu s platnými normami, tato část obsahuje výstup ze statistického zpracování dat ve formě tabulek a grafů.

Z výsledků bylo zjištěno, že bříza má mezi zkoumanými dřevinami nejvyšší hustotu, naopak topol má hustotu nejmenší. Nejlepší pevnost v ohybu prokázala vrba, dřevo topolu se prokázalo jako nejméně odolné vůči statickému zatížení v ohybu. Nejlepší rázovou houževnatost prokázala bříza, zatímco dřevo olše se prokázalo jako nejméně odolné proti dynamickému zatížení. Nejvyšší pevnost v tlaku byla zjištěna u vrby, ale dřevo topolu se prokázalo jako nejméně odolné proti tlakovému zatížení.

V práci bylo prokázáno, že v rámci zkoumaných dřevin existuje statisticky významný rozdíl mezi jejich zkoumanými vlastnostmi, tento rozdíl byl potvrzen Duncanovým testem na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

V práci zkoumané dřeviny jsou dřevinami přípravnými, které jsou málo ověřeny výzkumem. Přípravné dřeviny se projevují rychlým růstem v kalamitních holínách. Bylo by vhodné zjistit, zdali by některé ze zkoumaných dřevin bylo možné v rámci různých lokalit a různých pěstebních postupů použít až do mytného věku.

Klíčová slova: Topol osika, olše lepkavá, pevnost v tlaku, pevnost v ohybu, rázová houževnatost

Comparison of selected strength characteristics of European aspen and black alder wood from the same location

Abstract

The bachelor's thesis deals with the determination and comparison of selected mechanical properties of the wood of aspen (*Populus tremula* L.), sticky alder (*Alnus glutinosa* Gaertn.), willow (*Salix caprea* L.) and white birch (*Betula pendula* Roth.) from the same habitat. The work consists of a theoretical part and an experimental part.

The theoretical part deals with the individual examined wood species' geometric and morphological level and their use. Furthermore, the issue of assessed physical and mechanical properties of wood is detailed here.

The experimental part deals with the methodology and proper determination of the investigated properties in accordance with valid standards, while this part contains the output of the statistical data processing in the form of tables and graphs.

From the results, it was found that birch has the highest density among the investigated tree species, while poplar has the lowest density. Willow showed the best bending strength, while poplar wood proved to be the least resistant to static bending loads. Birch showed the best impact resistance, while alder wood proved to be the least resistant to dynamic loading. The highest compressive strength was found in willow, while poplar wood proved to be the least resistant to compressive loads.

In the thesis, it was demonstrated that there is a statistically significant difference between the studied properties of the examined wood species, and this difference was confirmed by Duncan's test at the $\alpha = 0.05$ significance level.

The wood species examined in the work are preparatory wood species that are not well verified by research. Preparatory trees show rapid growth in calamitous clearings. It would be appropriate to find out whether some of the examined trees could be used up to the tolling age in different locations and different cultivation methods.

Keywords: European aspen, black alder, compression strength, bending strength, impact toughness

Obsah

1	Úvod	7
2	Cíl práce.....	8
3	Rozbor problematiky.....	9
3.1	Zkoumané dřeviny	9
3.1.1	Topol osika (<i>Populus tremula</i> L.).....	9
3.1.1.1	Využití osiky	9
3.1.2	Olše lepkavá (<i>Alnus glutinosa</i> Gaertn.)	9
3.1.2.1	Využití olše	10
3.1.3	Vrba jíva (<i>Salix caprea</i> L.)	10
3.1.3.1	Využití vrby	11
3.1.4	Bříza bělokorá (<i>Betula pendula</i> Roth.)	11
3.1.4.1	Využití břízy.....	11
3.2	Makroskopická a mikroskopická stavba zkoumaných dřevin	12
3.2.1	Topol osika (<i>Populus tremula</i> L.).....	12
3.2.2	Olše lepkavá (<i>Alnus glutinosa</i> Gaertn.)	13
3.2.3	Vrba jíva (<i>Salix caprea</i> L.)	14
3.2.4	Bříza bělokorá (<i>Betula pendula</i> Roth.)	16
3.3	Submikroskopická stavba dřeva.....	17
3.3.1	Střední lamela	18
3.3.2	Primární stěna	18
3.3.3	Sekundární stěna.....	18
3.4	Hodnocené fyzikální vlastnosti dřeva.....	19
3.4.1	Vlhkost dřeva.....	19
3.4.1.1	Rozdělení vody ve dřevě	20
3.4.1.2	Mez hygroskopicity.....	21
3.4.1.3	Rovnovážná vlhkost dřeva	21
3.4.1.4	Vliv vlhkosti na mechanické vlastnosti dřeva.....	22
3.4.2	Hustota dřeva	23
3.4.2.1	Hustota dřevní substance.....	24
3.4.2.2	Vliv hustoty na mechanické vlastnosti dřeva.....	24
3.5	Hodnocené mechanické vlastnosti dřeva	25
3.5.1	Anizotropie mechanických vlastností dřeva	25
3.5.2	Pevnost dřeva.....	26
3.5.2.1	Napětí a deformace	26

3.5.2.2	Pevnost v tlaku	27
3.5.2.3	Pevnost ve statickém ohybu	28
3.5.3	Houževnatost dřeva.....	29
3.5.3.1	Rázová houževnatost v ohybu.....	29
3.5.4	Pružnost dřeva.....	30
3.5.4.1	Modul pružnosti při statickém ohybu.....	31
3.5.4.2	Dynamický modul pružnosti	31
4	Metodika	32
4.1	Příprava vzorků	32
4.2	Klimatizování.....	32
4.3	Měření	33
4.3.1	Hustota	33
4.3.2	Dynamický modul pružnosti.....	34
4.3.3	Pevnost v ohybu a statický modul pružnosti	35
4.3.4	Rázová houževnatost v ohybu	36
4.3.5	Pevnost v tlaku podél vláken	37
4.3.6	Absolutní vlhkost.....	38
4.3.7	Statistické zpracování dat	39
5	Výsledky a diskuze	40
5.1	Hustota	40
5.2	Dynamický modul pružnosti	41
5.3	Statický modul pružnosti.....	43
5.4	Pevnost v ohybu.....	44
5.5	Rázová houževnatost v ohybu	46
5.6	Pevnost v tlaku podél vláken	47
5.7	Absolutní vlhkost.....	49
6	Závěr	50
7	Seznam použité literatury	51
	Tištěná monografie.....	51
	Elektronické zdroje.....	53
	Normy.....	57
8	Seznam obrázků, grafů, tabulek a příloh	58
9	Samostatné přílohy	I

1 Úvod

Dřevo je v dnešní době hojně využívaným materiálem, který je pro své výhodné vlastnosti využíván např. ve stavebnictví, nábytkářství, energetice, papírenství, výrobě sportovních potřeb a hudebních nástrojů. Vzhledem k nynější době a aktuální problematice ekologie a uhlíkové neutrality, se dá očekávat zvýšený zájem o obnovitelné materiály, mezi něž řadíme i dřevo. Dřevo je všestranným nenahraditelným materiálem, ovšem stejně jako jakýkoliv jiný materiál má i své nevýhody, například anizotropii, heterogenitu, pórovitost, hygroskopicitu a rozměrovou nestabilitu. Tyto zmíněné nevýhody mají znatelný vliv na způsob chování dřeva, když je např. zatíženo vnějšími silami, nebo je vystaveno určitým klimatickým podmínkám. Pokud tedy dřevo chceme prakticky využít v nábytkářském nebo stavebním odvětví, musíme nejdřív poznat jakým způsobem reaguje na vnější zatížení. Práce je rozdělena do dvou částí, první část je zaměřena na popis jednotlivých dřevin a jejich možné využití společně s popisem jednotlivých zkoumaných vlastností. Druhá část práce je zaměřena na popis metodiky, jež byla použita při měření společně s výsledky, které jsou prezentovány formou tabulek a grafů. Z důvodu součásti v rámci projektu QK22020008 Národní agentury pro zemědělský výzkum, který pojednává o přípravných dřevinách, byla práce rozšířena o dřevo vrby a břízy.

2 Cíl práce

Cílem práce je porovnání pevnost v tlaku, pevnost v ohybu a rázové houževnatost dřeva topolu osiky (*Populus tremula* L.), případně i vrby jívy (*Salix caprea* L.), a olše lepkavé (*Alnus glutinosa* Gaertn.) stejného geografického původu (stanoviště, lokalita, porost).

Dílními cíli bylo stanovení pružnostních charakteristik (dynamického a statického modulu pružnosti) a vlivu pozice v kmeni na zkoumané vlastnosti.

3 Rozbor problematiky

3.1 Zkoumané dřeviny

3.1.1 Topol osika (*Populus tremula* L.)

Topol osika, známý pod latinským názvem *Populus tremula* L., je roztroušeně pórovitá listnatá dřevina, která pochází z chladných lesů mírného pásu a boreálních lesů Evropy a Asie. Vyskytuje se téměř v celé Evropě. Strom dorůstá výšky 15–35 m a průměru 1 m, přičemž se dožívá až 150 let. Jedná se o kolonizační pionýrskou dřevinu, jenž dokáže rychle obsadit kalamitní holiny, přičemž se pod ní mohou obnovovat dlouhověké dřeviny, které později osiku vytlačí. Kořenový systém osiky je plochý a zasahuje pouze do hloubky 1 m, přičemž se rozpíná do vzdálenost 20-30 m. Jedná se o dřevinu světlomilnou (vyhledávající světlo), která nemá náročné požadavky na půdu, pH a množství dostupné vody, zároveň toleruje širokou škálu teplot – od nízkých po vysoké. Díky zmíněné nenáročnosti, můžeme osiku nalézt v místech s vyšší hladinou podzemní vody, i na místech vysychavých, a dokonce i na kamenitých půdách. Osika bývá často označována jako plevelový druh, a to sice kvůli kořenovým výmladkům, které vznikají v reakci na poškození, např. při těžbě nebo požáru. (Horáček, 2019; Von Wühlisch, 2009; Musil, Möllerová, 2005)

3.1.1.1 Využití osiky

Dřevo osiky nemá vysokou hustotu jako jiné topoly, hlavně se používá na výrobu dých, překližek, buničiny pro výrobu papíru, dřevního uhlí a také pro výrobu kvalitní štěpky. Žádaná je také jako surovina pro výrobu sirek. Jako pionýrský druh se využívá k zalesňování degradované půdy. Díky své odolnosti vůči větru je vysazována jako ochranný pás, který snižuje rychlost větru. (De Rigo et al., 2016; Musil, Möllerová, 2005)

3.1.2 Olše lepkavá (*Alnus glutinosa* Gaertn.)

Olše lepkavá, známá pod latinským názvem *Alnus glutinosa* Gaertn., je roztroušeně pórovitá listnatá dřevina, která pochází z většiny území Evropy. Strom dorůstá výšky 20-35 m a průměru 1 m, přičemž se dožívá 100-200 let.

Jedná se o dřevinu světlomilnou, která v mládí snáší určité zastínění. Pro dobrý růst vyžaduje vysokou dostupnost vláhy v půdě. Olše je přizpůsobená širokému rozsahu teplot a ke klimatu je značně lhostejná. Dá se najít na široké škále typů půd, a pokud je vlhkost adekvátní, tak také na půdě chudé či hrubé šterkopískové. Překvapivě dobře roste i na výsypkách, což se vysvětluje tím, že odebírá kondenzační vodu z volných porostů v nasycené zemině. Typickými stanovišti pro olši lepkavou jsou bažinaté podmáčené lokality, břehy řek a jezer. V kořenových hlízkách žijí v symbióze s nitrogenními bakteriemi, které dokážou vázat dusík, což je užitečné pro zlepšení stavu půdy. (Houston Durrant et al., 2016; Musil, Möllerová, 2005)

3.1.2.1 Využití olše

Dřevina jako taková dlouhodobě ve svých listech udržuje dusík, což při podzimním opadu listů vede k tvorbě podestýlky bohaté na dusík. Olše také hraje důležitou roli při rekultivaci půdy, stabilizaci břehů a fungování říčních ekosystémů. Svou schopností je schopna vázat dusík, může zlepšovat úrodnost půdy. Dřevo olše je měkké a porézní, ale zároveň velice trvanlivé (obsahuje třísloviny) a je tak vhodné pro použití na mola, podvodní podpěry a malé čluny. Dřevo olše je často vyhledávanou surovinou pro výrobu dýh. (Houston Durrant et al., 2016)

3.1.3 Vrba jíva (*Salix caprea* L.)

Vrba jíva známá pod latinským názvem *Salix caprea* L., je roztroušeně pórovitá listnatá dřevina, která pochází z chladných mírných a boreálních oblastí Evropy a Asie. Strom dorůstá do výšky 12 m a průměru 0,5 m, přičemž se dožívá 100-200 let. Jedná se o dřevinu světlomilnou, která v mládí toleruje jen slabé zastínění. Vyskytuje se na sušších a mnohdy i na kamenných stanovištích. Ve srovnání s jinými druhy vrb, jíva špatně snáší nadměrné množství vody v půdě a je tedy citlivá na nepřetržité zaplavování. Jíva je jak klimaticky, tak půdně nenáročná. (Enescu et al., 2016; Musil, Möllerová, 2005)

3.1.3.1 Využití vrby

Strom je využíván jako větrolam a jeho listy se používají jako krmivo pro dobytek. Celosvětově se jíva využívá k extrakci těžkých kovů ze znečištěných lokalit. V medicíně se extrakty z jívy využívají jako antiseptikum, oční tonikum či jako lék proti bolesti. Dřevo poskytuje vhodný materiál pro výrobu překližek, dřevité vlny, člunů nebo dobrého dřevního uhlí, které se v minulosti využívalo jako střelný prach a jako kreslířský uhel. (Enescu et al., 2016; Balabán, 1955)

3.1.4 Bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth.)

Bříza bělokorá známá pod latinským názvem *Betula pendula* Roth., je roztroušeně pórovitá listnatá dřevina, která se vyskytuje ve většině státech Evropy, převážně v severních oblastech. Bříza bělokorá a břízy obecně jsou základní složkou mírného a boreálního pásma lesů a mají pozitivní vliv na rozmanitost ekosystémů. Velké množství býložravého hmyzu a symbiotických hub jsou závislé na přítomnosti břízy. Strom dorůstá výšky 25-30 m a průměru 0,75 m, přičemž se dožívá 100-150 let. Kůra mladých stromů je hnědá a ve zralosti přechází do barvy stříbřitě bílé, s horizontálními tmavě šedými čocinkami, které s věkem tmavnou a následně vznikají trhliny. Jedná se o dřevinu, která je velice náročná na světlo a nejlépe roste na suchých, dobře odvodněných půdách, zejména u kyselých půd. Klimaticky je to však dřevina nenáročná. Kořenový systém je mělký, ale daleko sahající, přičemž kořeny se snadno spojují s velkým počtem ektomykorhizních hub. (Beck et al., 2016; Vakkari, 2009; Musil, Möllerová, 2005)

3.1.4.1 Využití břízy

Protože bříza může tolerovat širokou škálu stanovištních podmínek, zvláště chudé půdy, je často používána k rekultivacím a ke zlepšování půdy, na které mohou být později zasazeny jiné listnaté nebo jehličnaté dřeviny. Březová míza se ve východní Evropě využívá jako tonikum, sirup nebo jako surovina pro výrobu březového vína. Březový dehet je využíván jako surovina pro výrobu mastí na ekzémy a lupénku. Dřevo břízy bělokoré se používá při výrobě překližek a její buničina se míchá s buničinou jehličnanů ke zlepšení kvality papíru. (Beck et al., 2016; Vakkari, 2009)

3.2 Makroskopická a mikroskopická stavba zkoumaných dřevin

3.2.1 Topol osika (*Populus tremula* L.)

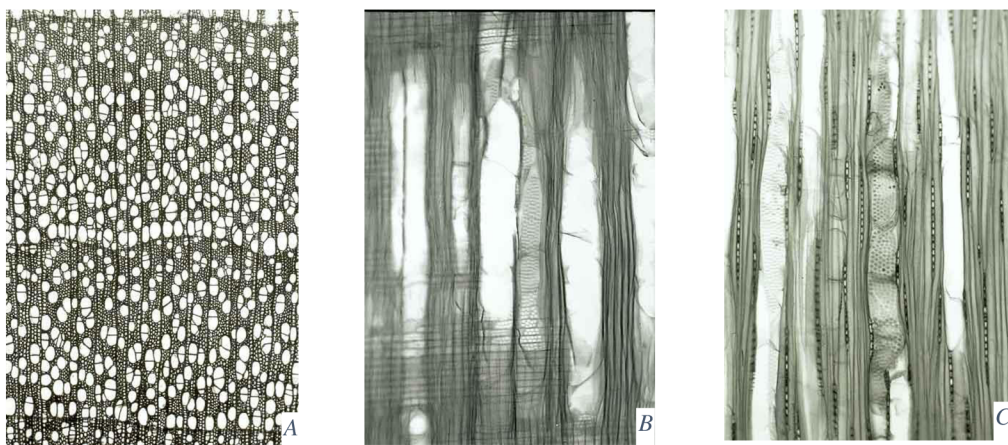
Jedná se o dřevinu listnatou, roztroušeně pórovitou, jejíž cévy jsou na příčném řezu (viz obr. 1 A) sdruženy po 2-5 radiálních řadách a nejsou pouhým okem patrné. Jedná se o dřevinu bělovou, jejíž barva po celém průřezu je bílá až žlutobílá. Dřeňové paprsky jsou stejně jako póry pouhým okem nezřetelné. Letokruhy jsou zřetelné a dřeňové paprsky jsou viditelné pouze pomocí lupy. Na podélných řezech (viz obr. 1 B, C) je dřevo lesklé. Dřevo velice lehké a měkké – hustota se pohybuje okolo 441 kg.m^{-3} . (Zeidler, Borůvka, 2016; Balabán, 1955)



Obrázek 1 – Makroskopická stavba dřeva topolu osiky: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez

<https://fraxinus.mendelu.cz> (5. 11. 2022)

Mikroskopická stavba se vyznačuje jednoduchými perforacemi cév, které jsou na příčném řezu uspořádány jednotlivě nebo v krátkých radiálních řadách 2-3 buněk. Dřeňové paprsky (viz obr. 2 B) jsou jednovrstevné, homogenní a jsou složeny z ležatých parenchymatických buněk. Na 1 mm^2 připadá 50-60 dřeňových paprsků, přičemž výška dřeňových paprsků se pohybuje v rozmezí 4-22 buněk. U osiky a topolů se obecně vyskytuje bohatší tvorba thyl. Přechod mezi jarním a letním dřevem je v závislosti na rozměru pórů víceméně znatelný. (Zeidler, Borůvka, 2016; Balabán, 1955)



Obrázek 2 – Mikroskopická stavba dřeva topolu osiky: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez

www.woodanatomy.ch (5. 11. 2022)

3.2.2 Olše lepkavá (*Alnus glutinosa* Gaertn.)

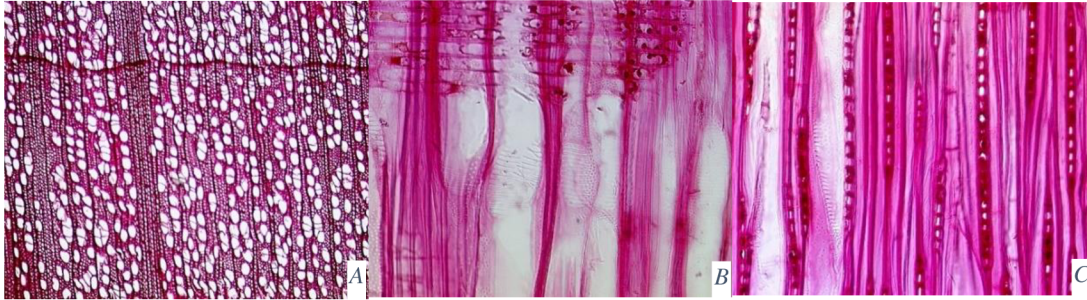
Jedná se o dřevinu listnatou, roztroušeně pórovitou, jejíž cévy nejsou pouhým okem na příčném řezu patrné, ale na podélných řezech se jeví jako drobné trhlínky. Letokruhy jsou málo zřetelné a na jejich rozhraní se vyskytují dřevné skvrny (viz obr. 3 A). Jedná se o dřevinu bělovou, jejíž barva je vlivem oxidace tříslovitých látek narůžovělá až světle oranžová. Dřevné paprsky jsou mohutné a dobře viditelné na všech řezech (viz obr. 3 B, C). Dřevo je měkké a lehké – hustota se pohybuje okolo $553 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. (Zeidler, Borůvka, 2016; Balabán, 1955)



Obrázek 3 – Makroskopická stavba dřeva olše lepkavé: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez

<http://r.fld.czu.cz> (7. 11. 2022)

Z obrázku 4 A je patrné, že cévy jsou uspořádány v krátkých radiálních řadách po čtyřech a více. Na obrázku 4 B jsou patrné žebříčkovité perforace cév, které se skládají z 12-25 příček. Jednovrstevné dřevové paprsky se často seskupují v jeden široký nepravý (sdružený) dřevový paprsek. Dřevové paprsky jsou převážně homogenní a jejich výška činí 0,2 mm (až 50 buněk). V tangenciálním řezu (viz



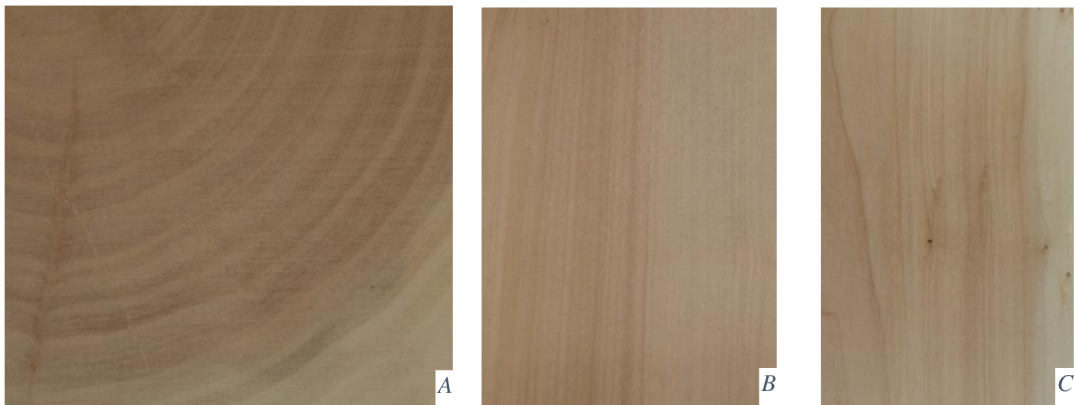
Obrázek 4 – Mikroskopická stavba dřeva olše lepkavé: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez

<https://fraxinus.mendelu.cz> (7. 11. 2022)

obr. 4 C) jsou tyto dřevové paprsky často nepravidelně uspořádány. Mezi libriformními vlákny je ve skupinkách roztroušený dřevní parenchym. (Zeidler, Borůvka, 2016; Balabán, 1955)

3.2.3 Vrba jíva (*Salix caprea* L.)

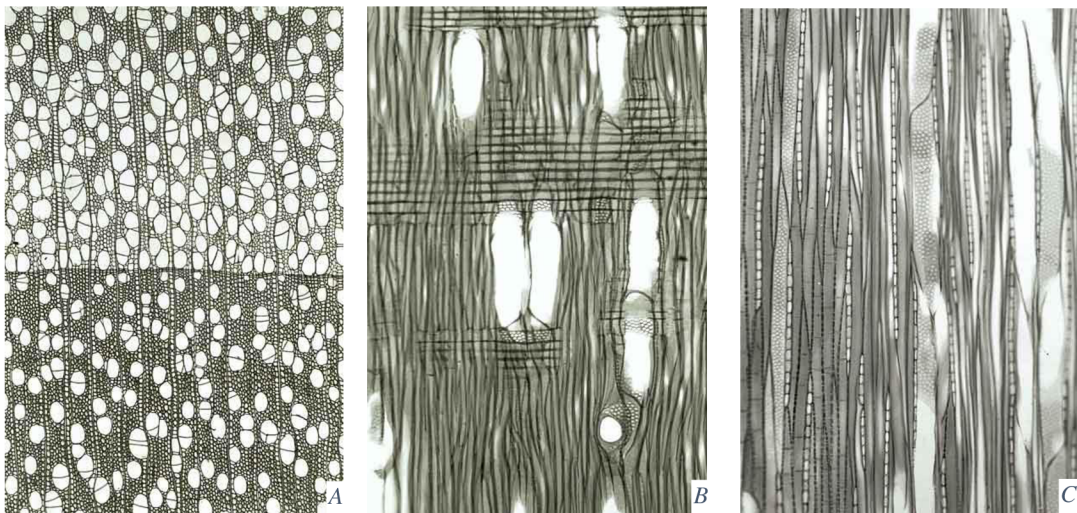
Jedná se o dřevinu listnatou, roztroušeně pórovitou, jejíž cévy nejsou pouhým okem viditelné. Dřevo jívy má široké zřetelné letokruhy (viz obr 5 A). Jedná se o dřevinu jádrovou, kde je jádro špatně odlišitelné od běli. Barva jádra je žlutohnědá, barva běli je světlá, někdy nažloutlá. Dřevové paprsky nejsou pouhým okem viditelné na žádném z řezů. Jedná se o dřevo měkké a lehké – hustota se pohybuje okolo 470 kg.m^{-3} . (Zeidler, Borůvka, 2016; Balabán, 1955)



Obrázek 5 – Makroskopická stavba dřeva vrbý jívy: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez

<http://r.fld.czu.cz> (10. 11. 2022)

Z obrázku 6 A je patrné, že cévy jsou uspořádány jednotlivě nebo v radiálních řadách po 2-5, přičemž na 1 mm² připadá 100 cév. Na obrázku 6 B si můžeme všimnout, že perforace cév je jednoduchá. Typické jsou jednovrstvé heterogenní dřeňové paprsky, které se skládají z ležatých a čtvercových parenchymatických buněk. Dřeňové paprsky jsou široké 0,01 mm a vysoké 3-15 buněk (0,1-0,36 mm). Na 1 mm² připadá 70-80 dřeňových paprsků. (Zeidler, Borůvka, 2016; Balabán, 1955)



Obrázek 6 – Mikroskopická stavba dřeva vrbý jívy: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez

www.woodanatomy.ch (10. 11. 2022)

3.2.4 Bříza bělokorá (*Betula pendula* Roth.)

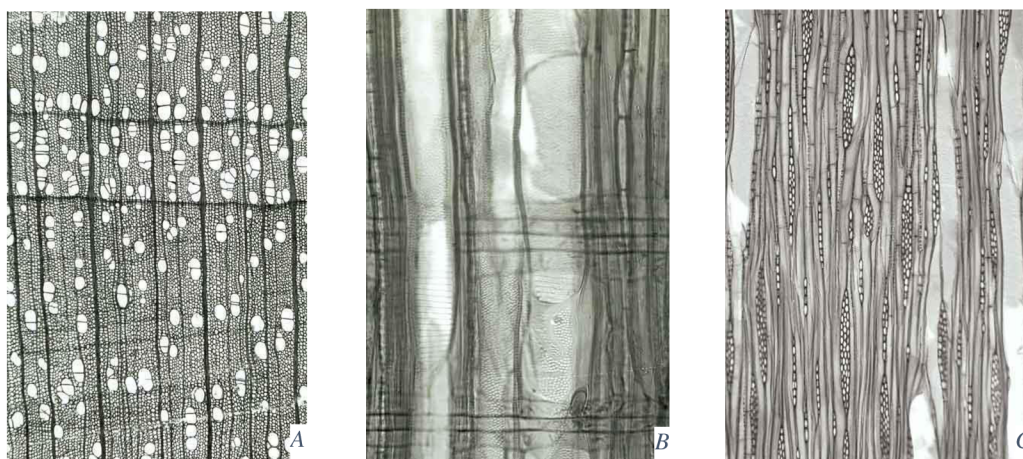
Jedná se o dřevinu listnatou, roztroušeně pórovitou, jejíž barva je žlutavě nebo černavě bílá. Jádro dřeviny není barevně odlišeno a letokruhy jsou široké, ovšem málo zřetelné. Cévy nejsou pouhým okem patrné a jejich rovnoměrné rozložení způsobuje, že příčný řez se jeví jako by byl posypán moukou. Dřeňové paprsky jsou zřetelné pouze na radiálním řezu, kde se jeví jako lesklé čárky. Na řezu radiálním a tangenciálním jsou často patrné tmavé dřeňové skvrny (viz obr. 7 B). Jedná se o dřevo tvrdé, středně těžké – hustota se pohybuje okolo 673 kg.m^{-3} . (Zeidler, Borůvka, 2016; Balabán, 1955)



Obrázek 7 – Makroskopická stavba dřeva břízy bělokoré: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez

<https://fraxinus.mendelu.cz> (14. 11. 2022)

Cévy jsou úzké (0,03-0,13 mm) a uspořádány jednotlivě nebo v krátkých radiálních řadách po dvou až třech. Perforace cév je žebříčkovitá. Dřeňové paprsky jsou homogenní, 1-4 vrstvené, složené z malých tlustostěnných buněk. Výška dřeňových paprsků se pohybuje v rozmezí 1-30 buněk. (Zeidler, Borůvka, 2016; Balabán, 1955)

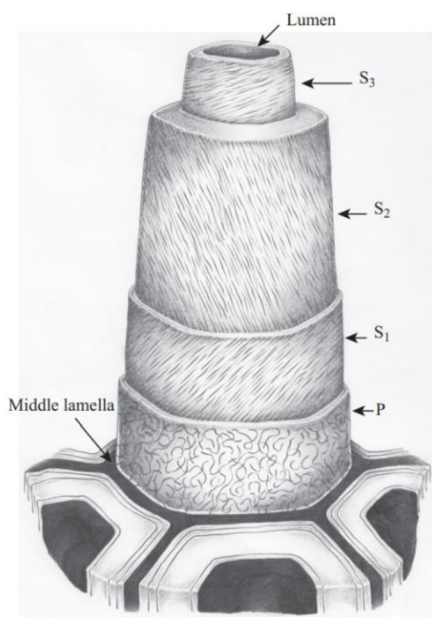


Obrázek 8 – Mikroskopická stavba dřeva břízy bělokoré: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez

www.woodanatomy.ch (14. 11. 2022)

3.3 Submikroskopická stavba dřeva

Buněčná stěna dřeva je složená z jednotlivých vrstev, které tvoří celek dřevní buňky. Z obrázku 9 je patrné, že při bližším zkoumání dřevní struktury pomocí elektronového mikroskopu můžeme tyto jednotlivé vrstvy rozlišit a rozdělit na střední lamelu (SL), primární stěnu (P) a sekundární stěnu (S), která se skládá z vnější vrstvy (S1), střední vrstvy (S2) a vnitřní vrstvy (S3). (Kettunen, 2008)



Obrázek 9 – Struktura buněčné stěny

(Stokke et al., 2013)

3.3.1 Střední lamela

Mezi sousedními buňkami existuje střední lamela, jejíž hlavní funkcí je spojovat sousední buňky dohromady do soudržné buněčné hmoty. Vzniká společně s tvorbou primární stěny a je naprosto amorfní. Na začátku je tvořená z pektinů, avšak později je silně lignifikována. Střední lamela je kvůli své amorfní struktuře znatelně slabší v pevnosti. (Kettunen, 2008; Silvester, 1967)

3.3.2 Primární stěna

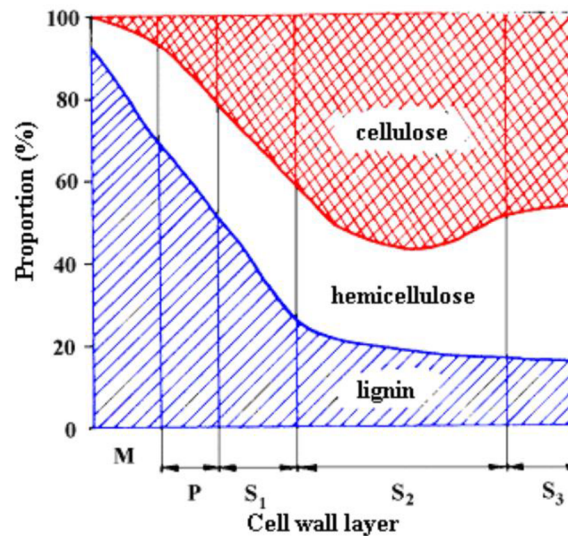
Název stěny vyplývá ze skutečnosti, že během diferenciací buněk od buněk kambiaálních tato stěna vzniká jako první. Na začátku je primární stěna velmi tenká a elastická, a proto se buňka může roztáhnout do své konečné velikosti o tloušťce 60–90 nm (Borůvka, Babiak, 2016). Později získá vyztužená vlákna a také zesílí (Kettunen, 2008).

Vlivem orientace celulózových fibril, rozlišujeme primární stěnu na vnější a vnitřní, přičemž vnější stěna se vyznačuje disperzní orientací fibril, s vysokým odklonem od podélné osy buňky. Ve vnitřní stěně může být pozorována zřetelnější tendence k orientaci fibril. Úhel odklonu od podélné osy buňky se pohybuje v rozmezí 0 – 90°. (Požgaj et al., 1993)

3.3.3 Sekundární stěna

Sekundární stěna dodává buňce konečnou formu a podstatně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti vlákna. Po primární stěně následuje stěna sekundární (S), která je vytvořena na primární stěně o dva týdny později. Skládá se ze 3 vrstev. K primární stěně je připojena vnější vrstva (S1), jejíž sklon fibril od podélné osy se pohybuje v rozmezí 50–70°. Tloušťka vnější stěny (S1) zabírá 10–15 % celkové tloušťky sekundární buněčné stěny (S). Na vnější stěně (S1) je střední vrstva (S2), jejíž úhel fibril je téměř rovnoběžný (odklon do 10°) s podélnou osou buňky. Střední vrstva (S2) pokrývá 85 % celkové tloušťky sekundární stěny. Z grafu 1 je patrné, že v této vrstvě je také nejvyšší obsah celulózy, která díky výraznému krystalickému podílu (70 %) předurčuje chování dřeva. Zejména ovlivňuje vlastnosti jako je anizotropie, sesychání, pevnost a lomové chování. Nejvnitřnější vrstvou sekundární buněčné stěny je vnitřní vrstva (S3). Ve struktuře je podobná vnější vrstvě (S1), ale úhel sklonu fibril od podélné

osy se pohybuje v rozmezí 60–90°. Tloušťka vnitřní vrstvy (S3) zaujímá 5 % celkové tloušťky sekundární stěny (S). (Kettunen, 2008; Horáček, 1998; Požgaj et al., 1993)



Graf 1 - Procentuální zastoupení jednotlivých složek v buněčné stěně

(Kettunen, 2008)

3.4 Hodnocené fyzikální vlastnosti dřeva

3.4.1 Vlhkost dřeva

Dřevo je navlhavý, hygroskopický, kapilárně – porézní materiál, u kterého je přítomnost vody nevyhnutelným předpokladem. Voda ve dřevě negativně ovlivňuje jeho vlastnosti, proto je tedy z hlediska fyzikálně – mechanických zkoušek dřeva důležité kvantifikovat její obsah ve dřevě. (Borůvka, Babiak, 2016)

Přítomnost vody ve dřevě se nazývá vlhkostí dřeva. Rozlišujeme vlhkost absolutní a vlhkost relativní. Vlhkost absolutní je charakteristikou fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Vyjadřuje se podílem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu a vztah pro výpočet je zmíněn v podkapitole 4.3.6.

Vlhkostí relativní rozumíme procentuální zastoupení vody z celkové hmotnosti dřeva. Vyjádření této vlhkosti je nezbytné při prodeji či nákupu dřeva podle jeho hmotnosti a je dána vztahem:

$$w_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

w_{rel} – relativní vlhkost dřeva [%]

m_w – hmotnost vlhkého dřeva [g]

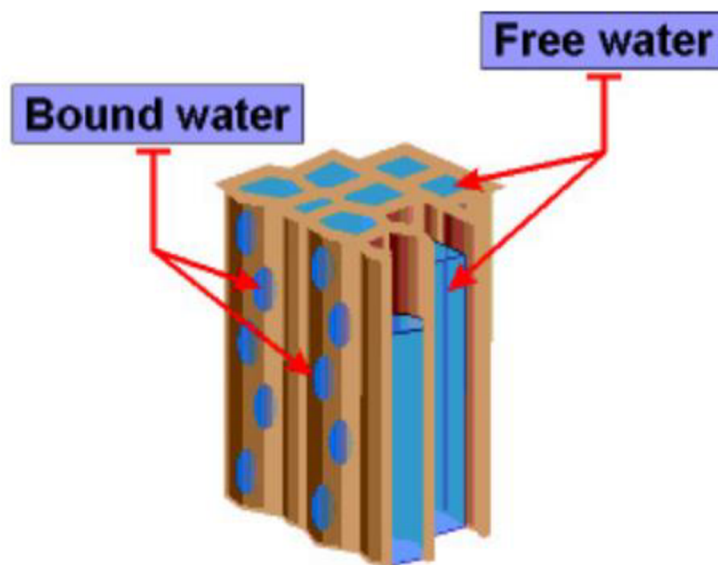
m_0 – hmotnost absolutně suchého dřeva [g]

Požgaj et al. (1993) uvádí, že v závislosti na obsahu vlhkosti se v praxi nejčastěji rozlišují následující stupně vlhkosti dřeva:

- mokré, které je uložené ve vodě ($w_{abs} > 100 \%$);
- čerstvě pokácené (w_{abs} se pohybuje v rozmezí 50–100 %);
- vysušené na vzduchu (w_{abs} v rozmezí 15–20 %);
- vysušené v sušárnách pro použití v interiéru (w_{abs} v rozmezí 8–10 %);
- absolutně suché, vysušené při teplotě $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

3.4.1.1 Rozdělení vody ve dřevě

Z pohledu uložení vody ve dřevě, rozdělujeme vodu na vodu volnou a vázanou (viz obr. 10). Voda volná představuje vodu v kapalném skupenství, která se nalézá v lumenech a mezibuněčných prostorech, přičemž výskyt vody volné nijak neovlivňuje buněčnou stěnu a pouze přidává hmotu do systému dřevo – voda. Hybnou silou pohybu vody volné je gradient tlaků. Voda vázaná, také známá jako adsorbovaná se nachází v buněčných stěnách a je zde vázána vodíkovými můstky, které vznikají vázáním molekul vody na volná sorpční hydroxylová místa, která se nacházejí v amorfních oblastech polymerních složek dřeva. Hybnou silou pohybu je gradient koncentrací. Samotná voda volná vzniká jako výsledek kapilární kondenzace, která nastává v případě, kdy je na každé volné hydroxylové místo navázáno 6–10 molekul vody. Voda vázaná existuje v hygroskopickém rozsahu obsahu vlhkosti od 0–30 %, přičemž v tomto rozmezí dochází k rozměrovým změnám dřeva, které jsou způsobeny vnikáním molekul vody do amorfních oblastí polymerního řetězce. (Stokke et al., 2013; Shmulsky, Jones, 2011; Horáček, 1998; Požgaj et al., 1993)



Obrázek 10 – Voda volná a vázaná

(Selim, 2006)

3.4.1.2 Mez hygroskopicity

Mez hygroskopicity definujeme jako ostré rozhraní mezi vodou vázanou a vodou volnou. Jedná se tedy o stav, kdy se ve dřevě vyskytuje pouze voda vázaná a žádná voda volná. Mez hygroskopicity je také často považována za takový obsah vlhkosti (v průměru 30 %), pod kterým se fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva začínají měnit jako funkce obsahu vlhkosti. (Selim, 2006; Požgaj et al., 1993)

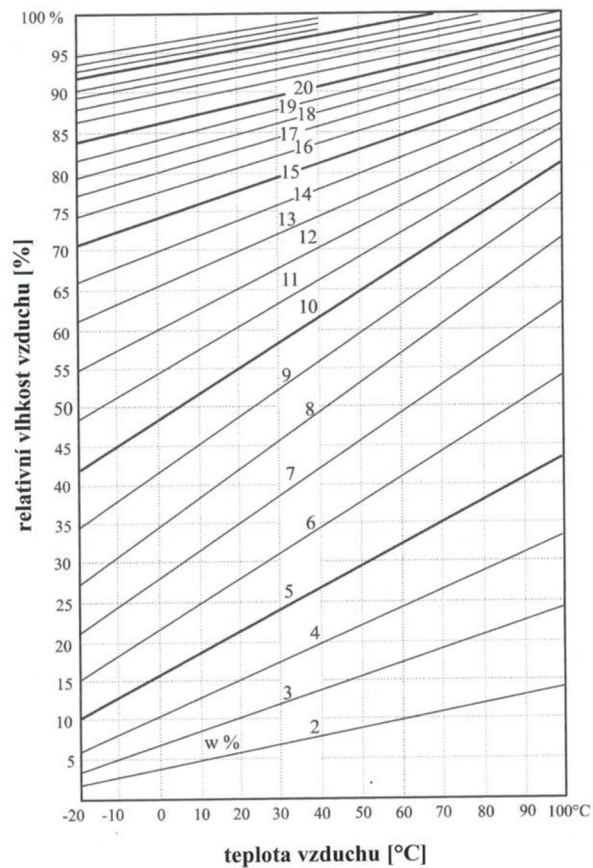
Po překročení obsahu vlhkosti 30 % bude další sorbovaná voda do dřevní struktury uložena v lumenech a mezibuněčných prostorech. V důsledku toho se s dalším zvýšením vlhkosti dřeva již nemění fyzikální a mechanické vlastnosti, tzn. pokud jsou modul pružnosti, pevnost v tlaku, bobtnání, atd. stanoveny jako funkce obsahu vlhkosti dřeva, pak nad mezí hygroskopicity budou vykazovat konstantní hodnotu. (Hill, 2006)

3.4.1.3 Rovnovážná vlhkost dřeva

Rovnovážná vlhkost dřeva nebo jiných hygroskopických materiálů lze definovat jako obsah vlhkosti, při kterém dřevo nenabývá ani neztrácí vlhkost, tj. bylo dosaženo stavu rovnováhy. Dřevo je materiálem hygroskopickým, tzn. že při vysoké relativní vlhkosti vzduchu může ze svého okolí vlhkost přijímat

(adsorbovat) nebo v případě nízké relativní vlhkosti vzduchu může vlhkost odevzdávat (desorbovat) do té doby, dokud nenabude rovnováhy s okolní atmosférou. Tento proces změny vlhkosti dřeva v závislosti na relativní vlhkosti vzduchu a teplotě prostředí je reverzibilní, ale ne po stejné křivce. Pro stejnou relativní vlhkost a teplotou vzduchu je vlhkost dřeva vyšší při desorpci než při adsorpci. (Stokke et al., 2013; Selim, 2006; Gandelová et al., 1996)

Za předpokladu, že okolní parametry (teplota a relativní vlhkost vzduchu) jsou konstantní můžeme stanovit rovnovážnou vlhkost dřeva pomocí Čučlického diagramu, který je vyobrazen na grafu 2.



Graf 2 – Čučlického diagram pro stanovení rovnovážné vlhkosti dřeva

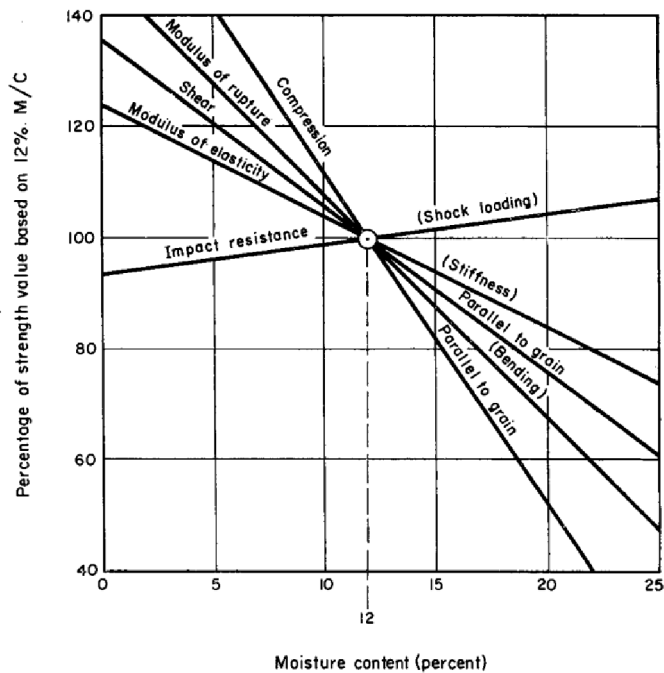
(Borůvka, Babiak, 2016)

3.4.1.4 Vliv vlhkosti na mechanické vlastnosti dřeva

Je dobře známo, že je dřevo hygroskopický, elastický materiál, proto jsou jeho mechanické vlastnosti ovlivněny změnou obsahu vlhkosti. Obecně se většina mechanických vlastností dřeva mění nepřímo úměrně s obsahem vlhkosti dřeva

pod mezi hygroskopicity. Průměrná změna statického modulu pružnosti v ohybu, tlaku podél vláken a tvrdosti u čistých bezvadných zkušebních vzorků lze aproximovat jako 2 %, 6 % a 2,5 % při změně obsahu vlhkosti o 1 % pod mezi hygroskopicity při konstantní teplotě. (Wang, Wang, 1999)

Pod mezi hygroskopicity povede zvýšení obsahu vlhkosti obecně ke snížení mechanických vlastností, zatímco nad mezi hygroskopicity jsou účinky vlhkosti obvykle zanedbatelné. Z grafu 3 je patrné, že různé mechanické vlastnosti mají různou citlivost na změny obsahu vlhkosti, přičemž pevnostní vlastnosti jsou citlivější než vlastnosti tuhosti a statické vlastnosti jsou citlivější než vlastnosti dynamické. Pokud jde o způsob namáhání, tak tlak podél vláken je silně ovlivněn obsahem vlhkosti, zatímco pevnost v tahu znatelně méně a v důsledku toho má obsah vlhkosti střední vliv na ohybové vlastnosti. (Arnold, 2010)



Graf 3 – Závislost mechanických vlastností dřeva na obsahu vlhkosti

(Silvester, 1967)

3.4.2 Hustota dřeva

Hustota dřeva je funkcí množství dřevní substance, extraktivních látek a vlhkosti. Přítomnost vlhkosti ve dřevě nejen zvyšuje hmotnost dřeva, ale také má za následek bobtnání dřeva, a tedy jak hmotnost, tak i objem jsou ovlivněny. Hustota dřeva se zvyšuje přibližně o 0,5 % na každé zvýšení obsahu vlhkosti o 1 % až po mez hygroskopicity. Nad mezi hygroskopicity se hmotnost bude dále

navyšovat až po mez nasycení, ale objem již zůstane konstantní. (Dinwoodie, 2017)

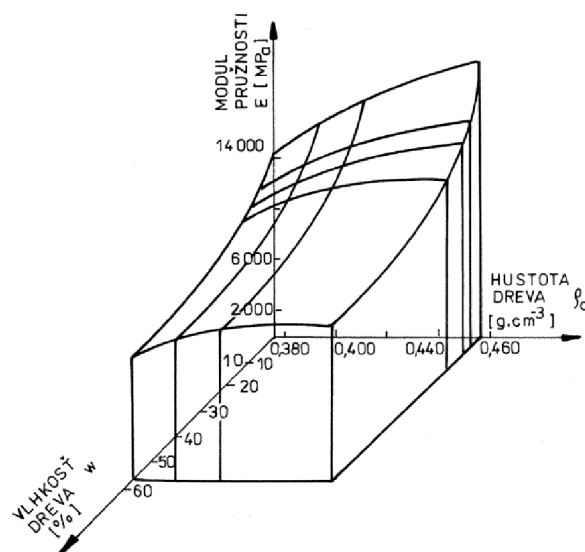
Vztah pro stanovení hustoty dřeva při daném obsahu vlhkosti je zmíněn v podkapitole 4.3.1.

3.4.2.1 Hustota dřevní substance

Dřevní substanci definujeme jako hmotu buněčných stěn bez jakýchkoliv submikroskopických dutin, lumenů či mezibuněčných prostorů. Přestože se hustota dřeva může mezi různými druhy dřevin značně lišit, hustota dřevní substance zůstává konstantní pro všechny dřeviny a její přibližná hodnota je 1500 kg.m^{-3} , přičemž přesná hodnota je závislá na použité kapalině při měření objemu. Důvodem, proč je hodnota této veličiny konstantní je fakt, že chemické složky dřeva mají velice podobnou hustotu – celulóza: 1560 kg.m^{-3} , hemicelulózy: 1500 kg.m^{-3} a lignin: 1350 kg.m^{-3} . (Dinwoodie, 2017; Horáček, 1998)

3.4.2.2 Vliv hustoty na mechanické vlastnosti dřeva

Mezi moduly pružnosti a hustotou dřeva existuje kladná lineární závislost. Obecně platí, že s nárůstem hustoty dochází ke zvýšení modulu pružnosti ve směru vláken. Z grafu 4 je patrné, že vliv hustoty dřeva se nejvíce projevuje u suchého dřeva a u dřeva s obsahem vlhkosti přesahující mez hygroskopicity je její vliv méně výrazný. (Gandelová et al., 1996)



Graf 4 – Vliv hustoty a vlhkosti dřeva na modul pružnosti

(Požgaj et al., 1993)

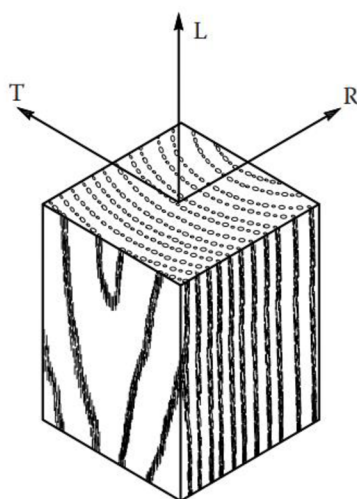
3.5 Hodnocené mechanické vlastnosti dřeva

Mechanické vlastnosti dřeva charakterizují schopnost dřeva odolávat účinku vnějších zatížení, přičemž tyto vlastnosti dělíme do tří skupin: základní, odvozené a technologické. Mezi základní vlastnosti řadíme pevnost, houževnatost, pružnost a plastičnost. (Kvietková, 2015)

V následujících podkapitolách budou rozvedeny pouze základní vlastnosti.

3.5.1 Anizotropie mechanických vlastností dřeva

Dřevo je anizotropní materiál, což znamená, že jeho mechanické i fyzikální vlastnosti závisí na uvažovaném směru. Dřevo je považováno za válcový ortotropní materiál, který má tři navzájem kolmé hlavní směry, jež rozdělujeme na směr podélný, radiální a tangenciální (viz obr. 11). Mezi těmito směry jsou velké rozdíly v tuhosti a pevnosti. Vazby ve směru mikrofibřil jsou kovalentní, zatímco vazby mezi nimi jsou tvořeny vodíkovými můstky. V důsledku malého odklonu mikrofibřil od podélné osy bude snazší vytržení buněčné stěny při zatížení kolmo na vlákna, než pokud je zatížení aplikováno rovnoběžně s vlákny. (De Moura, Dourado, 2018; Dinwoodie, 2017)



Obrázek 11 – Hlavní směry ortotropie dřeva

(De Moura, Dourado, 2018)

3.5.2 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva lze definovat jako schopnost materiálu odolávat působení vnějších mechanických sil bez porušení jeho struktury. Ukazatelem této vlastnosti je mez pevnosti (Matovič, 1993). Pevnost dřeva vyjadřujeme číselnou hodnotou napětí, při kterém dojde k porušení soudržnosti tělesa. Pevnost podle způsobu zatížení rozdělujeme na pevnost v tahu, tlaku, ohybu, krutu a smyku. (Požgaj et al., 1993)

3.5.2.1 Napětí a deformace

Napětí můžeme definovat jako rozloženou sílu v materiálu, která představuje reakci materiálu na jeho zatížení vnějšími silami. V místě aplikované vnější síly bude vnitřní napětí vyrovnávat vnější síly a po tuto dobu zůstává těleso v rovnováze. (Silvester, 1967)

Jestliže je vnější síla F rovnoměrně rozložená na ploše S , vyjadřujeme napětí následujícím vztahem:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [MPa] \quad (2)$$

σ – napětí [MPa]

F – velikost působící vnější síly [N]

S – plocha [mm²]

V důsledku působení vnějších sil dochází ke změnám rozměrů, a tím i částečně změně tvaru tělesa. Tyto změny se nazývají deformace. Všude, kde se objeví napětí, vzniká odpovídající deformace a ta je přímo úměrná napětí. Tento vztah platí až po mez úměrnosti, tedy po mez, po kterou stále platí Hookův zákon. (Silvester, 1967):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [MPa] \quad (3)$$

σ – napětí [MPa]

E – modul pružnosti [MPa]

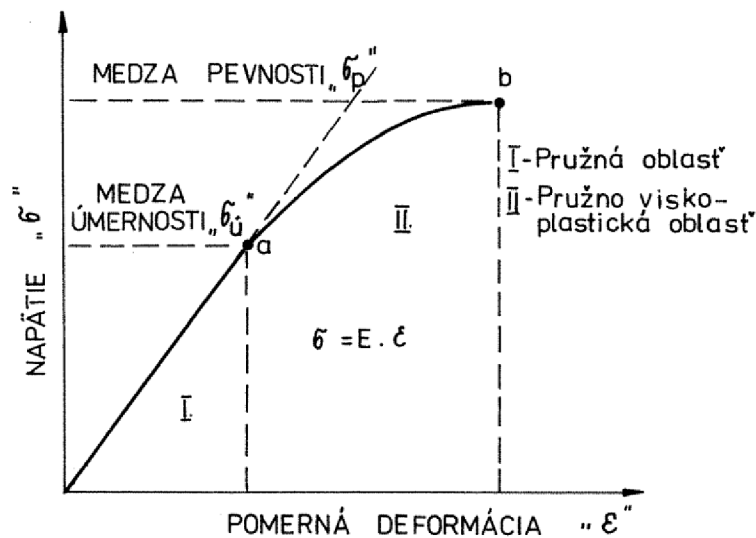
ε – poměrná deformace [-]

Závislost mezi napětím a deformací vyjadřuje tzv. pracovní diagram. Tento diagram (viz graf 5) můžeme rozdělit do dvou částí, na část pružnou a

plastickou. Pracovní diagram udává mez úměrnosti, mez pevnosti, modul pružnosti, deformace pružné, pružné v čase a plastické. (Svoboda et al., 2018)

Mez úměrnosti definujeme jako přechod mezi lineární (pro kterou platí Hookův zákon) a nelineární částí křivky. Deformace, které v tělese vznikají při zatěžování až po mez úměrnosti jsou deformace pružné, které po odtížení tělesa okamžitě zanikají, přičemž těleso opět získává své původní rozměry a tvar. Při zatěžování nad mez úměrnosti začne původní přímka s předpisem $y = kx + q$ (kde směrnice přímky k představuje modul pružnosti E , koeficient x představuje poměrnou deformaci ε a koeficient q představuje počáteční napětí σ), nabývat křivočarý tvar. Po překročení meze úměrnosti dochází k rozvoji deformací pružných v čase společně s deformacemi plastickými. (Matovič, 1993)

Deformací pružnou v čase rozumíme vratnou změnu rozměrů a tvaru po odstranění účinku vnějších mechanických sil, přičemž její rozvoj a zánik nenastává okamžitě, ale za určitý čas. Plastická deformace představuje trvalou, nevratnou změnu rozměrů a tvaru tělesa, která nastane v okamžiku odstranění účinků vnějších sil. (Gandelová et al., 1996)



Graf 5 – Pracovní diagram

(Požgaj et al., 1993)

3.5.2.2 Pevnost v tlaku

Vzhledem k anizotropní povaze dřeva stanovujeme pevnost v tlaku podél a kolmo (v radiálním či tangenciálním směru) na vlákna. Jeli dřevo namáháno

takovým způsobem, který zkracuje jeho vlákna, tak se jedná o tlak podél vláken. Hodnota tlaku podél vláken se pohybuje v rozmezí 30–50 % z meze pevnosti (Dinwoodie, 2017; Hoadley, 2000). Mírné kolísání hodnot pevnosti v tlaku se objevuje jako funkce směru působícího zatížení ve vztahu k buněčné struktuře. V radiálním směru je deformační odpor o něco vyšší než ve směru tangenciálním. (Kettunen, 2008)

Obecně platí, že tlak podél vláken při $w_{\text{abs}} = 12\%$ je přibližně 10x větší (v průměru 50 MPa) než tlak napříč vláken. Pro stanovení hodnoty napětí podél a napříč vláken se využívá vztahu, který je zmíněný v podkapitole 4.3.5.

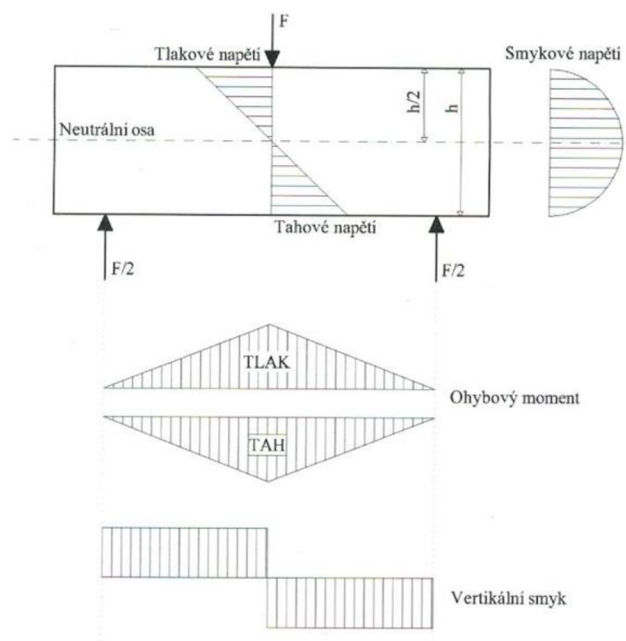
3.5.2.3 Pevnost ve statickém ohybu

Pevnost v ohybu reprezentuje jednu z nejdůležitějších mechanických vlastností dřeva. V závislosti na průběh vláken rozlišujeme dva způsoby zatěžování. První způsob popisuje pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají rovnoběžně s podélnou osou tělesa, přičemž síla působí v radiálním nebo tangenciálním směru. Druhý způsob popisuje pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osou tělesa, tento druhý způsob se však prakticky nevyskytuje. (Matovič, 1993)

Při zatížení tělesa v ohybu, vzniká v jeho horní části napětí v tlaku (vrchní vlákna jsou zkracována) a ve spodní části napětí v tahu (spodní vlákna jsou prodlužována). Maximální napětí vznikají na horní a spodní části nosníku. Při jednoduché analýze nosníku se předpokládá, že napětí se mění lineárním způsobem od horního ke spodnímu povrchu. Ve středu nosníku se nachází neutrální osa, která si zachovává svou původní délku jak před, tak i po deformaci. V místě neutrální osy se nevytvářejí žádná tlaková ani tahová napětí. (Shmulsky, Jones, 2011)

Průběh jednotlivých napětí je znázorněn na obrázku 12. Mez pevnosti ve statickém ohybu se v průměru pohybuje v rozmezí 90 – 100 MPa, přičemž mez úměrnosti je průměrně 70 % meze pevnosti. (Matovič, 1993)

Výsledné napětí v trojbodovém ohybu se stanovuje dle vztahu, který je zmíněný v podkapitole 4.3.3.



Obrázek 12 – Průběh jednotlivých napětí při zatížení v ohybu

(Borůvka, Babiak, 2016)

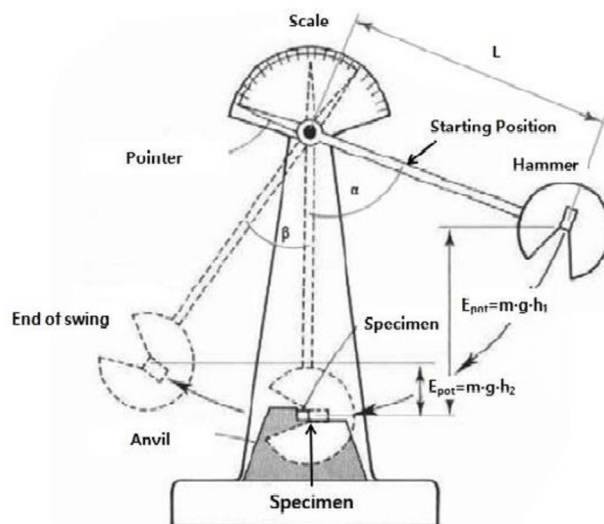
3.5.3 Houževnatost dřeva

Pro praktické uplatnění dřeva ve sportovním průmyslu je houževnatost dřeva základním požadavkem. Aby dřevo odolalo náhlému zatížení, musí být houževnaté. Houževnatost neboli rázová pevnost dřeva je odolnost proti nárazům a náhlým zatížením. (Kvietková, 2015; Desch, Dinwoodie, 1996)

3.5.3.1 Rázová houževnatost v ohybu

Rázovou houževnatostí rozumíme schopnost materiálu absorbovat práci vykonanou rázovým ohybem. Cílem takového namáhání je zjistit velikost spotřebované energie, která je nutná na přeražení tělesa definovaných rozměrů. (Gandelová et al., 1996)

Průběh přerážecí zkoušky je vyobrazen na obrázku 13. Práci spotřebovanou na přeražení tělesa vztahujeme na jednotku plochy a její hodnota se stanovuje vztahem, který je zmíněný v podkapitole 4.3.4.



Obrázek 13 – Průběh zkoušky pomocí Charpyho kladiva

(Woo, 2017)

3.5.4 Pružnost dřeva

Pružnost je schopnost materiálů, která mu umožňuje absorbovat energii v rámci pružných deformací a tuto energii následně využít pro přechod z deformovaného stavu do stavu původního (těleso získává původní tvar a rozměry), ve chvíli, kdy na těleso přestanou působit vnější mechanické síly. Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Většinou se určují experimentálně na zkušebních strojích, kde je současně měřena deformace a působící silové zatížení. (Borůvka, Babiak, 2016; Kvietková, 2015)

Moduly pružnosti se zjišťují v tlaku, tahu a ohybu. Moduly pružnosti v tahu a tlaku se stanovují ve směru vláken a kolmo na vlákna, přičemž hodnoty kolmo k vláknům jsou 10 až 20x nižší než hodnoty podél vláken. V ohybu se udává modul pružnosti pouze kolmo na vlákna, a prakticky se zkouší jen v tangenciálním směru. (Svoboda et al., 2018; Matovič, 1993)

Pro stanovení modulu pružnosti můžeme využít celé spektrum testovacích metod. Tyto metody mohou být rozdělené do dvou skupin, z nichž první obsahuje statické metody založené na aplikaci přímého napětí a měření výsledného přetvoření, přičemž druhá skupina zahrnuje dynamické metody založené na rezonanční vibraci ohybového nebo ultrazvukového buzení. (Dinwoodie, 2017)

3.5.4.1 Modul pružnosti při statickém ohybu

Nejběžnějším způsobem stanovení statického modulu pružnosti navzdory své citlivosti na rychlost zatížení je stanovením z křivek napětí – deformace. Odvození modulu pružnosti v ohybu vychází z normálového namáhání tělesa způsobeného ohybovým momentem. Statický modul pružnosti lze stanovit z třibodového nebo čtyřbodového ohybu. U třibodového ohybu dochází k tvorbě smykových napětí, zatímco čtyřbodový ohyb poskytuje skutečný modul ohybu bez smyku mezi dvěma zatěžovanými body. (Dinwoodie, 2017)

Statický modul pružnosti ve třibodovém ohybu lze stanovit dle vztahu, který je zmíněn v podkapitole 4.3.3.

3.5.4.2 Dynamický modul pružnosti

Principem metody je stanovení dynamického modulu pružnosti na základě změření rychlosti šíření zvukové (nejčastěji ultrazvukové) vlny ve dřevu. Dynamický modul pružnosti určený pomocí hustoty a rychlosti průchodu vlny bývá vyšší než statický modul pružnosti. (Pošta et al., 2017)

Korelační koeficienty pro závislost pevnosti v ohybu na modulu pružnosti se pohybují v rozmezí 0,75 – 0,88, to znamená, že díky modulu pružnosti můžeme dobře predikovat pevnost dřeva v ohybu. (Kuklík, Kuklíková, 2002)

Výpočet dynamického modulu pružnosti při zkoušení ultrazvukovou metodou je daný vztahem, který je zmíněn v podkapitole 4.3.2.

4 Metodika

4.1 Příprava vzorků

Reprezentativní vzorky (viz obr. 14) zkoumaných dřevin byly odebrány z lokality Kostelec nad Černými lesy. Průměry dřevin byly v rozmezí 30-35 cm. Ze zmíněných průměru je jasné, že se z větší části jednalo o juvenilní dřevo. Vzorky byly vyrobeny z dřeva topolu osiky, olše lepkavé, vrby jívy a břízy bělokoré. Z dřevin bylo vyhotoveno 373 vzorků. Ke stanovení zkoumaných vlastností byl připraven jeden typ zkušebních těles o rozměrech 20x20x300 mm. Po ukončení zkoušky rázové houževnatosti byly ze zkušebních těles odřezány konce o délce 30 mm, které sloužily pro zkoušku v tlaku a stanovení hustoty. Každému ze zkušebních těles byl přiřazen čtyřmístný kód, jehož první číslo označuje sekci pro okamžitou identifikaci dřeviny, následující číslo označuje horizontální pozici, další písmeno určuje, zdali je vzorek určen ke zkoušce v ohybu nebo rázové houževnatosti, poslední číslo označuje pořadí v lati.



Obrázek 14 - Vzorky

4.2 Klimatizování

Zkušební tělesa byla klimatizována v klimatizační komoře (viz obr. 15) při parametrech relativní vlhkosti vzduchu 65 % a teplotě 20 °C (do té doby, dokud zkušební tělesa nenabyla stavu vlhkostní rovnováhy), což by dle Čučlického diagramu mělo odpovídat 12% absolutní vlhkosti.



Obrázek 15 – Zkušební vzorky v klimatizační komoře

4.3 Měření

4.3.1 Hustota

Stanovení hustoty proběhlo dle normy ČSN 49 0108, kde hmotnost v gramech s přesností na 0,01 g byla stanovena na digitální váze. Pro stanovení rozměrů s přesností na 0,01 mm bylo použito digitální posuvné měřidlo. Přístrojové vybavení je vyobrazeno na obrázku 16. Rozměry a váhy všech vzorků byly stanoveny po naklimatizování na 12% absolutní vlhkost dřeva. Norma ČSN 49 0108 uvádí následující vztah pro výpočet hustoty při dané vlhkosti:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (4)$$

ρ_w – hustota dřeva při dané vlhkosti [$kg \cdot m^{-3}$]

m_w – hmotnost dřeva při určité vlhkosti [kg]

V_w – objem dřeva při určité vlhkosti [m^3]



Obrázek 16 – Digitální posuvné měřidlo a digitální váhy

4.3.2 Dynamický modul pružnosti

Pro stanovení dynamického modulu pružnosti bylo zapotřebí určit čas průchodu ultrazvukové vlny v podélném směru u zkušebních těles o rozměrech 20x20x300 mm. Pro změření průchodu ultrazvukové vlny bylo použito zařízení Fakopp Ultrasonic Timber (viz obr. 17), přičemž sondy byly přiloženy na čela zkušebních vzorků. User's Guide FAKOPP ULTRASONIC TIMER uvádí, že před určením konkrétní hodnoty dynamického modulu pružnosti je zapotřebí odečíst korekci, která odstraní čas potřebný pro průchod ultrazvukové vlny mezi sondami. Stanovená korekce byla rovna 1,9 μs . Požgaj et al. (1993) pro výpočet výsledné hodnoty dynamického modulu pružnosti uvádí následující vztah:

$$E = \rho \cdot c^2 \text{ [MPa]} \quad (5)$$

E – dynamický modul pružnosti [MPa]

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

c^2 – rychlost ultrazvukové vlny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]



Obrázek 17 – Fakopp Ultrasonic Timber

4.3.3 Pevnost v ohybu a statický modul pružnosti

Zkoušení probíhalo v souladu s normou ČSN EN 310. Pro stanovení pevnosti v třibodovém ohybu a statického modulu pružnosti bylo použito zkušební zařízení TIRA 2850 (viz obr. 18), které je vybaveno softwarem TIRA-test. Zkušební tělesa pro zkoušku v ohybu měly rozměry 20x20x300 mm, kdy vzdálenost mezi podpěrami zkušebního zařízení byla 240 mm. Zkušební tělesa byla do zařízení TIRA 2850 umístěna takovým způsobem, aby silové zatížení působilo v tangenciálním směru (radiální plocha). Při zkoušce byla rychlost zatěžování nastavena takovým způsobem, aby maximální možné zatížení nastalo za čas $t = 60 \pm 30$ s, což zhruba odpovídá $0,9 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Pro výpočet pevnosti v třibodovém ohybu byl v souladu s ČSN EN 310 použit následující vztah:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

σ – napětí [MPa]

F_{\max} – maximální možné zatížení [N]

l – vzdálenost mezi středy podpěr [mm]

b – šířka zkušebního tělesa [mm]

h – výška zkušebního tělesa [mm]

Pro výpočet statického modulu pružnosti uvádí norma ČSN EN 310 následující vztah:

$$E = \frac{l^3 \cdot (F_2 - F_1)}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot (a_2 - a_1)} \quad [MPa] \quad (7)$$

E – statický modul pružnosti [MPa]

l – vzdálenost mezi středy podpěr [mm]

F₁, F₂ – přírůstek zatížení v přímkové části zatěžovací křivky [N]

b – šířka zkušební tělesa [mm]

h – tloušťka zkušební tělesa [mm]

a₁, a₂ – přírůstek průhybu ve středu délky zkušební tělesa [mm]



Obrázek 18 – Zkušební zařízení TIRA 2850

4.3.4 Rázová houževnatost v ohybu

Pro stanovení hodnoty rázové houževnatosti v ohybu se vycházelo z normy ČSN 49 0117. Pro stanovení přerážecí práce bylo použito Charpyho kladivo (viz obr. 19). Zkušební tělesa o rozměrech 20x20x300 mm byla symetricky uložena na podpěrách, aby kyvadlový pohyb přerážecího kladiva

působil v tangenciálním směru (radiální plocha). Po ukončení zkoušky bylo ze stupnice určeno množství energie, které bylo zapotřebí k přeražení.

Pro výpočet rázové houževnatosti v ohybu uvádí ČSN 49 0117 následující vztah:

$$A_w = \frac{Q}{b \cdot h} \quad [\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (8)$$

A_w – rázová houževnatost [$\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$]

Q – práce vynaložená na přeražení zkušební tělesa [J]

b, h – příčné rozměry zkušební tělesa [cm]



Obrázek 19 – Charpyho kladivo

4.3.5 Pevnost v tlaku podél vláken

Vzorky pro stanovení pevnosti v tlaku podél vláken (viz obr. 20) byly vymanipulovány z odzkoušených vzorků po zkoušce rázové houževnatosti, byly odřezány konce těchto vzorků, tak jak je uvedeno na začátku kapitoly metodiky. Zkoušení probíhalo dle normy ČSN 490110. Pro zjištění maximálního zatížení pro porušení zkušebních těles v tlaku podél vláken bylo použito zkušební zařízení UTS 50 (viz obr. 21). Zkušební tělesa o rozměrech 20x20x30 mm byla vložena do zařízení UTS 50, takovým způsobem, aby výsledný tlak působil ve směru vláken. Při zkoušce byla rychlost zatěžování nastavena tak, aby maximální možné zatížení nastalo za čas $t = 60 \pm 30$ s, což zhruba odpovídá $0,8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Pro výpočet pevnosti v tlaku podél vláken uvádí ČSN 490110 následující vztah:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \quad [MPa] \quad (9)$$

F_{max} – hodnota maximálního zatížení [N]

a, b – příčné rozměry zkušební tělesa [mm]



Obrázek 20 – Zkušební tělesa pro zkoušku v tlaku podél vláken



Obrázek 21 – Zkušební zařízení UTS 50

4.3.6 Absolutní vlhkost

Postup vážení a sušení probíhal v souladu s normou ČSN 490103. Po ukončení tlakové zkoušky bylo z odzkoušených vzorků náhodně vybráno 10 vzorků od každé dřeviny, které byly následně zváženy s přesností na 0,01 g. Poté se vzorky nechaly sušit v sušárně při teplotě 103 ± 2 °C do té doby, dokud již nedocházelo k úbytku jejich hmotnosti. Vzorky byly poté ze sušárny jednotlivě odebírány a váženy, přičemž pro výpočet absolutní vlhkosti byl použit následující vztah:

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [%] \quad (10)$$

w_{abs} – absolutní vlhkost dřeva [%]

m_w – hmotnost vlhkého dřeva [g]

m_0 – hmotnost absolutně suchého dřeva [g]

Z vypočítaných absolutních vlhkostí byl následně aritmetickým průměrem stanovena hodnota, která reprezentuje každou dřevinu (viz tabulka 12).

4.3.7 Statistické zpracování dat

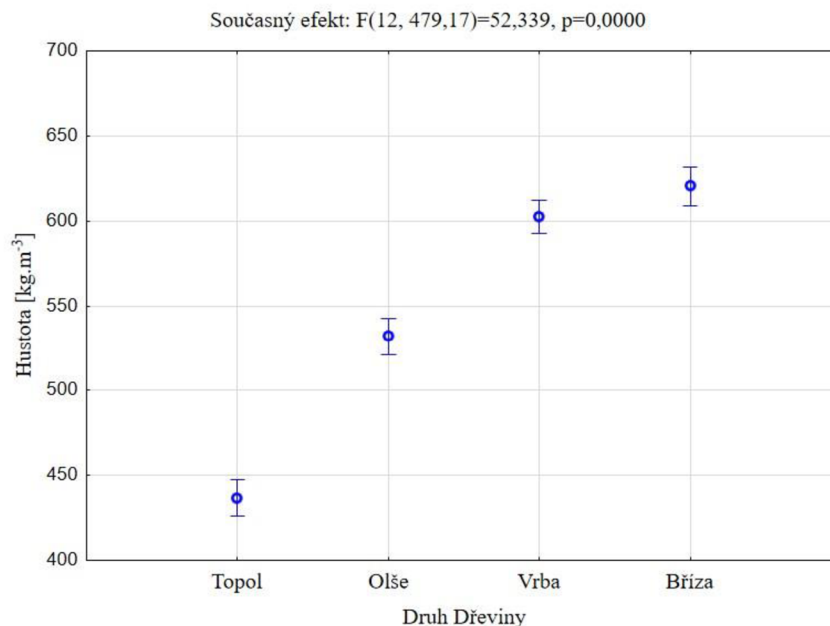
Pro zaznamenání naměřených dat a následný výpočet zkoumaných vlastností byl použit program Microsoft Excel. Pro zpracování zaznamenaných dat byl použit program TIBCO Statistica ve kterém byla vytvořena základní popisná statistika zkoumaných vlastností pro jednotlivé dřeviny. V programu TIBCO Statistica byly také vytvořeny korelace mezi zkoumanými vlastnostmi. K posouzení vlivu dřeviny a horizontální pozice byla použita jedno a dvou – faktorová analýza rozptylu (ANOVA). Pro zjištění, zdali mezi zkoumanými dřevinami a jejich vlastnostmi existuje statisticky významný rozdíl, byl použit Duncanův test.

5 Výsledky a diskuze

5.1 Hustota

Při praktické části byly stanoveny hustoty pro vzorky o délce 30 cm, které byly podle kódu rozděleny na zkoušku v ohybu a rázové houževnatosti. Poté byla stanovena hustota pro vzorky určené k tlakové zkoušce. Tyto tři hustoty byly v rámci jedné dřeviny mezi sebou porovnány, aby se zjistilo, zdali mezi nimi existuje znatelný rozdíl. Z přílohy 1 vyplývá, že pro dřevo vrby se výše zmíněné hustoty od sebe statisticky významně neliší, tento fakt tedy můžeme zobecnit pro všechny zkoumané dřeviny.

Z grafu 6 vyplývá, že existuje statistický významný rozdíl u hustoty mezi všemi zkoumanými dřevinami, tento rozdíl byl potvrzen Duncanovým testem (viz příloha 2). Trend hustoty v rámci horizontální pozice pro jednotlivé dřeviny je znázorněn v příloze 8, kde se ukazuje, že pro všechny dřeviny kromě vrby je trend rostoucí, zatímco u vrby se jeví konstantní. Pokles hustoty u dřeva olše v poslední pozici se dá vysvětlit tím, že ze čtvrté sekce bylo odebrán menší počet vzorků.



Graf 6 – Rozdíl hustoty v rámci jednotlivých dřevin

Tabulka 1 uvádí základní popisnou statistiku pro hustotu u zkoumaných dřevin. Nejvyšší průměrná hodnota byla zjištěna u dřeva břízy a to 621 kg.m^{-3} , přičemž nejnižší hodnota byla zjištěna u dřeva topolu a to 437 kg.m^{-3} . Nejvyšší variační koeficient byl zaznamenán u dřeva břízy, a to ve výši 9,9 %.

Tabulka 1 – Základní popisná statistika pro hustotu v kg.m^{-3}

Dřevina	Počet měření	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient (%)
Topol	47	437	381	516	23	5,3
Olše	46	532	467	581	23	4,3
Vrba	55	602	510	656	31	5,1
Bříza	40	621	529	722	62	9,9

Stanovené hodnoty hustoty pro dřevo topolu, olše a břízy se shodují s hustotami uvedenými v literatuře (viz tabulka 2). Hodnoty stanovené pro dřevo vrby jsou oproti hodnotám v literatuře značně vyšší, což je značně zavádějící, protože se z větší části jednalo o juvenilní dřevo. Tento rozdíl může být vysvětlen vlivem stanoviště a pěstebních postupů. Wieruszewski, Mydlarz (2021) ve své práci prokázali, že typ stanoviště má statisticky významný vliv na hustotu borového dřeva.

Tabulka 2 - Hodnoty hustoty z dostupné literatury

Autor	Druh dřeviny	Hustota [kg.m^{-3}]
Wagenführ, 2000	Topol	400
Martiník, Souček, 2022	Olše	540
Zeidler, Borůvka, 2016	Vrba	479
Borůvka et al., 2018	Bříza	639

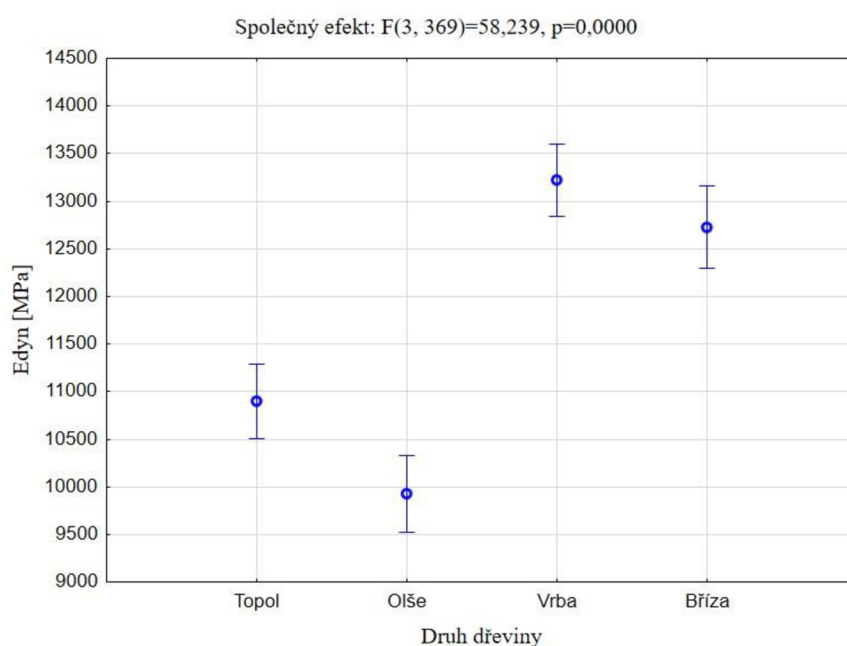
5.2 Dynamický modul pružnosti

Z grafu 7 vyplývá, že mezi zkoumanými dřevinami, kromě břízy a vrby existuje statistický významný rozdíl v dynamickém modulu pružnosti, tento rozdíl byl potvrzen Duncanovým testem (viz příloha 3). Trend dynamického modulu pružnosti v rámci horizontální pozice pro jednotlivé dřeviny je znázorněn v příloze 9, kde se ukazuje, že trend je standardní, tedy s rostoucí horizontální pozicí roste zároveň i hustota která je přímo úměrná dynamickému modulu pružnosti (viz příloha 8). V poslední pozici je trend pro dřevo břízy a olše nejednoznačný, což může být způsobeno nízkým počtem vzorků odebraných z poslední pozice. Pokles v dynamickém modulu pružnosti může být také vysvětlen výskytem lokálních vad (suky), které mohou ovlivňovat rychlost

průchodu ultrazvukové vlny, která je přímo úměrná dynamickému modulu pružnosti. Zmíněné vady byly v rámci pevnostních zkoušek a zkoušky rázové houževnatosti akceptovatelné.

Pro určení, zdali je dynamický modul pružnosti vhodný pro predikci pevnostních vlastností, byla provedena závislost pevnosti v ohybu na dynamickém modulu pružnosti pro dřevo vrby (viz příloha 19). Závislost byla potvrzena korelačním koeficientem ve výši 0,8080.

Závislost dynamického modulu pružnosti na hustotě je uvedena v příloze 14, kde vyšel uspokojivý korelační koeficient ve výši 0,7506.



Graf 7 – Rozdíl dynamického modulu pružnosti v rámci jednotlivých dřevin

Tabulka 3 uvádí základní popisnou statistiku pro dynamický modul pružnosti u zkoumaných dřevin. Nejvyšší průměrná hodnota byla zjištěna u dřeva vrby a to 13223 MPa, přičemž nejnižší hodnota byla zjištěna u dřeva olše a to 9924 MPa. Nejvyšší variační koeficient byl zaznamenán u dřeva olše, a to ve výši 19,4 %.

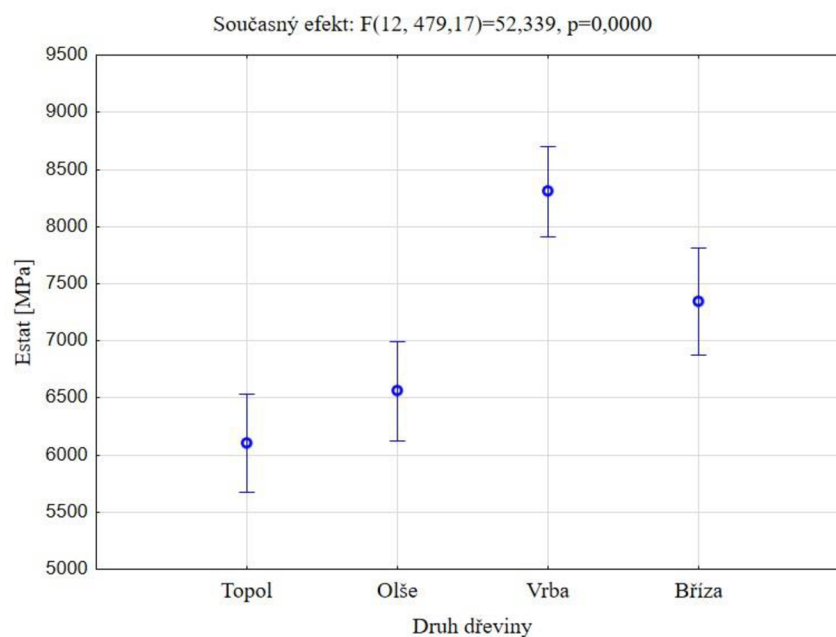
Tabulka 3 – Základní popisná statistika pro dynamický modul pružnosti v MPa

Dřevina	Počet měření	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient (%)
Topol	97	10899	8190	13053	1073	9,8
Olše	91	9924	4617	13652	1927	19,4
Vrba	105	13223	7061	18295	2283	17,3
Bříza	80	12728	7704	17124	2369	18,6

5.3 Statický modul pružnosti

Z grafu 8 vyplývá, že mezi zkoumanými dřevinami, kromě topolu a olše, existuje statistický významný rozdíl ve statickém modulu pružnosti, tento rozdíl byl potvrzen Duncanovým testem (viz příloha 4). Trend statického modulu pružnosti v rámci horizontální pozice pro jednotlivé dřeviny je znázorněn v příloze 10, kde se ukazuje, že je trend standardní, tedy s rostoucí horizontální pozicí roste zároveň i hustota, s kterou zároveň rostou mechanické vlastnosti dřeva.

Pro určení, zdali se statický modul pružnosti dá predikovat pomocí dynamického modulu pružnosti, byla vytvořena závislost statického modulu pružnosti na dynamickém pro dřevo břízy (viz příloha 18). Závislost byla potvrzena korelačním koeficientem ve výši 0,9077.



Graf 8 – Rozdíl statického modulu pružnosti v rámci jednotlivých dřevin

Tabulka 4 uvádí základní popisnou statistiku pro statický modul pružnosti u zkoumaných dřevin. Nejvyšší průměrná hodnota byla zjištěna u dřeva vrby a to 8306 MPa, nejnižší hodnota byla zjištěna u dřeva topolu a to 6102 MPa. Nejvyšší variační koeficient byl zaznamenán u dřeva břízy, a to ve výši 25,3 %.

Tabulka 4 – Základní popisná statistika pro statický modul pružnosti v MPa

Dřevina	Počet měření	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient (%)
Topol	47	6102	2112	7644	1145	18,8
Olše	46	6560	3176	9022	1266	19,3
Vrba	55	8306	3895	11495	1644	19,8
Bříza	40	7344	4179	11329	1856	25,3

Stanovené hodnoty statického modulu pružnosti pro dřevo olše a břízy se s přihlédnutím ke směrodatným odchylkám shodují s hodnotami uvedenými v literatuře (viz tabulka 5). Hodnoty stanovené pro dřevo topolu jsou značně menší než v uvedené literatuře, naopak hodnoty stanovené pro dřevo vrby jsou značně vyšší než v uvedené literatuře.

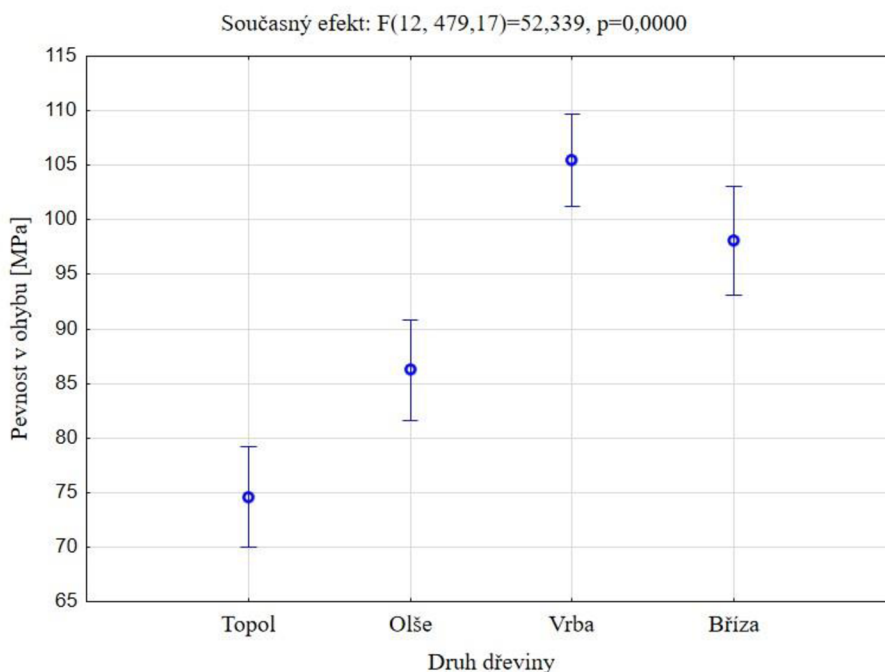
Tabulka 5 – Hodnoty statického modulu pružnosti z dostupné literatury

Autor	Druh dřeviny	Estat [MPa]
Jeffery et al., 2004	Topol	9900
Milch et al., 2016	Olše	7400
Zeidler, Borůvka, 2016	Vrba	6400
Borůvka et al., 2018	Bříza	6829

5.4 Pevnost v ohybu

Z grafu 9 vyplývá, že mezi všemi zkoumanými dřevinami existuje statistický významný rozdíl v pevnosti v ohybu, rozdíl byl potvrzen Duncanovým testem (viz příloha 5). Trend pevnosti v ohybu v rámci horizontální pozice pro jednotlivé dřeviny je znázorněn v příloze 11, kde se ukazuje, že trend je standardní, tedy s rostoucí horizontální pozicí roste zároveň i hustota, se kterou zároveň rostou mechanické vlastnosti dřeva. Trend u dřeva vrby je v poslední pozici nejednoznačný, což může být způsobeno nízkým počtem vzorků

odebraných z třetí horizontální pozice (20 vzorků odebráno z první pozice, 23 vzorků odebráno z druhé pozice a 12 vzorků odebráno z třetí pozice). Závislost pevnosti v ohybu na hustotě pro dřevo břízy (viz příloha 15) byla potvrzena korelačním koeficientem ve výši 0,7321.



Graf 9 – Rozdíl pevnosti v ohybu v rámci jednotlivých dřevin

Tabulka 6 uvádí základní popisnou statistiku pro pevnost v ohybu u zkoumaných dřevin. Nejvyšší průměrná hodnota byla zjištěna u dřeva vrby a to 106 MPa, nejnižší hodnota byla zjištěna u dřeva topolu a to 75 MPa. Nejvyšší variační koeficient byl zaznamenán u dřeva břízy, a to ve výši 19,3 %.

Tabulka 6 – Základní popisná statistika pro pevnost v ohybu v MPa

Dřevina	Počet měření	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient (%)
Topol	47	75	23	87	10	13,1
Olše	46	86	48	106	13	15,4
Vrba	55	106	30	137	20	18,7
Bříza	40	98	69	139	19	19,3

Stanovené hodnoty pevnosti v ohybu pro dřevo topolu, olše a břízy, se s přihlédnutím ke směrodatným odchylkám shodují s hodnotami uvedenými v literatuře (viz tabulka 7). Hodnoty stanovené pro dřevo vrby jsou značně vyšší

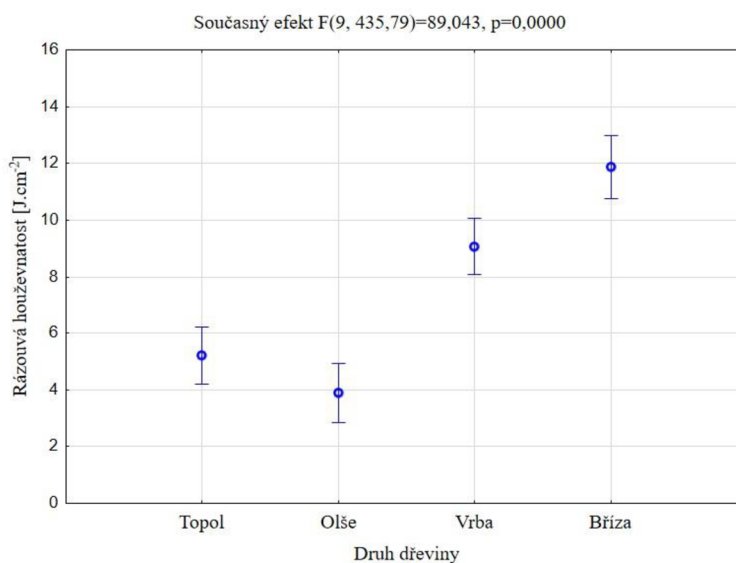
než v uvedené literatuře. Tento rozdíl může být způsoben tím, že hodnota hustoty, kterou udává Zeidler a Borůvka (2016) pro vrbové dřevo, je o 123 kg.m^{-3} menší než mnou stanovená hustota.

Tabulka 7 – Hodnoty pevnosti v ohybu z dostupné literatury

Autor	Druh dřeviny	Pevnost v ohybu [MPa]
Kettunen, 2008	Topol	85
Borůvka et al., 2015	Olše	78
Zeidler, Borůvka, 2016	Vrba	47
Jeffery et al., 2004	Bříza	117

5.5 Rázová houževnatost v ohybu

Z grafu 10 vyplývá, že mezi zkoumanými dřevinami, kromě topolu a olše, existuje statistický významný rozdíl v pevnosti v ohybu, rozdíl byl potvrzen Duncanovým testem (viz příloha 6). Trend rázové houževnatosti v ohybu v rámci horizontální pozice pro jednotlivé dřeviny je znázorněn v příloze 12, kde se ukazuje, že je trend standardní, tedy s rostoucí horizontální pozicí roste zároveň i hustota, se kterou zároveň rostou mechanické vlastnosti dřeva. Trend u dřeva břízy a olše je v poslední pozici nejednoznačný, což může být způsobeno nízkým počtem vzorků odebraných z poslední horizontální pozice (8 vzorků bříza a 9 vzorků olše). Závislost rázové houževnatosti na hustotě pro dřevo břízy (viz příloha 16) byla potvrzena korelačním koeficientem ve výši 0,8387.



Graf 10 – Rozdíl rázové houževnatosti v rámci jednotlivých dřevin

Tabulka 8 uvádí základní popisnou statistiku pro rázovou houževnatost u zkoumaných dřevin. Nejvyšší průměrná hodnota byla zjištěna u dřeva břízy a to 11,9 J.cm⁻² a nejnižší hodnota byla zjištěna u dřeva olše a to 3,9 J.cm⁻². Nejvyšší variační koeficient byl zaznamenán u dřeva vrby, a to ve výši 56 %.

Tabulka 8 – Základní popisná statistika pro rázovou houževnatost v J.cm⁻²

Dřevina	Počet měření	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient (%)
Topol	50	5,2	1,7	9,4	2,0	39,0
Olše	45	3,9	0,6	6,8	1,5	38,9
Vrba	50	9,1	1,7	20,6	5,1	56,0
Bříza	40	11,9	6,0	19,7	4,3	36,2

Stanovené hodnoty rázové houževnatosti pro dřevo topolu, olše a břízy se shodují s hodnotami uvedenými v literatuře (viz tabulka 9). Hodnoty stanovené pro dřevo vrby jsou značně vyšší než v uvedené literatuře. Tento rozdíl lze vysvětlit tím, že mnou stanovená hustota byla o 123 kg.m⁻³ než hustota uvedená v literatuře.

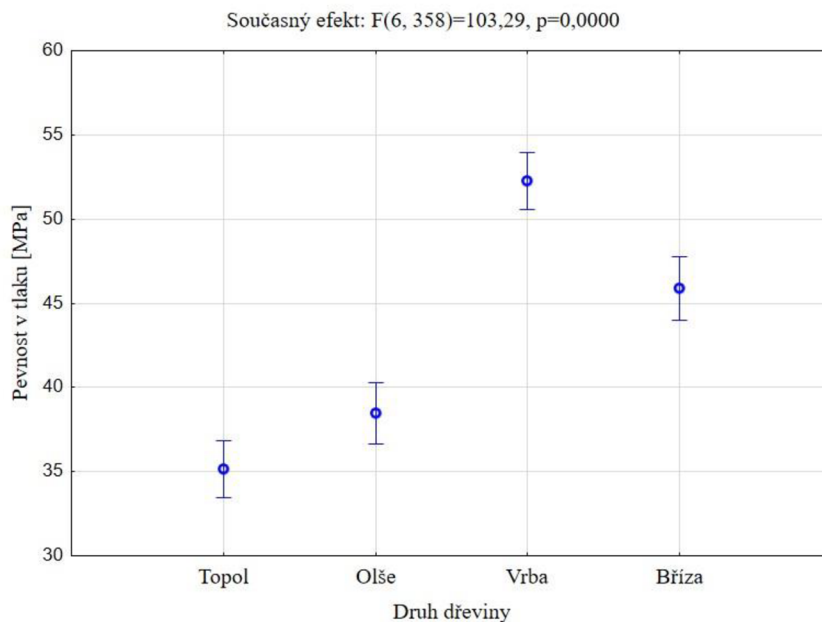
Tabulka 9 – Hodnoty rázové houževnatosti z dostupné literatury

Autor	Druh dřeviny	Rázová houževnatost [J.cm ⁻²]
Gaff et al., 2016	Topol	4,6
Wagenführ, 2000	Olše	4,2
Zeidler, Borůvka, 2016	Vrba	3,4
Borůvka et al., 2020	Bříza	10,0

5.6 Pevnost v tlaku podél vláken

Z grafu 11 vyplývá, že mezi všemi zkoumanými dřevinami existuje statistický významný rozdíl v pevnosti v tlaku, tento rozdíl byl potvrzen Duncanovým testem (viz příloha 7). Trend pevnosti v tlaku v rámci horizontální pozice pro jednotlivé dřeviny je znázorněn v příloze 13. Ukazuje se, že trend je standardní, tedy s rostoucí horizontální pozicí roste zároveň i hustota, se kterou zároveň rostou mechanické vlastnosti dřeva. Trend u dřeva vrby je v poslední

pozici konstantní, resp. prokazuje se statisticky nevýznamný rozdíl po průřezu kmenem. Závislost pevnosti v tlaku na hustotě pro dřevo topolu (viz příloha 17) byla potvrzena korelačním koeficientem ve výši 0,9441.



Graf 11 – Rozdíl pevnosti v tlaku v rámci jednotlivých dřevin

Tabulka 10 uvádí základní popisnou statistiku pro pevnost v tlaku u zkoumaných dřevin. Nejvyšší průměrná hodnota byla zjištěna u dřeva vrby a to 52,3 MPa, nejnižší hodnota byla zjištěna u dřeva topolu a to 34,4 MPa. Nejvyšší variační koeficient byl zaznamenán u dřeva vrby, a to ve výši 17,2 %.

Tabulka 10 – Základní popisná statistika pro pevnost v tlaku podél vláken v MPa

Dřevina	Počet měření	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient (%)
Topol	50	34,4	30,0	42,3	5,8	16,8
Olše	45	38,5	28,8	45,4	4,9	12,7
Vrba	50	52,3	31,1	65,4	9,0	17,2
Bříza	40	45,9	31,3	57,4	5,8	12,6

Stanovené hodnoty pevnosti v tlaku pro dřevo topolu, olše a břízy se shodují s hodnotami uvedenými v literatuře (viz tabulka 11). Hodnoty stanovené pro dřevo vrby jsou značně vyšší než v uvedené literatuře. Tento rozdíl může být způsoben tím, že hodnota hustoty, kterou udává Zeidler a Borůvka (2016) pro

vrbové dřevo je o 123 kg.m^{-3} menší než mnou stanovená hustota, přičemž Požgaj et al., (1993) udává, že navýšení hustoty o 100 kg.m^{-3} způsobí zvětšení modulu pružnosti podél vláken o 1,9 – 4,4 %.

Tabulka 11 – Hodnoty pevnosti v tlaku z dostupné literatury

Autor	Druh dřeviny	Pevnost v tlaku [MPa]
Jeffery et al., 2004	Topol	36,5
Milch et al., 2016	Olše	40,7
Zeidler, Borůvka, 2016	Vrba	29,0
Wagenführ, 2000	Bříza	48,0

5.7 Absolutní vlhkost

Tabulka 12 uvádí základní popisnou statistiku pro absolutní vlhkost u zkoumaných dřevin. Průměrné hodnoty absolutní vlhkosti odpovídají parametrům (relativní vlhkost vzduchu 65 % a teplota 20 °C), které byly zvoleny pro klimatizování vzorků.

Tabulka 12 – Základní popisná statistika pro absolutní vlhkost v %

Dřevina	Počet měření	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient (%)
Topol	10	11,5	9,9	12,9	0,7	6,1
Olše	10	12,0	11,8	12,4	0,2	1,7
Vrba	10	11,5	10,8	11,9	0,4	3,5
Bříza	10	11,3	10,4	11,9	0,4	3,5

6 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo porovnat pevnost v tlaku, pevnost v ohybu a rázovou houževnatost pro dřeva topolu osiky (*Populus tremula* L.), olše lepkavé (*Alnus glutinosa* Gaertn.) a vrby jívy (*Salix caprea* L.) ze stejného stanoviště Kostelec nad Černými lesy. Do práce bylo zahrnuto i dřevo břízy bělokoré (*Betula pendula* Roth). Touto prací se potvrdilo, že mezi dřevinami existuje statisticky významný rozdíl v jejich hustotě a mechanických vlastnostech, rozdíl byl potvrzen Duncanovým testem na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Statisticky nevýznamný rozdíl se prokázal pouze při rázové houževnatosti v ohybu u dřeva topolu a olše, kde se variační koeficient pohyboval v rozmezí 36,2 – 56,0 %. Z důvodu vysokých hodnot variability pro zkoušku rázové houževnatosti v ohybu by bylo vhodné navýšit počet měření pro přesnější validaci výsledků.

V rámci této práce byly také stanoveny pružnostní charakteristiky (tj. statický a dynamický modul pružnosti) pro zkoumané dřeviny, přičemž stanovené hodnoty pro dynamický modul pružnosti byly znatelně vyšší než hodnoty u statického modulu pružnosti. V rámci vyhodnocování dat byl v analýze rozptylu kromě faktoru dřeviny zahrnut i faktor horizontální pozice. Výsledné grafy potvrdily standardní trend pro zkoumané vlastnosti, kde s rostoucí horizontální pozicí (směrem od dřeně ke kůře) dochází k nárůstu hustoty, a s tím i k nárůstu mechanických vlastností dřeva, které jsou velice úzce spojeny s hustotou.

Pro dané stanoviště se ukázalo, že pro dřevo vrby byla hustota v porovnání s literaturou znatelně vyšší. Získané výsledky by bylo třeba potvrdit výzkumem v jiné lokalitě s jinými podmínkami pro růst.

7 Seznam použité literatury

Tištěná monografie

BALABÁN, K., 1955. *Nauka o dřevě*. 1. vyd. Praha: SZN. Lesnická knihovna. Velká řada.

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

DESCH, H. E. a J. M. DINWOODIE, 1996. *Timber: structure, properties, conversion, and use*. 7th ed. New York: Food Products Press. ISBN 978-1560228615.

GANDELOVÁ, L., P. HORÁČEK a J. ŠLEZINGEROVÁ, 1996. *Nauka o dřevě*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-715-7194-6.

HILL, C. A. S., 2006. *Wood modification: chemical, thermal and other processes*. Chichester: John Wiley. ISBN 978-0-470-02172-9.

HOADLEY, B., 2000. *Understanding Wood: A Craftsman's Guide to Wood Technology*. The Taunton Press. ISBN 1-56158-358-8.

HORÁČEK, P., 1998. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-715-7347-7.

HORÁČEK, P., 2019. *Encyklopedie listnatých stromů a keřů*. 2. vydání. V Brně: CPress. 2. vydání. ISBN 978-80-264-2462-8.

JEFFERY, B., J. EVANS a J. YOUNGQUIST, 2004. *Encyclopedia of Forest Sciences*. Academic Press. ISBN 978-0-12-145160-8.

KETTUNEN, P., 2008. *Advances In Materials Science Of Wood*. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. ISBN 978-3-03813-260-8.

MATOVIČ, A., 1993. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva: Určeno pro posl. les. fak. obor dřevař a les.* Brno: Vysoká škola zemědělská. ISBN 80-715-7086-9.

MUSIL, I. a J. MÖLLEROVÁ, 2005. *Lesnická dendrologie.* Praha: Česká zemědělská univerzita. ISBN 80-213-1367-6.

POŽGAJ, A., D. CHOVANEC, S. KURJATKO a M. BABIAK, 1993. *Štruktúra a vlastnosti dreva.* Druhé vydání. Bratislava: Príroda. ISBN 80-07-00960-4.

SARVAŠOVÁ KVIETKOVÁ, M., 2015. *Obrábění dřeva.* V Praze: Česká zemědělská univerzita, Fakulta lesnická a dřevařská. ISBN 978-80-213-2604-0.

SHMULSKY, R. a D. JONES, 2011. *Forest Products and Wood Science: An Introduction.* 6th Edition. Chichester: Wiley-Blackwell. ISBN 978-0-813-82074-3.

SILVESTER, F., 1967. *Timber: Its Mechanical Properties and Factors Affecting its Structural Use* [online]. England: Pergamon [cit. 2022-09-05]. ISBN 978-1483118727.

WAGENFÜHR, R., 2000. *Holzatlas.* Leipzig: Fachbuchverlag. ISBN 9783446213906.

WOO, S., 2017. *Reliability Design of Mechanical Systems: A Guide for Mechanical and Civil Engineers.* 1st ed. 2017. Imprint: Springer,. ISBN 978-3-319-50829-0.

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

Elektronické zdroje

Alnus glutinosa Gaertn. In: *FLD - Fakulta lesnická a dřevařská ČZU v Praze* [online]. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: https://r.fld.czu.cz/vyzkum/multimedia/timber_atlas/nextpages/hardwoods.html

ARNOLD, M., 2010. Effect of moisture on the bending properties of thermally modified beech and spruce. *Journal of Materials Science* [online]. **45**(3), 669-680 [cit. 2023-03-20]. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-009-3984-8

BECK, P., G. CAUDULLO, D. DE RIGO a W. TINNER, 2016. Betula pendula, Betula pubescens and other birches in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: *European Atlas of Forest Tree Species* [online]. Belgium: European Commission [cit. 2022-11-12]. ISBN 978-92-76-17290-1. Dostupné z: https://ies-ows.jrc.ec.europa.eu/efdac/download/Atlas/pdf/Betula_spp.pdf

BORŮVKA, V., A. ZEIDLER a T. HOLEČEK, 2015. Comparison of Stiffness and Strength Properties of Untreated and Heat-Treated Wood of Douglas Fir and Alder. *BioResources* [online]. **10**(4), 8281-8294 [cit. 2023-04-02]. ISSN 1930-2126. Dostupné z: [doi:10.15376/biores.10.4.8281-8294](https://doi.org/10.15376/biores.10.4.8281-8294)

BORŮVKA, V., A. ZEIDLER, T. HOLEČEK a R. DUDÍK, 2018. Elastic and Strength Properties of Heat-Treated Beech and Birch Wood. *Forests* [online]. **9**(4) [cit. 2023-04-02]. ISSN 1999-4907. Dostupné z: [doi:10.3390/f9040197](https://doi.org/10.3390/f9040197)

BORŮVKA, V., D. NOVÁK a P. ŠEDIVKA, 2020. Comparison and Analysis of Radial and Tangential Bending of Softwood and Hardwood at Static and Dynamic Loading. *Forests* [online]. **11**(8) [cit. 2023-04-02]. ISSN 1999-4907. Dostupné z: [doi:10.3390/f11080896](https://doi.org/10.3390/f11080896)

Bříza bělokorá. In: *Lesnická a dřevařská fakulta - Lesnická a dřevařská fakulta* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevina=br

Betula pendula Roth. In: *WSL Startseite - WSL* [online]. [cit. 2023-04-01].
Dostupné z: <https://www.wsl.ch/land/products/dendro/species.php?code=BEPE>

DE MOURA, M. F. S. F. a N. DOURADO, 2018. *Wood Fracture Characterization*. Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-0-8153-6471-9.

DE RIGO, D., G. CAUDULLO a J. SAN MIGUEL-AYANZ, 2016. Populus tremula in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: *European Atlas of Forest Tree Species* [online]. Belgium: European Commission [cit. 2022-11-05]. ISBN 978-92-76-17290-1. Dostupné z: https://ies-ows.jrc.ec.europa.eu/efdac/download/Atlas/pdf/Populus_tremula.pdf

DINWOODIE, J., 2017. *Timber Its nature and behaviour* [online]. 2nd Edition. London: Taylor & Francis, Inc. [cit. 2022-09-04]. ISBN 978-1-135-80810-5. Dostupné z: <https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=5893880>

ENESCU, C. M., T. HOUSTON DURRANT, D. DE RIGO a G. CAUDULLO, 2016. Salix caprea in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: *European Atlas of Forest Tree Species* [online]. Belgium: European Commission [cit. 2022-11-09]. ISBN 978-92-76-17290-1. Dostupné z: https://ies-ows.jrc.ec.europa.eu/efdac/download/Atlas/pdf/Salix_caprea.pdf

GAFF, M., D. RUMAN, V. ZÁBORSKÝ a V. BORŮVKA, 2016. Impact Bending Strength as a Function of Selected Factors. *BioResources* [online]. **11**(4), 9880-9895 [cit. 2023-04-02]. ISSN 1930-2126. Dostupné z: [doi:10.15376/biores.11.4.9880-9895](https://doi.org/10.15376/biores.11.4.9880-9895)

HOUSTON D., T., D. DE RIGO a G. CAUDULLO, 2016. Alnus glutinosa in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: *European Atlas of Forest Tree Species* [online]. Belgium: European Commission [cit. 2022-11-06]. ISBN 978-92-76-17290-1. Dostupné z: https://ies-ows.jrc.ec.europa.eu/efdac/download/Atlas/pdf/Alnus_glutinosa.pdf

KUKLÍK, P. a A. KUKLÍKOVÁ, 2002. ZJIŠŤOVÁNÍ VLASTNOSTÍ DŘEVA DYNAMICKÝMI METODAMI. *Lesnická práce* [online]. **81**(5/02) [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.lesprace.cz/casopis-lesnicka-prace-archiv/rocnik-81-2002/lesnicka-prace-c-5-02/zjistovani-vlastnosti-dreva-dynamickymi-metodami>

MARTINÍK, A. a J. SOUČEK, 2022. Vliv stanoviště na růst a produkci vybraných druhů pionýrských dřevin – review. *Zprávy lesnického výzkumu* [online]. **67**(3), 155-163 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.vulhm.cz/files/uploads/2022/10/669b.pdf>

MILCH, J., H. VAVRČÍK, J. TIPPNER a M. BRABEC, 2016. The effect of growth conditions in specific areas of Croatia and the Czech Republic on the physical and mechanical properties of black alder wood (*Alnus glutinosa* Gaertn.). *TURKISH JOURNAL OF AGRICULTURE AND FORESTRY* [online]. **40**, 7-12 [cit. 2023-04-02]. ISSN 1300011X. Dostupné z: [doi:10.3906/tar-1407-40](https://doi.org/10.3906/tar-1407-40)

Olše lepkavá. In: *Lesnická a dřevařská fakulta - Lesnická a dřevařská fakulta* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevina=ol

Populus tremula L. In: *WSL Startseite - WSL* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.wsl.ch/land/products/dendro/species.php?code=PPTR>

POŠTA, J., R. JÁRA, H. HASNÍKOVÁ, A. KUKLÍKOVÁ a P. KUKLÍK, 2017. *Metody pro nedestruktivní hodnocení dřeva a jejich přesnost* [online]. [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/15337-metody-pro-nedestruktivni-hodnoceni-dreva-a-jejich-presnost#:~:text=Principem%20metody%20je%20stanoven%C3%AD%20dynami>

[ck%C3%A9ho%20modulu%20pru%C5%BEnosti%20na.modul%20pru%C5%BEnosti%20z%20rovnice%20Edyn%20%3D%20%CF%81.v2%20%281%29](#)

Salix caprea L. In: *WSL Startseite - WSL* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.wsl.ch/land/products/dendro/species.php?code=SACA>

SELIM, M., 2006. *Evaluation of moisture content in wood fiber and recommendation of the best method for its determination*. DOI: 10.13140/RG.2.1.4795.4648. Disertační práce. HELWAN UNIVERSITY.

STOKKE, D., Q. WU a G. HAN, 2013. *Introduction to Wood and Natural Fiber Composites* [online]. United Kingdom: Wiley [cit. 2022-09-04]. ISBN 978-1-118-67607-3. Dostupné z: <https://www.perlego.com/book/997809/introduction-to-wood-and-natural-fiber-composites-pdf>

SVOBODA, L., Z. BAŽANTOVÁ, M. MYŠKA, J. NOVÁK, Z. TOBOLKA, R. VÁVRA, A. VIMMROVÁ a J. VÝBORNÝ, 2018. *Stavební hmoty* [online]. 4. vydání. Praha: Luboš Svoboda [cit. 2022-09-04]. Dostupné z: <https://k123.fsv.cvut.cz/media/subjects/files/123SH01/kniha-stavebni-hmoty.pdf>

Topol osika. In: *Lesnická a dřevařská fakulta - Lesnická a dřevařská fakulta* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/makro/index.html?drevina=os

User's Guide FAKOPP ULTRASONIC TIMER. Dostupné také z: <https://fakopp.com/docs/products/ultrasonic/UltrasonicGuide.pdf>

VAKKARI, P., 2009. *Betula pendula - Technical guidelines for genetic conservation and use for silver birch* [online]. Rome: Bioersity International [cit. 2022-11-12]. ISBN 978-92-9043-803-8. Dostupné z: https://www.euforgen.org/fileadmin//templates/euforgen.org/upload/Publications/Technical_guidelines/Technical_guidelines_Betula_pendula.pdf

VON WÜHLISCH, G., 2009. *Populus tremula - Technical guidelines for genetic conservation and use for Eurasian aspen* [online]. Rome: Bioversity International [cit. 2022-11-12]. ISBN 978-92-9043-802-1. Dostupné z: https://www.euforgen.org/fileadmin//templates/euforgen.org/upload/Publications/Technical_guidelines/Technical_guidelines_Populus_tremula.pdf

Vrba jíva. In: *FLD - Fakulta lesnická a dřevařská ČZU v Praze* [online]. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: https://r.fld.czu.cz/vyzkum/multimedia/timber_atlas/nextpages/hardwoods.html#

WANG, Song-Yung a Hon-Lin WANG, 1999. Effects of moisture content and specific gravity on static bending properties and hardness of six wood species. *Journal of Wood Science* [online]. **45**(2), 127-133 [cit. 2023-03-20]. ISSN 1435-0211. Dostupné z: doi:10.1007/BF01192329

WIERUSZEWSKI, M. a K. MYDLARZ, 2021. The Influence of Habitat Conditions on the Properties of Pinewood. *Forests* [online]. **12**(10) [cit. 2023-04-05]. ISSN 1999-4907. Dostupné z: [doi:10.3390/f12101311](https://doi.org/10.3390/f12101311)

Normy

ČSN 49 0108, 1993. *Drevo. Zisťovanie hustoty*. ÚNM.

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

ČSN 49 0117, 1979. *Drevo. Rázová húževnatosť v ohybe*. ÚNM.

ČSN 49 0103, 1979. *Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach*. ÚNM.

ČSN 49 0110, 1979. *Drevo. Medza pevnosti v tlaku v smere vlákien*.

8 Seznam obrázků, grafů, tabulek a příloh

- Obrázek 1 – Makroskopická stavba dřeva topolu osiky
Obrázek 2 – Mikroskopická stavba dřeva topolu osiky
Obrázek 3 – Makroskopická stavba dřeva olše lepkavé
Obrázek 4 – Mikroskopická stavba dřeva olše lepkavé
Obrázek 5 – Makroskopická stavba dřeva vrby jívy
Obrázek 6 – Mikroskopická stavba dřeva vrby jívy
Obrázek 7 – Makroskopická stavba dřeva břízy bělokoré
Obrázek 8 – Mikroskopická stavba dřeva břízy bělokoré
Obrázek 9 – Struktura buněčné stěny
Obrázek 10 – Voda volná a vázaná
Obrázek 11 – Hlavní směry ortotropie dřeva
Obrázek 12 – Průběh jednotlivých napětí při zatížení v ohybu
Obrázek 13 – Průběh zkoušky pomocí Charpyho kladiva
Obrázek 14 – Vzorky
Obrázek 15 – Zkušební vzorky v klimatizační komoře
Obrázek 16 – Digitální posuvné měřidlo a digitální váhy
Obrázek 17 – Fakopp Ultrasonic Timber
Obrázek 18 – Zkušební zařízení TIRA 2850
Obrázek 19 – Charpyho kladivo
Obrázek 20 – Zkušební tělesa pro zkoušku v tlaku podél vláken
Obrázek 21 – Zkušební zařízení UTS 50
Graf 1 – Procentuální zastoupení jednotlivých složek v buněčné stěně
Graf 2 – Čučlického diagram pro stanovení rovnovážné vlhkosti dřeva
Graf 3 – Závislost mechanických vlastností dřeva na obsahu vlhkosti
Graf 4 – Vliv hustoty a vlhkosti dřeva na modul pružnosti
Graf 5 – Pracovní diagram
Graf 6 – Rozdíl hustoty v rámci jednotlivých dřevin
Graf 7 – Rozdíl dynamického modulu pružnosti v rámci jednotlivých dřevin
Graf 8 - Rozdíl statického modulu pružnosti v rámci jednotlivých dřevin
Graf 9 – Rozdíl pevnosti v ohybu v rámci jednotlivých dřevin
Graf 10 – Rozdíl rázové houževnatosti v rámci jednotlivých dřevin
Graf 11 – Rozdíl pevnosti v tlaku v rámci jednotlivých dřevin

Tabulka 1 – Základní popisná statistika pro hustotu v kg.m^{-3}

Tabulka 2 – Hodnoty hustoty z dostupné literatury

Tabulka 3 – Základní popisná statistika pro dynamický modul pružnosti v MPa

Tabulka 4 - Základní popisná statistika pro statický modul pružnosti v MPa

Tabulka 5 - Hodnoty statického modulu pružnosti z dostupné literatury

Tabulka 6 – Základní popisná statistika pro pevnost v ohybu v MPa

Tabulka 7 – Hodnoty pevnosti v tlaku z dostupné literatury

Tabulka 8 – Základní popisná statistika pro rázovou houževnatost v J.cm^{-2}

Tabulka 9 – Hodnoty rázové houževnatosti z dostupné literatury

Tabulka 10 – Základní popisná statistika pro pevnost v tlaku podél vláken v MPa

Tabulka 11 – Hodnoty pevnosti v tlaku z dostupné literatury

Tabulka 12 – Základní popisná statistika pro absolutní vlhkost v %

Příloha 1 – Rozdíl hustot v rámci jedné dřeviny

Příloha 2 – Duncanův test pro hustotu

Příloha 3 – Duncanův test pro dynamický modul pružnosti

Příloha 4 – Duncanův test pro statický modul pružnosti

Příloha 5 – Duncanův test pro pevnost v ohybu

Příloha 6 – Duncanův test pro rázovou houževnatost

Příloha 7 – Duncanův test pro pevnost v tlaku

Příloha 8 – Hustota jednotlivých dřevin v rámci horizontální pozice

Příloha 9 – Dynamický modul pružnosti jednotlivých dřevin v rámci horizontální pozice

Příloha 10 – Statický modul pružnosti jednotlivých dřevin v rámci horizontální pozice

Příloha 11 – Pevnost v ohybu jednotlivých dřevin v rámci horizontální pozice

Příloha 12 – Rázová houževnatost jednotlivých dřevin v rámci horizontální pozice

Příloha 13 – Pevnost v tlaku jednotlivých dřevin v rámci horizontální pozice

Příloha 14 – Závislost dynamického modulu pružnosti na hustotě pro dřevo topolu

Příloha 15 – Závislost pevnosti v ohybu na hustotě pro dřevo břízy

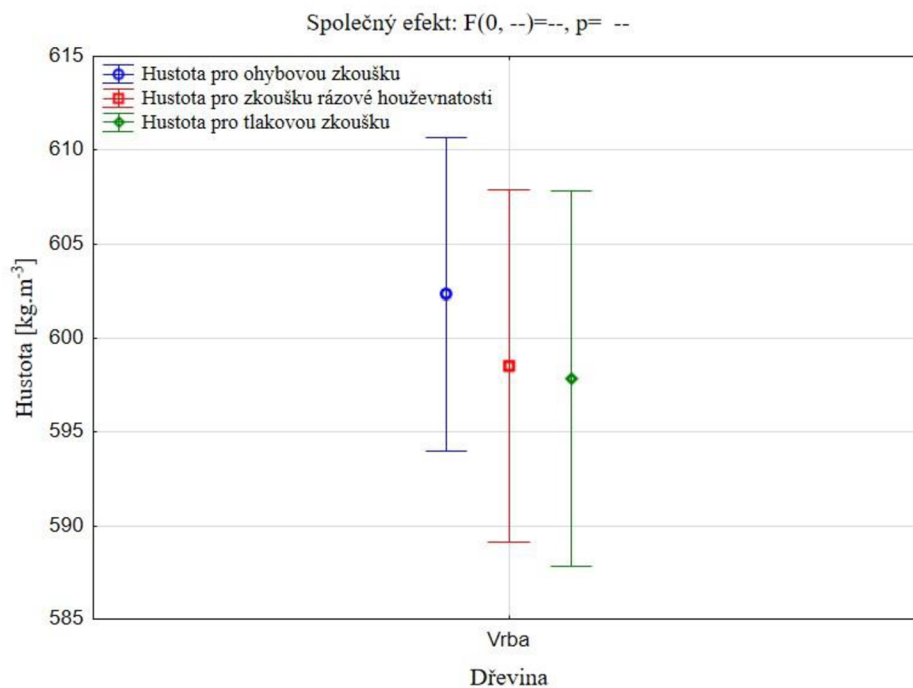
Příloha 16 – Závislost rázové houževnatosti na hustotě pro dřevo břízy

Příloha 17 – Závislost pevnosti v tlaku na hustotě pro dřevo topolu

Příloha 18 – Závislost statického modulu pružnosti na dynamickém modulu pružnosti pro dřevo břízy

Příloha 19 – Závislost pevnosti v ohybu na dynamickém modulu pružnosti pro
dřevo vrby

9 Samostatné přílohy



Příloha 1 – Rozdíl hustot v rámci jedné dřeviny

Hustota – Duncanův test				
	Topol	Olše	Vrba	Bříza
Topol		0,000009	0,000011	0,000003
Olše	0,000009		0,000009	0,000011
Vrba	0,000011	0,000009		0,017208
Bříza	0,000003	0,000011	0,017208	

Příloha 2 – Duncanův test pro hustotu

Dynamický modul pružnosti – Duncanův test				
	Topol	Olše	Vrba	Bříza
Topol		0,000770	0,000011	0,000009
Olše	0,000770		0,000003	0,000011
Vrba	0,000011	0,000003		0,087707
Bříza	0,000009	0,000011	0,087707	

Příloha 3 – Duncanův test pro dynamický modul pružnosti

Statický modul pružnosti – Duncanův test				
	Topol	Olše	Vrba	Bříza
Topol		0,141054	0,000003	0,000104
Olše	0,141054		0,000011	0,011681
Vrba	0,000003	0,000011		0,001974
Bříza	0,000104	0,011681	0,001974	

Příloha 4 – Duncanův test pro statický modul pružnosti

Pevnost v ohybu – Duncanův test				
	Topol	Olše	Vrba	Bříza
Topol		0,000469	0,000003	0,000011
Olše	0,000469		0,000011	0,000359
Vrba	0,000003	0,000011		0,027005
Bříza	0,000011	0,000359	0,027005	

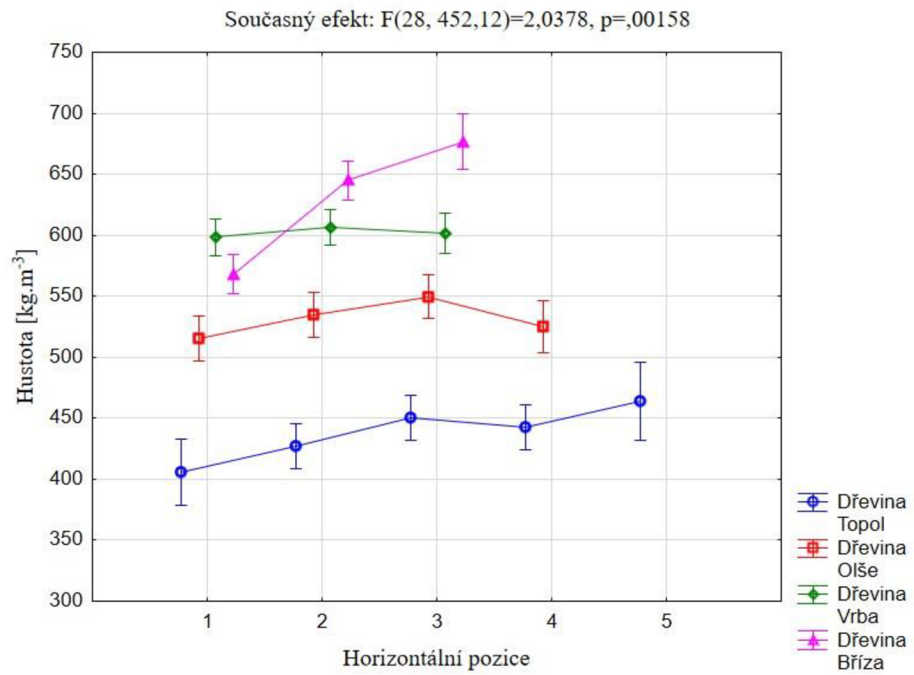
Příloha 5 – Duncanův test pro pevnost v ohybu

Rázová houževnatost – Duncanův test				
	Topol	Olše	Vrba	Bříza
Topol		0,076353	0,000009	0,000011
Olše	0,076353		0,000011	0,000003
Vrba	0,000009	0,000011		0,000158
Bříza	0,000011	0,000003	0,000158	

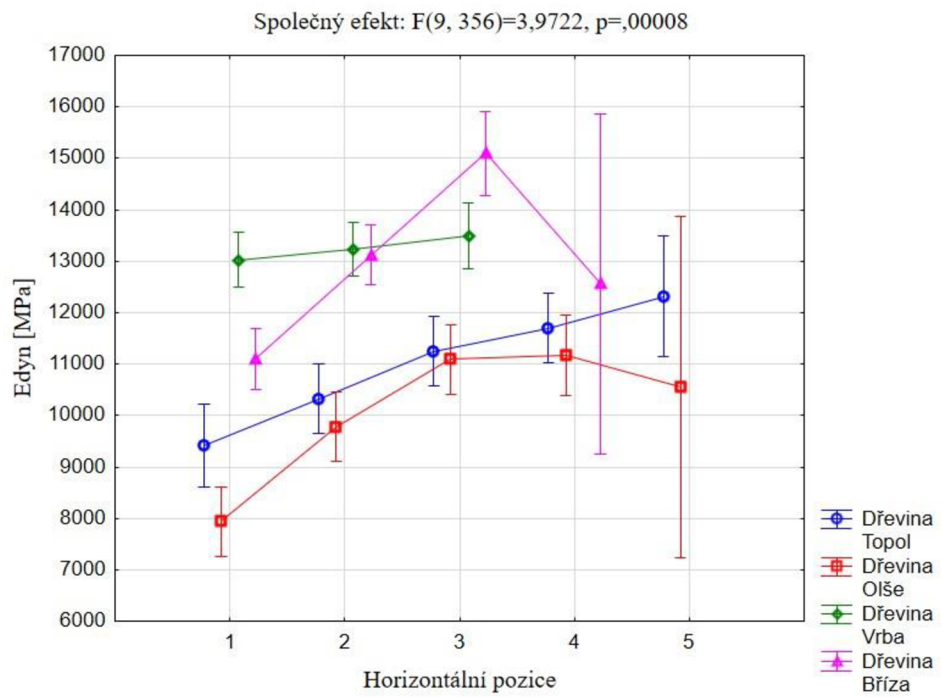
Příloha 6 – Duncanův test pro rázovou houževnatost

Pevnost v tlaku – Duncanův test				
	Topol	Olše	Vrba	Bříza
Topol		0,009346	0,000003	0,000011
Olše	0,009346		0,000011	0,000009
Vrba	0,000003	0,000011		0,000009
Bříza	0,000011	0,000009	0,000009	

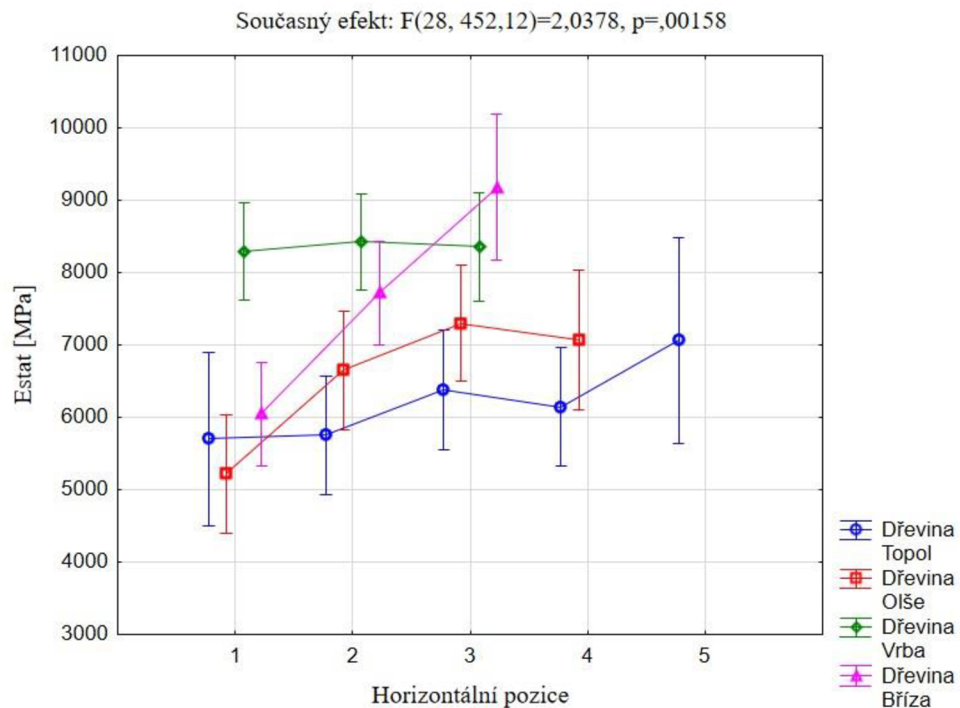
Příloha 7 – Duncanův test pro pevnost v tlaku



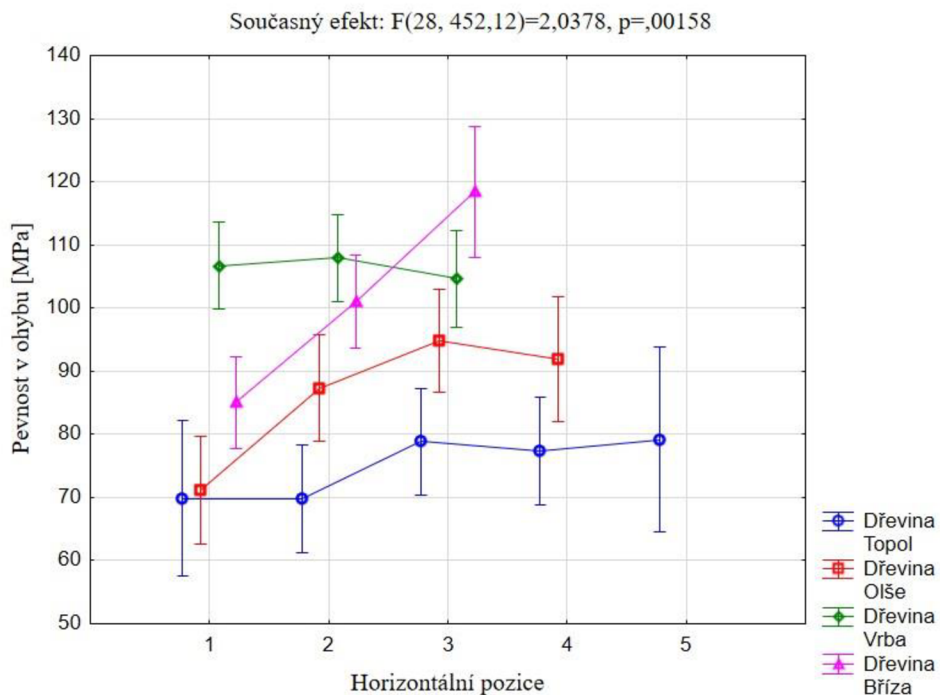
Příloha 8 – Hustota jednotlivých dřevin v rámci horizontální pozice



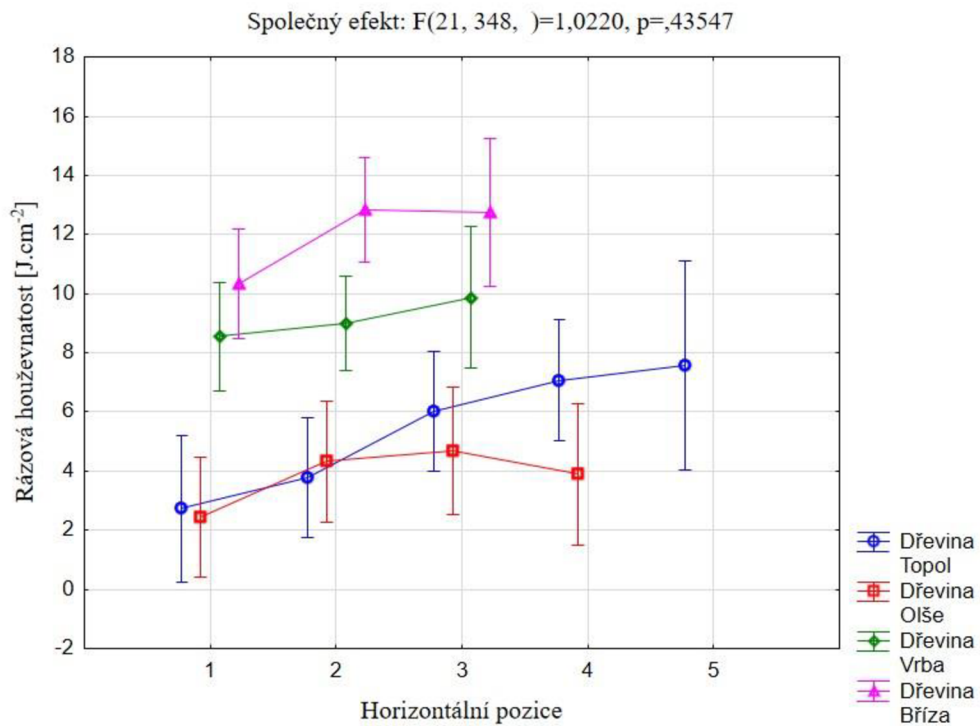
Příloha 9 – Dynamický modul pružnosti jednotlivých dřevin v rámci horizontální pozice



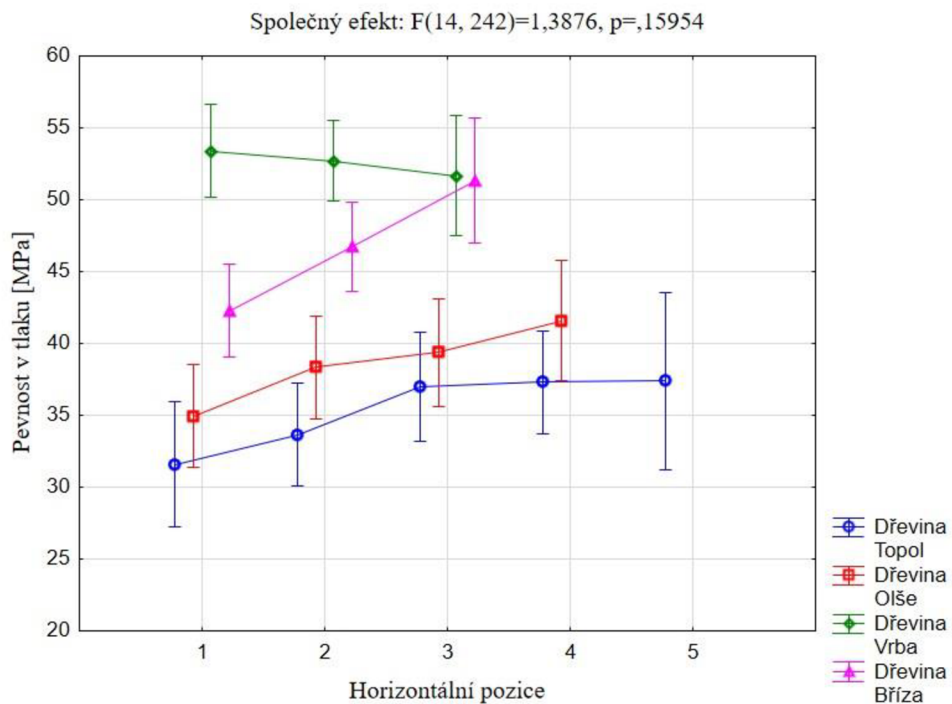
Příloha 10 – Statický modul pružnosti jednotlivých dřevin v rámci horizontální pozice



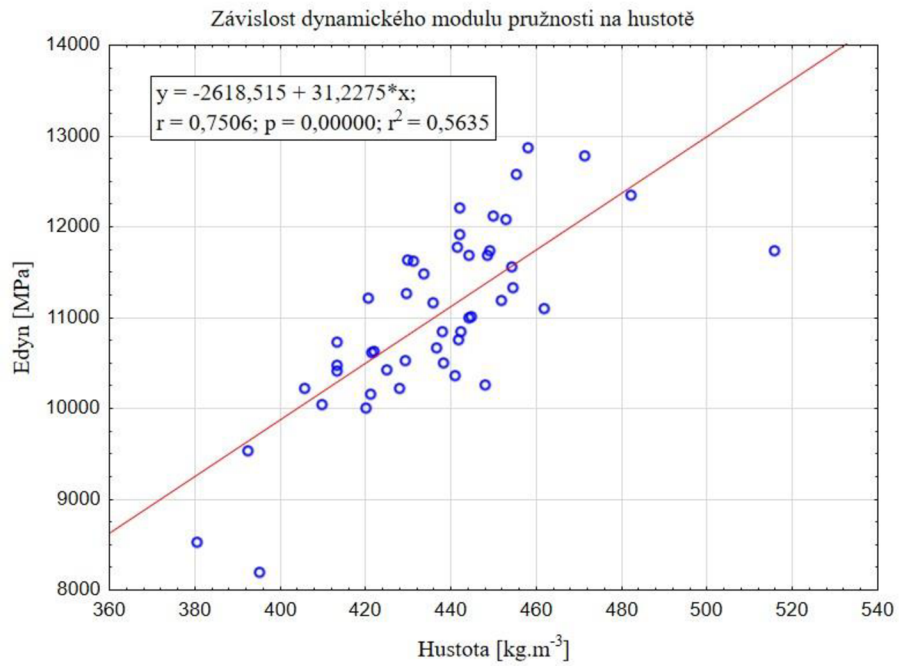
Příloha 11 – Pevnost v ohybu jednotlivých dřevin v rámci horizontální pozice



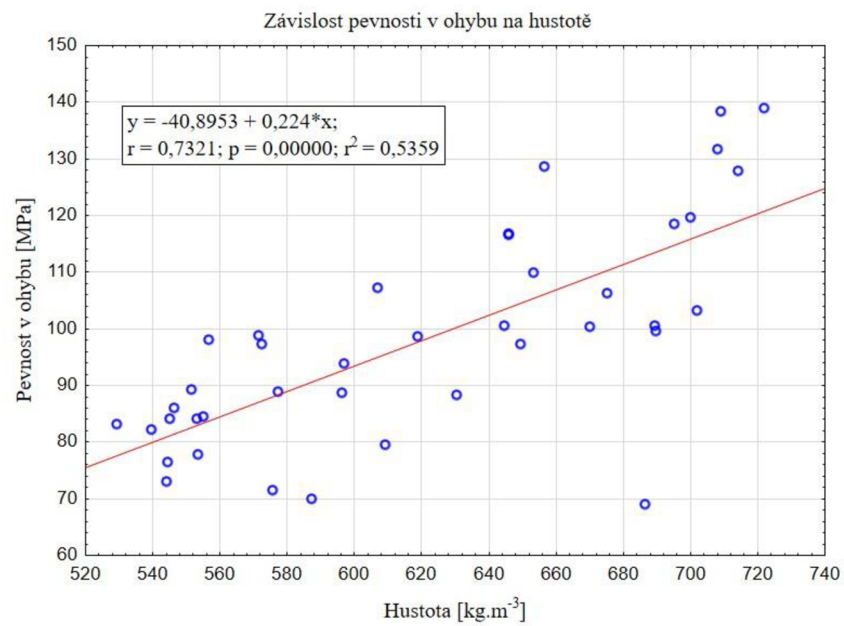
Příloha 12 – Rázová houževnatost jednotlivých dřevin v rámci horizontální pozice



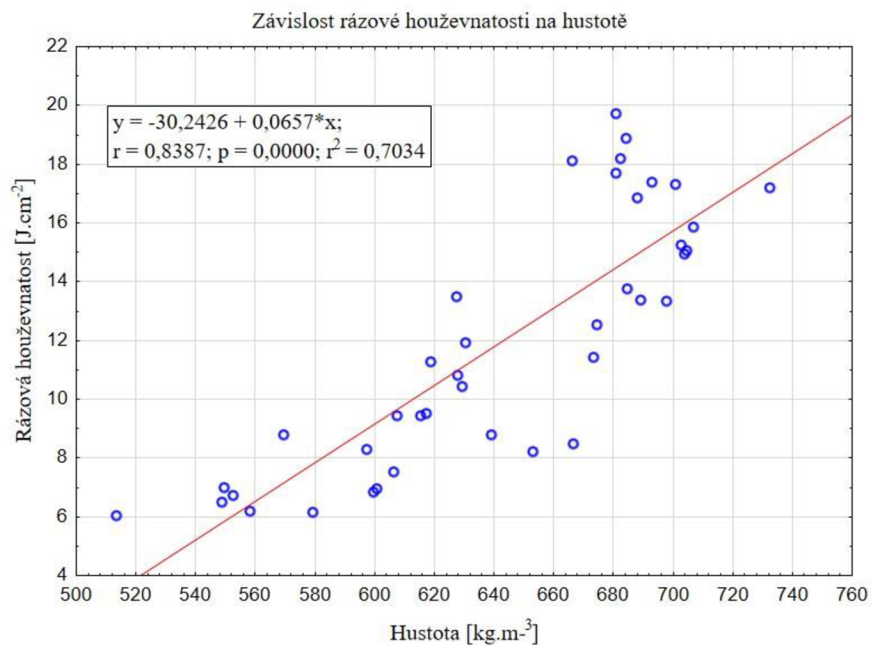
Příloha 13 – Pevnost v tlaku jednotlivých dřevin v rámci horizontální pozice



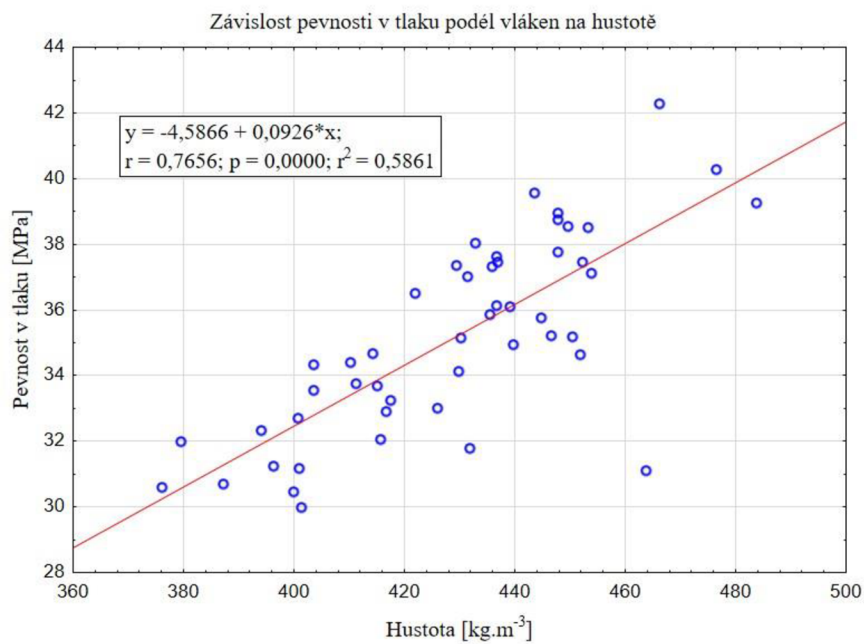
Příloha 14 – Závislost dynamického modulu pružnosti na hustotě pro dřevo topolu



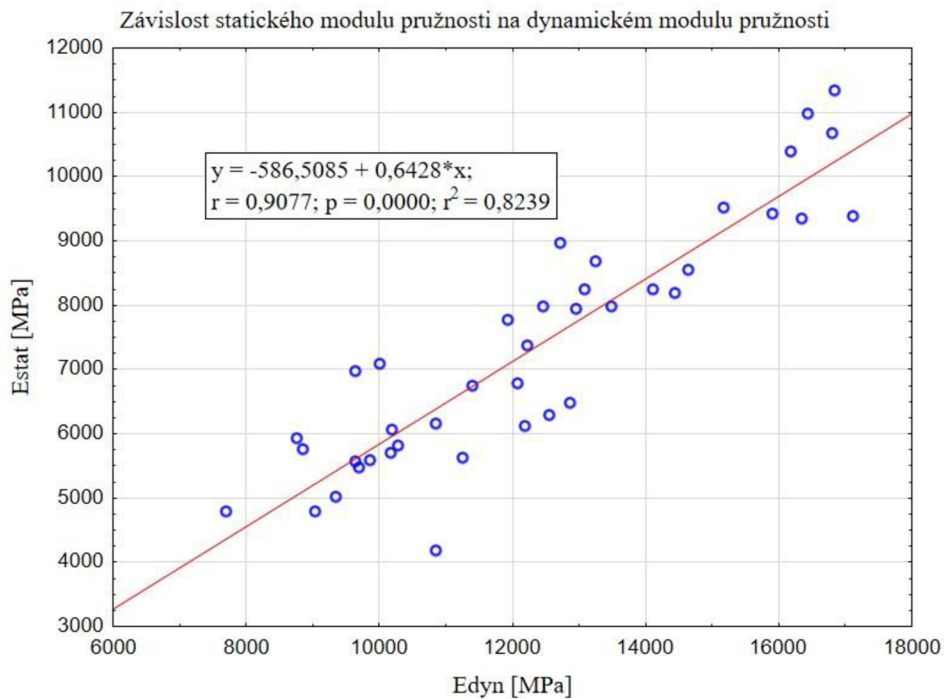
Příloha 15 – Závislost pevnosti v ohybu na hustotě pro dřevo břízy



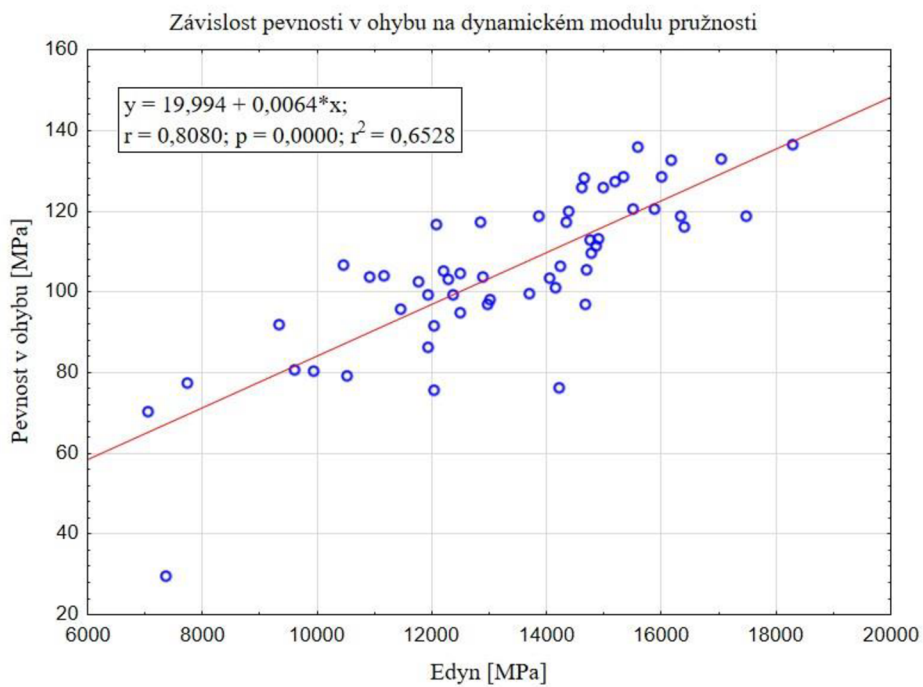
Příloha 16 – Závislost rázové houževnatosti na hustotě pro dřevo břízy



Příloha 17 – Závislost pevnosti v tlaku na hustotě pro dřevo topolu



Příloha 18 – Závislost statického modulu pružnosti na dynamickém modulu pružnosti pro dřevo břízy



Příloha 19 – Závislost pevnosti v ohybu na dynamickém modulu pružnosti pro dřevo vrby