

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Fakulta lesnická
a dřevařská**

**Posouzení vlivu tepelné úpravy na vybrané pevnostní
charakteristiky dřeva topolu osiky a olše lepkavé**

Bakalářská práce

Jakub Mallát

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

2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Posouzení vlivu tepelné úpravy na vybrané pevnostní charakteristiky dřeva topolu osiky a olše lepkavé vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil, a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 5.4.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Vlastimilu Borůvkovi, PhD., Dipl. Mgmt. za odborné vedení a trpělivost při zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi Ing. Davidu Novákovi za zaškolení a poskytnuté rady při měření i statistickém vyhodnocení dat. Rád bych také poděkoval své rodině a přátelům za podporu, pomoc a trpělivost.

Posouzení vlivu tepelné úpravy na vybrané pevnostní charakteristiky dřeva topolu osiky a olše lepkavé

Souhrn

Tato bakalářská práce se zaměřuje na posouzení vlivu tepelné úpravy při teplotách 170 a 190 °C na vybrané mechanické vlastnosti dřeva topolu osiky (*Populus tremula L.*), olše lepkavé (*Alnus glutinosa Gaertn.*), vrby jívy (*Salix caprea L.*) a jeřábu ptačího (*Sorbus aucuparia L.*). Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části je uveden základní popis jednotlivých přípravných dřevin, jejich výskyt a využití. Dále je zde zmíněno o základních fyzikálních i mechanických vlastnostech a o termicky modifikovaném dřevě, vyráběném podle Thermowood procesu.

V praktické části se práce věnuje metodickému zjištění mechanických vlastností, kterými jsou pevnost v tlaku, pevnost ve statickém i dynamickém ohybu dle platných norem, které udávají princip zkoušky a vztah pro výpočet. Počet vzorků byl rozdělen do tří částí, kdy část zůstala neupravená, třetina vzorků se tepelně upravila při 170 °C a třetina při 190 °C. Po vykonání zkoušek se výsledky statisticky vyhodnotily a porovnály s odbornou literaturou. Rostoucí trend byl zjištěn u pevnosti v tlaku, kdy vlivem tepelné úpravy vzrostla u všech vybraných dřevin. Nejvyšší statisticky významný nárůst 40,6 % byl zaznamenán u dřeva vrby.

Klíčová slova: Tepelná úprava, topol osika, olše lepkavá, pevnost v tlaku, pevnost v ohybu, houževnatost.

Assessment of the effect of heat treatment on selected strength characteristics of European aspen and black alder wood

Summary

This bachelor thesis focuses on the assessment of the impact of thermal treatment at temperatures of 170 and 190 °C on selected mechanical properties of aspen, alder, goat willow, and rowan wood. The thesis is divided into theoretical and practical part.

The theoretical part provides a basic description of each preparatory wood, their occurrence, and utilization. It also mentions the fundamental physical and mechanical properties, as well as thermally modified wood produced according to the Thermowood process.

The practical part of the thesis deals with the methodical determination of mechanical properties, specifically compressive strength, static and impact bending strength according to relevant standards specifying the testing principles and calculation relationships. The number of samples was divided into three parts, where one-third remained untreated, one-third of the samples were thermally treated at 170 °C, and a third at 190 °C. After conducting the tests, the results were statistically evaluated and compared with academic literature. An increasing trend was observed in compressive strength, where all selected woods showed an increase due to thermal treatment. The highest statistically significant increase of 40.6 % was observed in the wood of the goat willow.

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

Obsah

1	Úvod	7
2	Cíl práce	8
3	Literární řešerše problematiky.....	9
3.1	Topol osika (Populus tremula L.)	9
3.2	Olše lepkavá (Alnus glutinosa Gaertn.).....	10
3.3	Vrba jíva (Salix caprea L.).....	Chyba! Záložka není definována.
3.4	Jeřáb ptačí	12
3.4	Hodnocené fyzikální a mechanické vlastnosti	13
3.4.1	Vlhkost	13
3.4.2	Hustota dřeva	15
3.4.3	Anizotropie dřeva.....	17
3.4.4	Pevnost dřeva.....	17
3.4.5	Houževnatost dřeva.....	21
3.4.6	Pružnost dřeva.....	22
3.5	Termicky modifikované dřevo.....	23
3.5.1	Výroba termodřeva.....	23
3.5.2	Dělení termodřeva.....	24
3.5.3	Vlastnosti termodřeva	25
4	Metodika	28
4.1	Příprava vzorků a klimatizace.....	28
4.2	Termická úprava.....	29
4.3	Měření fyzikálních a mechanických vlastností.....	29
4.3.1	Hustota.....	29
4.3.2	Pevnost ve statickém ohybu a statický modul pružnosti	30
4.3.3	Rázová houževnatost v ohybu	32
4.3.4	Pevnost v tlaku podél vláken a modul pružnosti v tlaku.....	33
4.3.5	Absolutní vlhkost	34
4.3.6	Statistické vyhodnocení dat	35
5	Výsledky a diskuse	36
6	Závěr	47
7	Literatura	48
8	Seznam použitých grafu, tabulek, obrázků a příloh	53
9	Samostatné přílohy	54

1 Úvod

Dřevo je jedním z nejstarších a nejvíce užívaných materiálů v lidské historii. Díky trendům současné doby je dřevo jako obnovitelná surovina používaná ve stavebním, papírenském a energetickém průmyslu. Dřevo je nenahraditelný a všestranný materiál, který stejně jako jiné materiály má své pozitivní i negativní vlastnosti. Za pozitiva dřeva se považují výborné tepelně izolační a akustické vlastnosti, estetické či pevnostní a mechanické vlastnosti. Negativní vlastnosti, mezi které se řadí rozměrová nestabilita vlivem vlhkosti a degradace biotickými i abiotickými činiteli. Chemickými úpravami nebo tepelnou úpravou lze tyto negativa výrazně redukovat.

Tepelná úprava dřeva probíhá při působení teplot od 160 do 240 °C. Důležitým proměnným faktorem je nejen teplota úpravy, ale také doba úpravy a použitý druh média, který byl pro termickou úpravu zvolen. Vlivem působení tepla dochází k chemickým procesům, které mají za důsledek změnu anatomické i chemické stavby dřeva, a tím i změnu v mechanických a fyzikálních vlastnostech. Tyto změny vlastností jsou v této práci částečně popsány. Mezi komerčně nejznámější a nejvyužívanější tepelné úpravy se řadí ThermoWood pocházející z Finska, PlatoWood z Nizozemí, OHTWood z Německa a RetificatedWood z Francie (Sandberg et al., 2017).

Topol osika (*Populus tremula L.*), olše lepkavá (*Alnus glutinosa Gaertn.*) a vrba jíva (*Salix caprea L.*) patří mezi přípravné dřeviny, které se vyznačují rychlým růstem v mládí. Tyto dřeviny se využívají pro přípravu půdy stanoviště, avšak v dřevařském průmyslu nemají hojně využití. Tato práce je součástí projektu na Fakultě lesnické a dřevařské, který zkoumá dřevo výše zmíněných přípravných dřevin i jeřábu ptačího (*Sorbus aucuparia L.*). Pro dostatečné množství vzorků pro měření mechanických vlastností bylo dřevo jeřábu zařazeno i do této práce .

2 Cíl práce

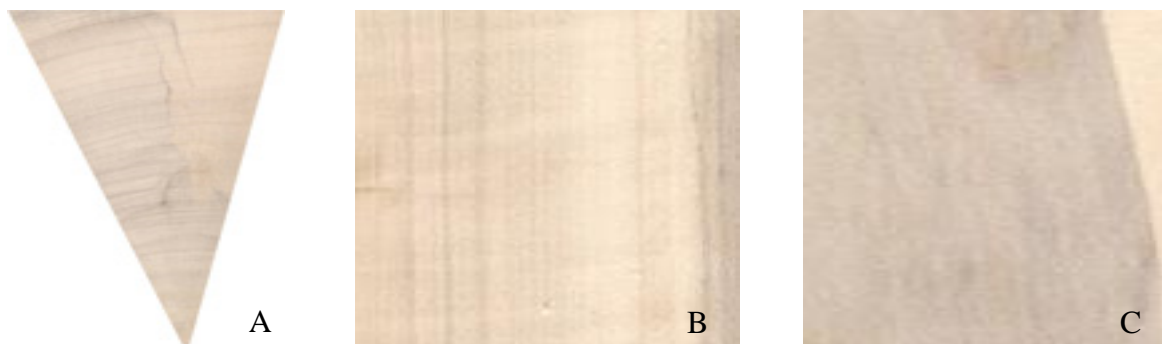
Cílem práce je posoudit vliv tepelné úpravy při 170 °C a 190 °C primárně na pevnost v tlaku dřeva topolu osiky (*Populus tremula L.*) a olše lepkavé (*Alnus glutinosa Gaertn.*), případně i vrby jívy (*Salix caprea L.*).

3 Literární rešerše problematiky

3.1 Topol osika (*Populus tremula* L.)

Topol osika je listnatá dřevina, známá také pod svým latinským názvem *Populus tremula* L. (Horáček, 2019). Je považován za rychle rostoucí roztroušeně pórovitou dřevinu, dosahující výšky až třiceti metrů, průměru kmene jeden metr a stáří až 150 let (Musil a Möllerová, 2005). Kořenový systém osiky je poměrně mělký, sahá do hloubky pouze jednoho metru. Do stran se rozptíná od 20 až do 30 metrů (Houston Durrant et al., 2016). Topol roste jak v Asii, tak i Evropě, kde je osika nejvíce rozšířená jako druh mezi topoly (Spohn, 2013). Vyskytuje se v různých klimatických podmínkách, od nížin až po pohoří, na suchých, mírně suchých i vlhkých půdách s vysokým obsahem živin, kde nejvíce prosperuje. Dobře také roste na stanovištích, které se nacházejí na okrajích lesů a silnic (Houston Durrant et al., 2016). Světlo je pro osiku důležitější než půdní podmínky stanoviště, jelikož je dřevinou světlomilnou, která se v porostech na okraji lesa dokáže během svého růstu výrazně vykřivit za světlem přicházejícím z boku. Slabé zastínění je schopná tolerovat (Větvička, 2001). Poškozena nejčastěji bývá jelení zvěří či dobyt看em a ve věku 30 až 40 let hnilobou jádrového dřeva. Euroasijská osika bývá často použita k zalesnění, jelikož je považována za pionýrský druh dřeviny, dovede tak rychle obsadit kalamitní holiny a pod ní se mohou obnovovat dlouhověké dřeviny, které později osiku vytlačí (Musil a Möllerová, 2005). Díky své odolnosti proti větru je vysazována jako větrolam, aby kryla okolní porost vůči větru (Spohn, 2013).

Dřevo topolu je bílé až žlutobílé barvy v celé délce kmene. Osika je brána jako přípravná dřevina, která nemá jádro. Dřeňové paprsky a cévy nejsou pouhým okem patrné, ale jsou vidět jen lupou. Průměrná hustota dřeva osiky je poměrně nízká a pohybuje se okolo 441 kg/m³ (Zeidler a Borůvka, 2016). Její lehké a měkké dřevo slouží pro výrobu dých, překližek, laťovek, jako buničina pro výrobu papíru, dřevěného uhlí a štěpky (Houston Durrant et al., 2016). V neposlední řadě bývá nejdůležitější surovinou pro výrobu zápalek (Větvička, 2001).



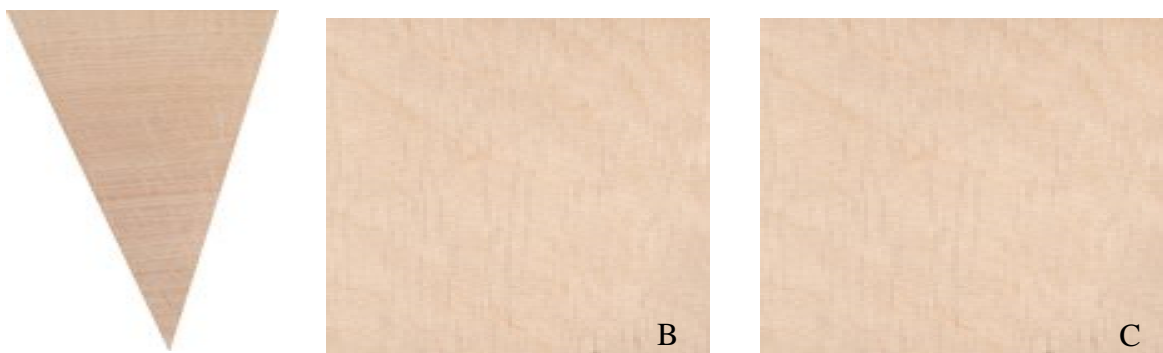
Obrázek 1 – Dřevo topolu osiky v jednotlivých řezech: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez (<https://fraxinus.mendelu.cz>)

3.2 Olše lepkavá (*Alnus glutinosa* Gaertn.)

Olše lepkavá je listnatá dřevina, známá také pod svým latinským názvem *Alnus glutinosa* Gaertn. Je považována za rychle rostoucí roztroušeně pórovitou dřevinu, dosahující výšky až dvacet pět metrů, průměru kmene jeden metr a stáří až 200 let (Musil a Möllerová, 2005). Je dřevinou světlomilnou, zastínění toleruje jen v mladém věku. Olše roste po území celé Evropy od nížin po podhoří, kdy ke klimatickým podmínkám je nenáročná. Nejvíce vyžaduje vláhu v půdě (Vermeulen, 2008). Z tohoto důvodu nejlépe prosperuje na vlhkých a dostatečně provzdušněných stanovištích, které se nachází v blízkosti vody, tedy břehy řek, potoků slepých ramen rybníků, odvodňovací kanály, bažinaté louky či lesní močály. Při svém útlumu ve vegetačním období snáší záplavy (Houston Durrant et al., 2016). Pokud je strom trvale vystaven vodě s obsahem železa, zbarvuje se do černé barvy a zvyšuje svou pevnost (Spohn, 2013; Větvička, 2001). Olše vytvářejí symbiózu s bakteriemi rodu *Frankia*, které jsou schopné vázat volný dusík ze vzduchu. Tyto bakterie žijící v kořenových hlízkách jsou schopné za 1 rok na ploše 1 hektaru fixovat až 200 kg dusíku (Horáček, 2019). Olše bývá, pro svou schopnost vázat dusík, použita k rekultivaci půdy a stabilizaci břehů (Větvička, 2001). Při stáří stromu kolem 60 let bývá náchylná k napadení hnilobou jádra.

Dřevo olše je narůžovělé až světle oranžové. Olše, stejně jako osika, je přípravnou bělovou dřevinou. Je charakteristická častým výskytem hnědých dřeňových skvrn na hranici letokruhů mezi jarním a letním dřevem. Letokruhy jsou nevýrazné, avšak dřeňové paprsky jsou robustní a dobře znatelné na všech řezech (Obr 3 A, B, C). Průměrná hustota dřeva olše se pohybuje okolo 553 kg/m³. Olše se využívá v nábytkářství pro výrobu dýh, laťovek, pro soustružení, či řezbaření. (Zeidler a Borůvka, 2016) Dřevo poškozené hnilobou jádra slouží jako palivo i v podobě dřevěného uhlí (Houston Durrant et al., 2016). Dřevo olše bývá také

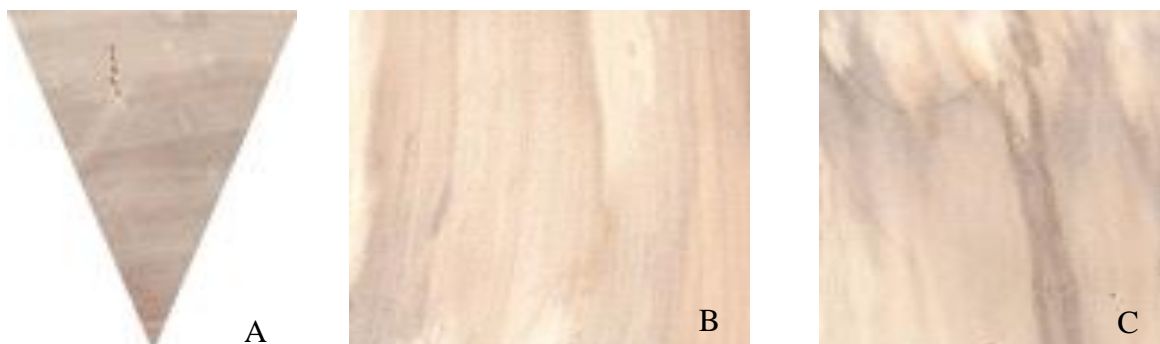
využito při vodních a zemních pracích, zejména při stavbách mol a vodních podpěr (Musil a Möllerová, 2005).



3.3 Vrba jíva

Vrba jíva je listnatá dřevina, známá také pod svým latinským názvem *Salix caprea L.* (Horáček, 2019). Je považována za rychle rostoucí keř či roztroušeně pórovitou dřevinu, dosahující výšky až dvanáct metrů, průměru kmene čtyřicet centimetrů a stáří až 60 let (Musil a Möllerová, 2005). Jíva roste jak v Asii, tak i v Evropě, kde na jihu dává přednost podhorským oblastem (Větvička, 2001). Považuje se za pionýrskou dřevinu, která nebývá půdně ani klimaticky náročná. Díky své nenáročnosti snáší oproti ostatním stromovitým vrbám i suchá stanoviště. Hojně se vyskytuje na světlých místech, jelikož je považována za velmi světlomilnou dřevinu, která je schopna tolerovat jen slabé zastínění (Houston Durrant et al., 2016). Proto se nejčastěji vyskytuje na otevřených plochách s plným sluncem jako jsou lesní mýtiny, okraje lesa, paseky či písčokovny (Vermeulen, 2008). Začíná kvést velmi brzy z jara v březnu, je považována za včelařskou dřevinu, jenž je schopna jako první včelám poskytnout mnoho pylu a nektaru (Spohn, 2013). Vrba bývá často vysazována jako živý plot, či větrolam, aby kryla okolní porost vůči větru (Větvička, 2001). Své uplatnění nachází vrba i při obnově krajiny (Musil, Möllerová, 2005). Celosvětově se tato vrba využívá i pro svou schopnost k extrakci těžkých kovů, jako je Kadmium a Zinek ze znečištěných lokalit (Houston Durrant et al., 2016).

Dřevo vrby je charakteristické tím, že je lehké a měkké. Jíva je dřevina se žlutohnědým jádrem hůře rozlišitelným od světle nažloutlé běli. Na rozdíl od letokruhů jsou dřevné paprsky viditelné pouze lupou nebo mikroskopem. Průměrná hustota jívy se pohybuje okolo 470 kg/m³. Dřevní hmota vrby se nejčastěji využívá pro výrobu beden a košíků, či pro palivo i v podobě dřevěného uhlí. (Zeidler a Borůvka, 2016)



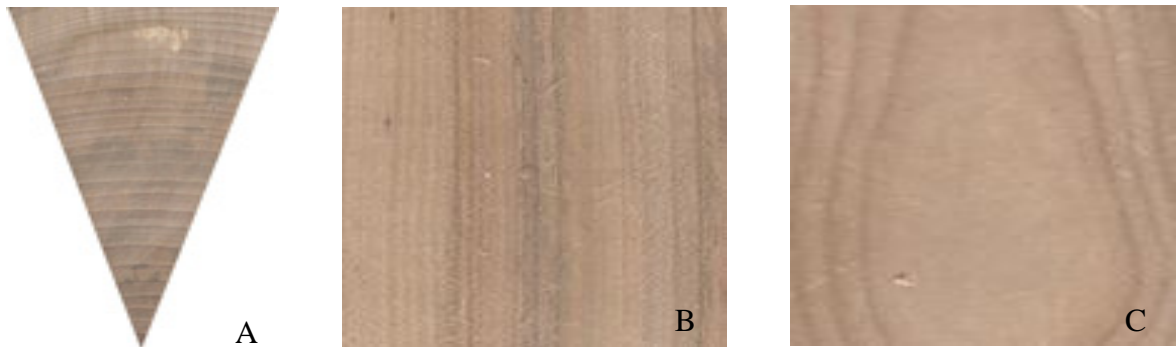
Obrázek 5 - Dřevo vrby jívy v jednotlivých řezech: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez (<https://fraxinus.mendelu.cz>)

3.4 Jeřáb ptačí

Jeřáb ptačí je listnatou dřevinou s roztroušeně pórovitou stavbou známou také pod svým latinským názvem *Sorbus aucuparia L.* (Horáček, 2019). Je považován za rychle rostoucí keř nebo strom dosahující výšky až dvaceti metrů, průměru kmene čtyřicet centimetrů a stáří okolo 100 let (Musil a Möllerová, 2005). Jeřáb roste převážně po celém území Evropy, kde se vyskytuje od Islandu až po Balkán. Roste i na severu a východu Asie, přičemž zdomácněl i ve Spojených státech a Kanadě. Je půdně nenáročný a přizpůsobivý, roste jak na skalách, útesech, ve vlhkých rašeliništích, mokřadech, na holé půdě nalezišť jílu a měkkých vápenců tak i v souvislých porostech. Je mrazuvzdorný, roste i v nadmořských výškách podhorských oblastí, ale toleruje i vysoké letní teploty a slabší zastínění. Tento druh jeřábu prosperuje i v chudé a kyselé půdě, a je tím velmi podobný bříze. Je pionýrskou dřevinou, která se vysazuje v hustých lesních smrkových porostech. Stromy jeřábu bývají vysazovány i v městech a zahradách. Je také užitečný pro zpevnění svahů a zvýšení pevnosti půdy (Houston Durrant et al., 2016). Začíná kvést v květnu a z oplozených květů se rozvíjejí malvice oranžové až červené barvy. Tyto plody zvané jeřabiny slouží jako potrava ptactva zejména v zimním období (Spohn, 2013). Jeřabiny jsou bohaté na vitamíny a antioxidanty, obsahují ale i mírně jedovatou kyselinu parasorbínovou, která působí močopudně. Z tohoto důvodu jsou tyto plody využívány při léčbě ledvinových kamenů (Vermeulen, 2008). Plody jeřábu ptačího se také používají k ochucení vodky k výrobě šťávy, džemů či pálenky (Houston Durrant et al., 2016).

Dřevo jeřábu je pevné, tvrdé a houževnaté. Jeřáb je jádrovou dřevinou, přičemž jádro je hnědé a okolní běl je světlá a zbarvená do žlutohnědé barvy. Letokruhy má zřetelné. Průměrná hustota dřeva jeřábu se pohybuje okolo 737 kg/m³ (Korkut et al., 2009). Dřevní

hmota se využívá na násady náradí, pro soustružení a v nábytkářském průmyslu (Houston Durrant et al., 2016).



Obrázek 4- Dřevo jeřábu ptačího v jednotlivých řezech: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez (<https://fraxinus.mendelu.cz>)

3.5 Hodnocené fyzikální a mechanické vlastnosti

3.5.1 Vlhkost

Jako množství vody, které je ve dřevě obsaženo, lze rozumět vlhkost dřeva. Dřevo je považováno za hyroskopický a navlhavý materiál, který vodu v určitém skupenství obsahuje vždy, přičemž voda v něm obsažená negativním způsobem ovlivňuje jeho fyzikální a mechanické charakteristiky.

Vlhkost se rozlišuje na absolutní a relativní. Absolutní vlhkost w_{abs} se vyjadřuje poměrem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu. Absolutní vlhkost je jeden z nejdůležitějších parametrů, využívající se pro hodnocení fyzikálních a mechanických vlastností (Horáček, 1998). Vztah pro výpočet absolutní vlhkosti je zmíněn v podkapitole 4.3.5.

Vlhkostí relativní w_{rel} se rozumí procentuální množství vody ve dřevě z jeho celkové hmotnosti mokrého dřeva (Matovič, 1993). Tato vlhkost nachází své uplatnění při obchodu s dřevní surovinou podle své hmotnosti, například u váhových přejímek suroviny (Gandelová et al., 2009). Relativní vlhkost se vyjadřuje vztahem:

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

w_{rel} – relativní vlhkost dřeva [%],

m_w – hmotnost mokrého dřeva [g],

m_0 – hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu [g], (Horáček, 1998)

Gandelová et al. (2009) uvádí, že v závislosti na obsahu vlhkosti se v praxi nejčastěji rozdělují následující stupně vlhkosti dřeva:

- mokré, které je dlouho uložené ve vodě ($w_{\text{abs}} > 100 \%$),
- čerstvě pokácené (w_{abs} se pohybuje v rozmezí 50–100 %),
- vysušené na vzduchu (w_{abs} v rozmezí 15–20 %),
- vysušené na pokojovou teplotu (w_{abs} v rozmezí 8–10 %),
- absolutně suché ($w_{\text{abs}} = 0 \%$), vysušené při teplotě $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Rozdělení vody ve dřevě

Vodu, kterou dřevo obsahuje, rozlišujeme na vodu volnou – kapilární, vodu vázanou – hygroscopickou a vodu chemicky vázanou – molekulární (Gandelová et al., 2009).

Poté co je naplněna buněčná stěna vodou vázanou a dojde k překročení meze nasycení buněčných stěn, sorbuje se volná voda do buněčných dutin, zvaných také lumény a do mezibuněčných prostor. Tato mezní hodnota se dle druhu dřeviny pohybuje v rozmezí od 22 do 30 % absolutní vlhkosti. Hybnou silou vody volné je gradient tlaků. (Horáček, 1998)

Hygroscopická voda se ukládá do buněčných stěn, ve kterých je vázána pomocí vodíkových můstků. Vodíkové můstky vznikají vázáním molekul vody na volná sorpční místa hydroxylových skupin (-OH) v amorfní části polymerních složek dřeva. Těmi jsou celulóza a hemicelulózy. Tato voda se ve dřevě vyskytuje od nulové absolutní vlhkosti až po mez hygroscopicity, tedy za nulového množství vody volné (Gandelová et al., 2009). Mez hygroscopicity se odlišuje v závislosti od druhu dřeviny, anatomické a chemické stavby. Tato mez má zásadní význam při určování fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. (Horáček, 1998)

Molekulární voda je vždy součástí stavby chemických sloučenin. Zastoupení chemicky vázané vody lze zjistit chemickými analýzami. Sušením v sušících komorách ji nelze ze dřeva vysušit, ale je možné ji odstranit pouze spálením. U charakteristiky fyzikálních a mechanických vlastností dřeva nemá podstatný význam jako ostatní vody, protože množství sušiny se pohybuje v rozmezí 1 - 2 %, proto se s molekulární vodou neuvažuje. (Gandelová et al., 2009)

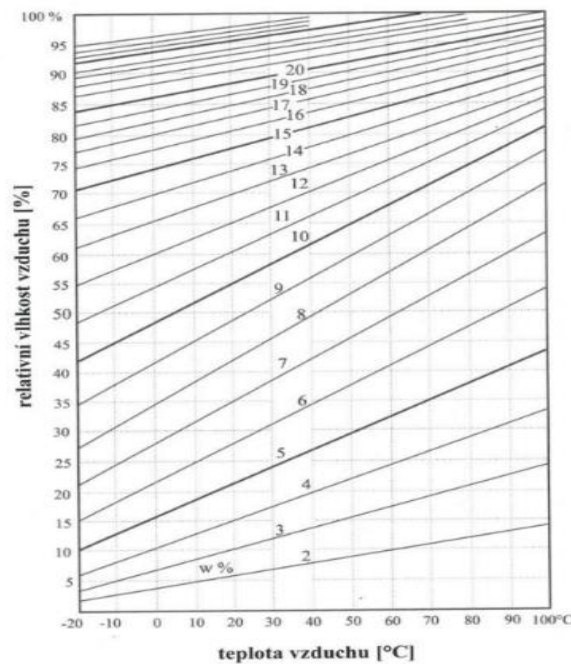
Rovnovážná vlhkost

Dřevo je považováno za hygroscopický materiál, schopný při vysoké relativní vlhkosti prostředí přijímat – absorbovat vodu ve formě páry. Naopak je-li vlhkost dřeva vyšší než vlhkost daného prostředí, bude vodu ztrácet – desorbovat, dokud nenastane rovnováha. Změna vlhkosti je reverzibilní, avšak neprobíhá po stejné křivce. Rovnovážná vlhkost dřeva

je taková vlhkost, která se ve dřevě ustálí při daných podmínkách prostředí s danou relativní vzdušnou vlhkostí a teplotou. Tento stav se nazývá stavem vlhkostní rovnováhy (Gandelová et al., 2009). Při neměnných podmínkách prostředí, kterými jsou teplota a relativní vlhkost vzduchu, lze rovnovážnou vlhkost dřeva stanovit podle diagramu určujícího rovnovážnou vlhkost (Obr.5).

3.5.2 Hustota dřeva

Hustotu dřeva lze vyjádřit jako poměr jeho hmotnosti a objemu v jednotkách $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$



Obrázek 5 Diagram pro určení rovnovážné vlhkosti dřeva (Borůvka a Babiak, 2022)

nebo $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (Požgaj et al., 1993). Vzhledem k hygrokopickému charakteru dřeva je určení jeho hustoty náročnější, než u ostatních materiálů, u kterých není váha ani objem ovlivněny vlhkostí, tak jako u dřeva. I přes tento fakt je hustota považována za nejpodstatnější veličinu, která ovlivňuje jak fyzikální, tak i mechanické vlastnosti dřeva. (Gandelová et al., 2009)

Hustotu dřeva lze stanovit za využití stavu vlhkosti:

- 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 et al., 2009).

Dle hustoty při 12 % absolutní vlhkosti rozdělujeme jednotlivé druhy dřevin:

- Dřeva s nízkou hustotou ($\rho_{12} < 540 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) – borovice, smrk, jedle, topol, vrba, olše,
- Dřeva se střední hustotou ($\rho_{12} = 540\text{--}750 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) – modřín, bříza, buk, dub, jeřáb, jasan, jilm,
- Dřeva s vysokou hustotou ($\rho_{12} > 750 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) – habr, akát, moruše, hrušeň, (Matovič, 1993).

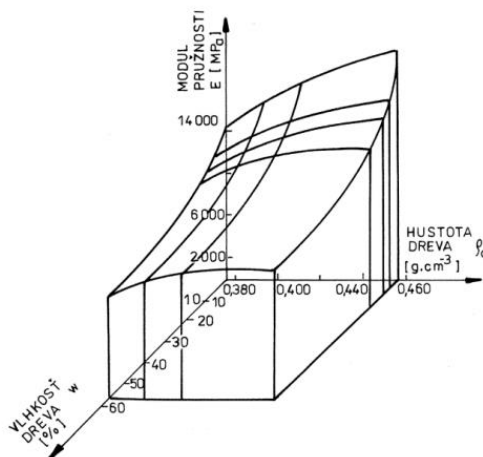
Vztah pro výpočet hustoty vlhkého dřeva je zmíněn v podkapitole 4.3.1.

Hustota dřevní substance

Dřevní substancí se rozumí hmota buněčných stěn bez lumenů, submikroskopických dutin i mezibuněčných prostor (citace). Hustotu dřevní substance lze tedy pak vyjádřit poměrem hmotnosti dřevní substance a jejím příslušným objemem. Hustota dřevní substance se pohybuje v rozmezí $1440\text{--}1570 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ s uváděnou průměrnou hodnotou $1530 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a na rozdíl od hustoty dřeva, která se u různých druhů dřevin výrazně liší, není tolik variabilní (Gandelová et al., 2009). Nejvíce je ovlivněna chemickým složením dřeva, kdy průměrné hustoty základních stavebních složek buněčné stěny nabývají hodnot – celulóza: $1560 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, hemicelulózy: $1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a lignin: $1350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Hustota dřevní nachází své uplatnění při výpočtu pórovitosti, maximální nasáklivosti a také technologických procesů impregnace dřeva (Horáček, 1998).

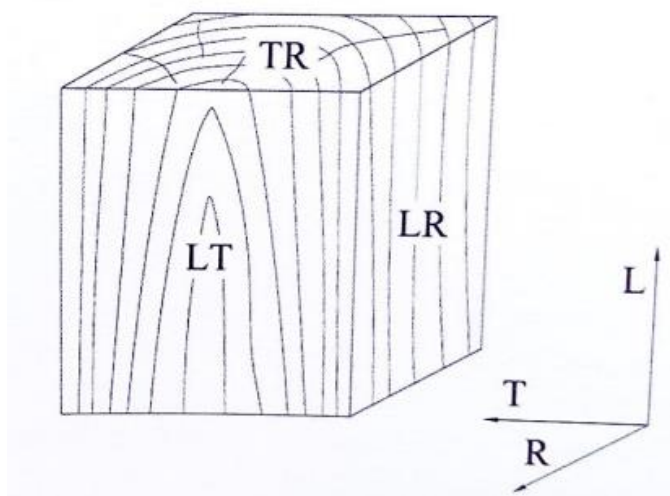
Vliv hustoty na mechanické vlastnosti dřeva

Mezi Youngovým modulem pružnosti v tlaku a hustotou existuje kladná korelace, která udává platnost, že s rostoucí hustotou dochází k zvýšení modulu pružnosti Z obrázku 6 lze pozorovat nejvýraznější zvyšování hustoty dřeva v suchém stavu.



Anizotropie dřeva

Mechanické a fyzikální vlastnosti i anatomická stavba dřeva se liší v závislosti na uvažovaném směru. Z tohoto důvodu je dřevo považováno za anizotropní materiál. Anizotropie dřeva vychází z orientace základních stavebních struktur dřeva, zejména v uspořádání celulózy v buněčné stěně. Rozlišují se tři základní směry – podélný (axiální), radiální, tangenciální (Obr.7). Pro jasnou identifikace směrů je nezbytné dřevu přiřadit souřadnicový systém, který se skládá ze tří vzájemně na sebe kolmých směrů. (Borůvka a Babiak, 2022) Dřevo s takto přiřazenými směry pak lze považovat za ortogonálně anizotropní, tedy ortotropní materiál (Babiak, 2001). Při působení sil kolmo na vlákna jsou způsobeny větší deformace zploštěním buněk než při silách působících ve směru vláken. Mechanické vlastnosti jsou ve směru podél vláken a směru kolmém k vláknům dány vazbovými energiemi chemických složek dřeva. V podélném směru, který je rovnoběžný s vlákny se využívá kovalentních vazeb, ve směru kolmém k vláknům vodíkových vazeb (Požgaj et al., 1993).



Obrázek 7 – Základní směry ve dřevě (Borůvka a Babiak, 2022)

3.6 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva lze popsat jako schopnost materiálu odporovat trvalému porušení, které je způsobeno vnějším mechanickým zatížením (Matovič, 1993). Za ukazatel této veličiny se považuje mez pevnosti, která se číselně vyjadřuje napětím, při němž dojde k porušení vnitřní soudržnosti dřeva (Požgaj et al., 1993).

Pevnostní vlastnosti dřeva lze rozlišit dle různých kritérií, a to:

- podle stavu napjatosti – jednoosý, víceosý,
- podle způsobu zatížení – tah, tlak, ohyb, smyk a krut,
- podle účinků zatížení na dřevo – nedestruktivní a destruktivní, (Gandelová, 2009)
- podle časového průběhu zatížení – statické, dynamické, kmitavé, trvalé, (Babiak, 2001).

Napětí a deformace

Napětí lze vyjádřit jako velikost rozložené vnitřní síly reagující na zatížení vnějšími mechanickými silami. Při působení mechanických sil rovnoběžně s plochou, tedy v rovině přířezu, je vyvoláno smykové (tangenciální) napětí. Naopak, pokud síly působí kolmo na plochu tělesa, je vyvoláno normálové napětí (Matovič, 1993; Požgaj et al., 1993).

Je-li vnější síla F rovnoměrně rozložena na ploše S , je napětí vyjádřeno vztahem:

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

σ – napětí [MPa],

F – velikost působící vnější síly [N],

S – plocha [mm²], (Matovič, 1993).

K přeměně rozměrů a tvarů těles dochází působením vnějších sil. Takto způsobené změny označujeme jako deformace. Vzniklá deformace je přímo úměrná působícímu napětí. Vztah mezi napětím a deformací je platný do meze úměrnosti, po kterou je uvažován Hookeův zákon (Gandelová et al., 2009; Matovič, 1993).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon [MPa]$$

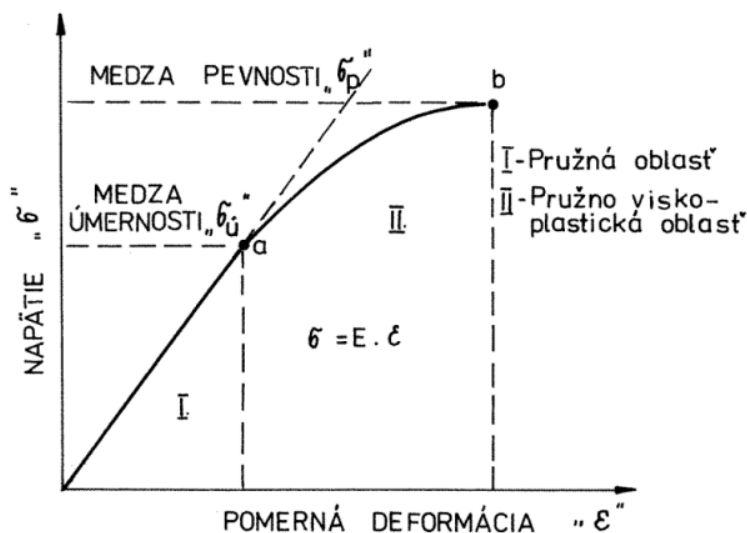
σ – napětí [MPa],

E – modul pružnosti [MPa],

ε – poměrná deformace [-], (Gandelová et al., 2009).

Níže uvedený pracovní diagram (Obr.8) vyjadřuje vztah závislosti mezi napětím a deformací. Tento napětí-ově-deformační diagram znázorňuje mez úměrnosti, mez pevnosti, modul pružnosti, pružné deformace, pružné v čase a plastické deformace. Rozlišují se dvě části, první lineární část, kdy deformační čára končí mezi úměrnosti σ_u . A nelineární druhá část pokračuje nad mezí úměrnosti, je ukončena mezi pevnosti σ_p . (Gandelová et al., 2009) Pružné deformace, které po uvolnění zatížení zanikají a těleso nabývá svých původních rozměrů, vznikají po mez úměrnosti (bod A). Deformace pružné v čase a plastické deformace, které po odstranění působící síly setrvávají, se rozvíjí s rostoucím napětím nad

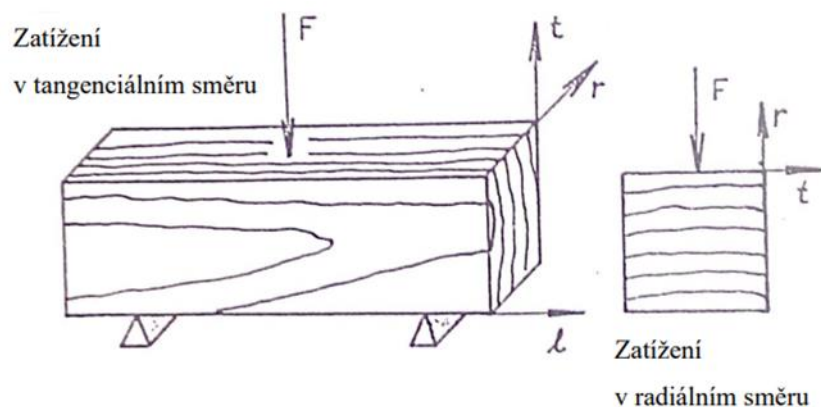
mez úměrnosti, kde lineární deformační čára začíná nabývat křivočarého charakteru. Mezi pevnosti (bod B) se označuje napětí, při kterém dochází k porušení tělesa. (Matovič, 1993) Tento bod představuje nejvyšší hodnotu napětí, které může být dřevo vystaveno, aniž by došlo k porušení jeho celistvosti (Babiak, 2001).



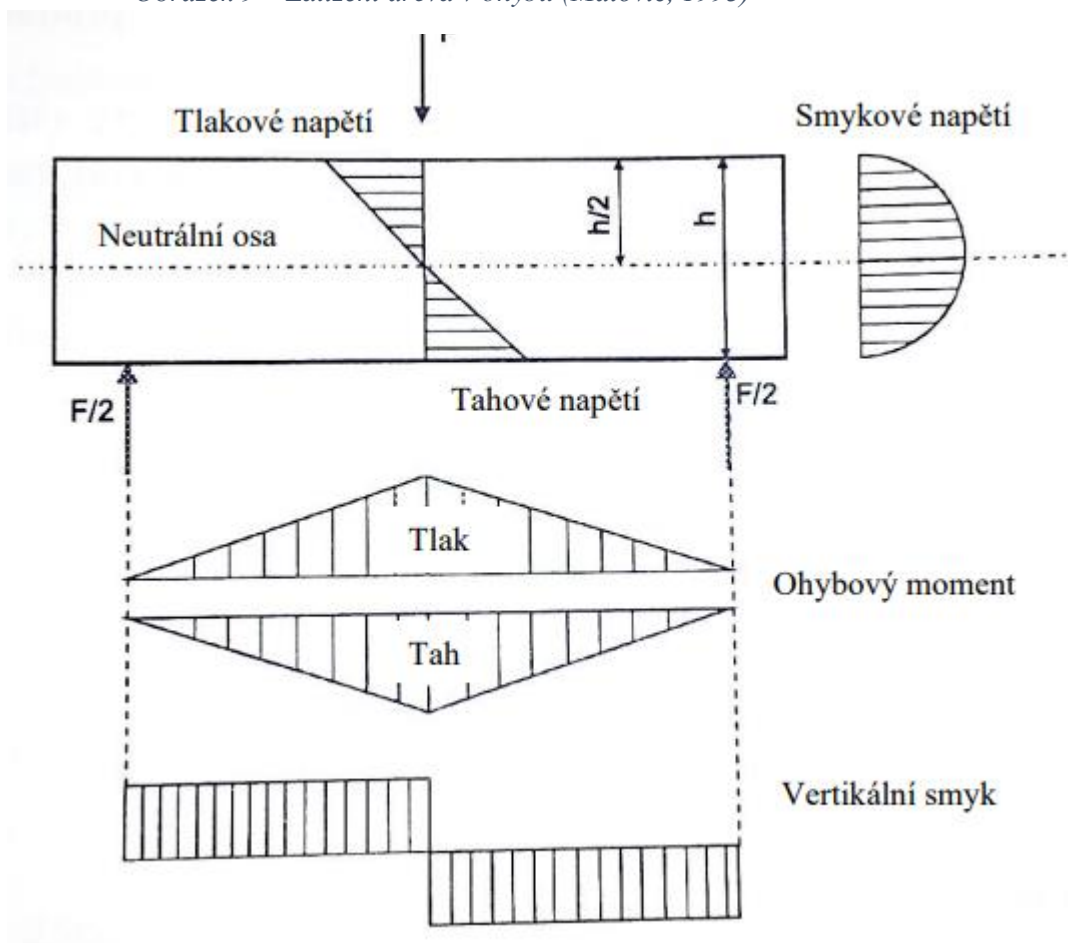
Obrázek 8 – Pracovní diagram dřeva (Babiak,2001)

Pevnost dřeva ve statickém ohybu

Pevnost dřeva v ohybu lze posuzovat jako jednu z nejdůležitějších mechanických charakteristik, a to z důvodu praktického využití dřeva ve stavebnictví jako konstrukčního prvku, který je výše zmíněným ohybovým napětím namáhán. Nejčastěji je užíváno pevnosti v ohybu, kdy síla působí kolmo k vláknům na tangenciální nebo radiální plochu, tedy v tangenciálním směru (Obr.10). Po zatížení dřevěného tělesa se v horní části tvoří tlakové napětí, které zpříčiňuje zkrácení vrchních vláken. Naopak, v dolní části působí tahové napětí, jehož důsledkem se spodní vlákna prodlužují. Na horní a dolní části tak dochází ke vzniku maximálního napětí. Neutrální osa je oblastí v tělese, kde nevznikají normálová napětí a dochází zde k přechodu mezi tlakovým a tahovým napětím. Kromě tlakových a tahových napětí působí na těleso i smykové napětí, z tohoto důvodu, je pevnost v ohybu považována za kombinované zatěžování (Požgaj et al., 1993). Obrázek 11 znázorňuje průběh a působení jednotlivých napětí. Hodnota meze pevnosti ve statickém ohybu se průměrně pohybuje v rozmezí 90 až 100 MPa, přičemž mez úměrnosti se uvažuje průměrně 70 % meze pevnosti. (Matovič, 1993)



Obrázek 9 – Zatížení dřeva v ohybu (Matovič, 1993)



Obrázek 10 – Průběh napětí při zatížení dřeva v ohybu (Babiak, 2001)

(Faktory ovlivňující statickou pevnost dřeva)

Statická pevnost je ovlivněna vlhkostí dřeva, přičemž oproti pevnosti v tlaku a tahu do vlhkosti 5 až 8 % roste. Zvyšuje se také lineárně s rostoucí hustotou. Je zde však určitá variabilita. S nárůstem teploty však klesá, což výrazně ovlivňuje tepelně upravené dřevo.

Důležitým faktorem u pevnosti v ohybu je také odklon vláken od podélné osy tělesa a vady dřeva, například suky, kdy v tlakové zóně nejvíce tuto pevnost snižují. (Matovič, 1993)

Pevnost v tlaku

S přihlédnutím k anizotropnímu charakteru dřeva se stanovuje pevnost v tlaku ve směru či napříč vláken v tangenciálním či radiálním směru. Při působení tlaku podél vláken dřeva dochází v tlakové zóně k deformacím, kdy vlákna mění svou původní délku a dochází k jejich zkrácení (Matovič, 1993). Velikost této deformace závisí zejména na pevnosti buněčné struktury, kdy hlavním elementem přenášejícím toto napětí i deformace jsou u listnatých dřevin libriformní vlákna (Požgaj et al., 1993). V radiálním směru je odpor proti deformaci mírně vyšší než ve směru tangenciálním (Dinwoodie, 2017). Průměrná hodnota meze pevnosti v tlaku podél vláken dřeva při absolutní vlhkosti 12 % dosahuje 50 MPa a je přibližně 10x vyšší než pevnost v tlaku napříč vláken. Hodnota napětí v tlaku podél vláken se pohybuje v rozmezí 50-70 % z meze pevnosti. (Matovič, 1993)

Faktory ovlivňující pevnost dřeva v tlaku

Pevnost v tlaku je ovlivněna vlhkostí, přičemž s rostoucí vlhkostí po mez hygroscopicity klesá. ČSN 49 0110 uvádí opravný koeficient pro všechny dřeviny 0,04 (ČSN 49 0110). Tento koeficient tedy značí změnu 4 % této pevnosti se změnou vlhkosti o 1 %. Tlaková pevnost se s rostoucí hustotou dřeva zvyšuje, tento vztah bývá lineární. Roli hraje také odklon vláken od podélné osy, který při 15° může zapříčinit pokles pevnosti až o 20 %. (Matovič, 1993)

3.1.1 Houževnatost dřeva

Rázovou houževnatost, taktéž nazývanou přerážecí prací, lze popsat jako schopnost dřeva odolávat a pohlcovat dynamické zatížení, vyvolané rázovým ohybem. Pro určení rázové houževnatosti bývají použita přerážecí kladiva ku příkladu Charpyho kladivo. Základním principem dynamického ohybu je stanovit velikost vykonané práce způsobené Charpyho kladivem, která přerazila zkušební vzorek s určenými rozměry. Práce spotřebovaná na přerážení dřeva bývá vyjádřena na plochu průřezu tělesa, tedy J/cm². (Matovič, 1993)

Faktory ovlivňující rázovou houževnatost dřeva

Výsledné hodnoty rázové houževnatosti jsou nejvíce ovlivněné rozměry tělesa, tedy svou délkou a výškou. Ideální poměr délky a výšky by měl být 12, pokud je vyšší tak rázová houževnatost roste pozvolně. Pokud je poměr nižší než 12 tak hodnota rázového ohybu

prudce narůstá. Neméně podstatnou roli má také vlhkost, kdy do meze hygroskopicity rázovou houževnatost lehce snižuje, nad mezí už je neměnná. (Matovič, 1993)

3.1.2 Pružnost dřeva

Pružnost dřeva definovanou jako schopnost dřeva absorbovat energii v rámci pružných deformací a poté ji využít k návratu do původního stavu, jakmile ustane působení vnějšího zatížení (Požgaj et al., 1993). Pružnost dřeva umožňuje tělesu návrat ke svému původnímu tvaru a rozměrům. Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor dřeva vůči pružné deformaci (Gandelová et al., 2009). Moduly pružnosti lze rozlišit na moduly při normálových namáhání – Youngovy moduly pružnosti E a smykové moduly G při tangenciálních namáháních ve smyku a krutu. Youngovy moduly se určují při zatížení v tlaku, tahu a ohybu. V tahu a v tlaku se stanovují ve směru vláken či kolmo na vlákna v radiálním i tangenciálním směru. (Matovič, 1993)

Modul pružnosti při statickém ohybu

Z normálového namáhání tělesa způsobeného ohybovým momentem lze odvodit příslušný modul pružnosti. U zatížení v ohybu je udáván pouze modul pružnosti ve směru kolmém k vláknům, ten je zkoušen výhradně v tangenciálním směru. Jsou rozlišovány dva metodické postupy pro stanovení statického modulu pružnosti. Prvním možným postupem je zatížení dřeva tříbodovým ohybem, u kterého dochází ke vzniku smykového napětí. Druhým postupem je zatížení čtyřbodovým ohybem, přičemž u tohoto napětí dochází k eliminaci vzniku smykového napětí. (Dinwoodie, 2017; Gandelová et al., 2009; Matovič, 1993)

Statický modul pružnosti ve tříbodovém ohybu je možné vyčíslit ze vztahu uvedeného v podkapitole 4.3.2.

Modul pružnosti v tlaku

Modul pružnosti v tlaku je dán podílem napětí a poměrné deformace. Při absolutní vlhkosti dřeva 12 % se průměrná hodnota modulu pružnosti v tlaku ve směru vláken dřeva pohybuje v rozmezí mezi 10 000 a 15 000 MPa (Matovič, 1993). V směru kolmém k vláknům je tato hodnota až 25x nižší, zatímco v radiálním směru bývá o 20–50 % vyšší než v tangenciálním směru (Gandelová et al., 2009).

Modul pružnosti v tlaku je možné vyčíslit ze vztahu uvedeného v podkapitole 4.3.4.

3.7 Termicky modifikované dřevo

Dřevo, které prošlo procesem termické modifikace, tedy tepelnou úpravou se nazývá termodřevo, komerčně také ThermoWood. U tepelně upraveného dřeva cíleně dochází ke změnám chemické struktury buněčné stěny vlivem použití páry a vysokých teplot vyšších než 160 °C (Sandberg et al., 2017). Zahřívání dřeva trvale nemění jen chemické vlastnosti ale, i fyzikální vlastnosti, přičemž tato změna vlastností je způsobena především tepelnou degradací hemicelulóz. Tepelně modifikované dřevo se při této úpravě stává odolnější vůči vodě i biologickým škůdcům (ITA, 2003). Tato metoda úpravy dřeva může být využita pro různé druhy dřevin různých rozměrů (Sandberg et al., 2017).

3.7.1 Výroba termodřeva

Tepelná úprava výrobní probíhá ve speciálních komorách, kde je dřevo vystaveno vysokým teplotám od 160 do 240 °C a kontrolovanému přísunu kyslíku, aby nedošlo k samovznícení upravovaného dřeva (Reinprecht, 2011). Při procesu výroby se nevyužívají žádné chemikálie, jen vodní pára a teplo, což z hlediska výroby i použití dělá tento materiál ekologicky šetrnějším (Čekovská et al., 2017). Teplo je produkováno elektrickými topnými tělesy, maximální teplota úpravy určuje účel, pro který bude dřevo využito. Termické úpravě lze podrobit jak suché, tak mokré dřevo převážně méně odolných druhů dřevin, jako je smrk, borovice, dub, buk, jasan, bříza, osika, a další (Sandberg et al., 2017).

ITA (2003) rozděluje výrobní proces do tří etap (viz graf):

Etapa 1 - Ohřev a vysokoteplotní sušení

V sušící komoře dochází k rychlému ohřevu na teplotu 100 °C pomocí horké páry nebo vzduchu. Následně se teplota v komoře zvyšuje až na 130 °C, a při tom dochází k sušení. Během tohoto procesu vysokoteplotního sušení se ze dřeva vytrácí voda volná i vázaná a obsah vlhkosti tím klesá na téměř nulovou hodnotu. Tato etapa trvá nejdelší dobu z celého procesu výroby a je závislá na vstupní relativní vlhkosti, druhu dřeviny a tloušťce materiálu. (ITA, 2003)

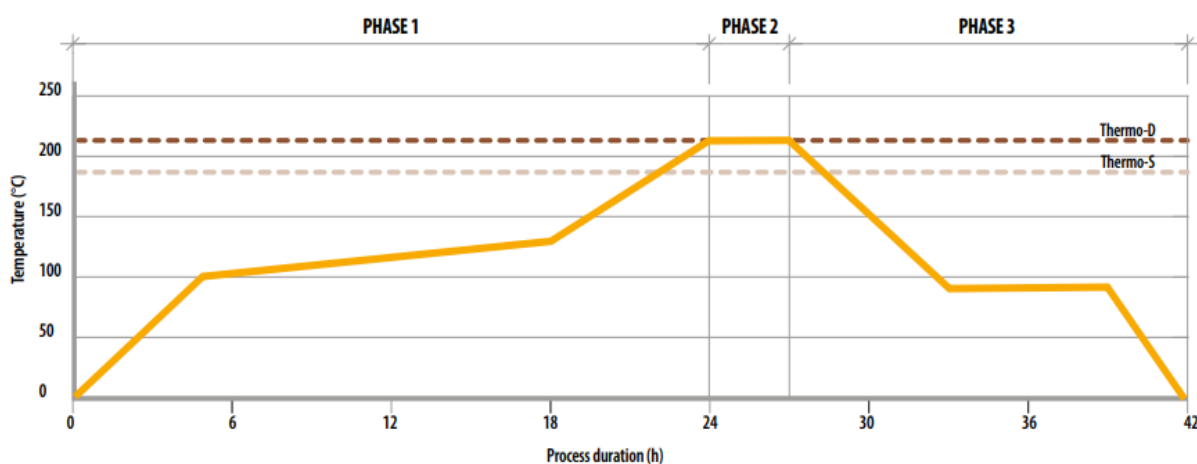
Etapa 2 - Termická modifikace

Po skončení vysokoteplotního sušení dochází v komoře ke zvýšení teploty na 185 až 215 °C (případně i 240 °C), kdy určená teplota zůstane konstantní po dobu 2 až 3 hodin. Výška cílové teploty a doba působení teploty je odvislá od požadavků a účelu konečného použití (Thermo-S nebo Thermo-D). (ITA, 2003)

Etapa 3 - Chlazení a klimatizace

V průběhu poslední třetí fáze bývá teplota v komoře snižována pomocí vodního postřikového systému, dokud se nesníží teplota na 80–90 °C. Při těchto teplotách je materiál opětovně zvlhčován na úroveň 4-7 % relativní vlhkosti.

Po hlavní fázi tepelné úpravy je nutné dřevo klimatizovat. Při této klimatizaci je kontrolován přísun a teplota vzduchu, aby nedocházelo ke vzniku trhlin. Fáze výsledného vyrovnaní vlhkostí se pohybuje mezi 5–15 hodinami podle stupně tepelného ošetření a druhu dřeviny. (ITA, 2003)



Obrázek 11 – Průběh tepelné úpravy (ITA, 2003)

Existuje mnoho technologií, kterými může být dřevo tepelně upravené. Ve všech technologiích je dřevo vystavená vysoké teplotě, jen se odlišuje typ prostředí, ve kterém teplota působí (Reinprecht, 2011).

Sandberg et al. (2017) uvádí, že v Evropě se využívají nejvíce tyto metody termických úprav:

- příprava v atmosféře vzduchu (Finsko) – ThermoWood,
- příprava v prostředí vodní páry (Nizozemsko) – PlatoWood,
- příprava v prostředí inertních plynů (Francie) – RetificatedWood,
- příprava v olejích (Německo) – OHTWood.

3.7.2 Dělení termodřeva

Termická úprava Thermowood se provádí ve dvou standardní třídách. Nazývají se Thermo-S a Thermo-D, kdy rozdíl mezi těmito třídami se liší v technologických parametrech jako je čas a teplota úpravy. V neposlední řadě se také rozlišuje praktické využití dané třídy.

Thermowood – S se vyznačuje stálostí a vzhledem. Proces termické modifikace listnatých dřevin probíhá při teplotě 185 ± 3 °C, u jehličnatých dřevin při teplotě 190 ± 3 °C. Výsledná biologická odolnost výrobků je zařazena do třídy 3 jako středně odolné. Produkty

Thermo-S se doporučuje používat především v suchém prostředí v interiéru jako obklady stěn, vnitřní panely, parkety, kuchyňský či koupelnový nábytek. Ovšem je možné ho pro své vlastnosti získané úpravou použít i v saunách. (ITA, 2003)

Thermowood – D je využíváno pro svou trvanlivost. Proces tepelného ošetření dřevin probíhá při vyšší teplotách, než u třídy Thermo-S, a to u listnáčů při 200 ± 3 °C a 212 ± 3 °C u jehličnanů. Výsledná biologická odolnost výrobků je zařazena do třídy 2 jako odolné, proto jsou výrobky vhodné pro využití v exteriéru jako obklady budov, dveře a okna, zahradní nábytek či jako plot. (ITA, 2003)

3.7.1 Vlastnosti termodřeva

Tepelná modifikace dřeva transformuje vlastnosti dřeva a přináší jeho nové kvality, které jsou získány působením vysokých teplot. Tepelně modifikované dřevo má odlišnou chemickou strukturu a tím i mechanické a fyzikální vlastnosti oproti neupravenému dřevu. (ITA, 2003; Korkut et al., 2008; Sandberg et al., 2017)

Změny chemické struktury dřeva

Dřevo se skládá z hlavních složek – hemicelulózy, celulóza, lignin a doprovodných extraktivních látek (Jurczykova a Kačík, 2020). U těchto hlavních složek dochází vlivem tepelné úpravy ke změnám v jejich chemické stavbě. Rozsah těchto změn je ovlivněn výslednou hodnotou teploty modifikace a délkou působení (Esteves a Pereira, 2009).

Z hlavních složek dřeva se jako první začnou měnit hemicelulózy, protože jsou nejméně odolné vůči termickému rozkladu. Degradace hemicelulóz začíná deacetylací, při které vzniká kyselina octová, která působí jako katalyzátor depolymerizace (Jurczykova a Kačík, 2020). Degradace hemicelulózy nastává při 200–260 °C, přičemž změny vlastností se objevují již při teplotě okolo 150 °C. S rozkladem hemicelulóz se snižuje také koncentrace hydroxylových skupin, které jsou schopné adsorbovat vodu a v důsledku toho se zlepšuje rozměrová stabilita upraveného dřeva (ITA, 2003).

Celulóza lépe odolává termickému působení v porovnání s hemicelulózami, a to nejspíše v důsledku své krystalické struktury. Odbouráním amorfni části celulózy se zvyšuje její obsah, což zhorší přístup molekulám vody a tím dojde k poklesu rovnovážné vlhkosti. Zvýšení obsahu celulózy v kombinaci s degradací hemicelulóz se zvyšuje odolnost proti houbám a jiným biotickým činitelům. (Esteves a Pereira, 2009; Jurczykova a Kačík, 2020) Degradace celulózy nastává při teplotě 240–350 °C (ITA, 2003).

Lignin je nejvíce termicky odolnou složkou dřeva. Některé studie uvádějí, že lignin degraduje a dochází k jeho plastifikaci již při nízkých teplotách, jiné další studie zase

uvádějí, že lignin při působení teplot do 220 °C v podstatě nedegraduje vůbec, či výrazně méně než polysacharidická část tedy celulóza a hemicelulózy. (Esteves a Pereira, 2009)

Extraktiva jsou ve dřevě zastoupeny v malém množství, které je udávané do 5 %. Mezi extraktiva je možné zařadit terpeny, vosky tuky či fenoly (ITA, 2003). Většina těchto látek během úpravy vymizí, či zdegradují a nijak neovlivňují většinu vlastností (Esteves a Pereira, 2009).

Změny fyzikálních vlastností

Klíčovou vlastností a hlavním důvodem procesu tepelné úpravy je snížení obsahu rovnovážné vlhkosti v upraveném dřevě. Tato vlastnost je neměnná i přes vystavení měnícímu se prostředí a jeho podmínek. V jaké míře dojde ke zlepšení rovnovážné vlhkosti dřeva je odvislé především od druhu dřeviny, teploty i času modifikace a vliv má také prostředí úpravy (Esteves a Pereira, 2009). Při tepelné úpravě za působení teplot od 180 do 220 °C dochází ke snížení rovnovážné vlhkosti přibližně na 6-9 % absolutní vlhkosti v prostředí, které má parametry 65 % vlhkosti a teplotu 20 °C a to odpovídá 12 % absolutní vlhkosti (Korkut et al., 2008). Za možné příčiny, při kterých dochází ke snížení rovnovážné vlhkosti, lze považovat pokles hydroxylových skupin hemicelulóz a také nárůst krystalické celulózy. Pokles rovnovážné vlhkosti dřeva vlivem tepelné úpravy vede ke zlepšení rozměrové stálosti dřeva. Dřevo vykazuje nižší hodnoty bobtnání a sesychání. Tento fakt je zapříčiněn nejen sníženou hygroskopicitou ale i částečnou degradací ligninu. (Esteves a Pereira, 2009) Rozměrová stabilita je závislá také na druhu dřeviny (Sandberg et al., 2017).

Při procesu tepelné úpravy dochází k úbytku hmotnosti dřeva a tím mění i své rozměry, které se zmenšují. Úbytek hmotnosti je stejně jako rovnovážná vlhkost závislá na druhu



Obrázek 12- Změna barvy dřeva vlivem teploty úpravy (ITA, 2003)

dřeviny, teplotě i času modifikace (Esteves a Pereira, 2009). Se změnou hmotnosti i rozměrů je spojena i změna hustoty, přičemž tepelně modifikované dřevo má nižší hustotu než dřevo neupravené. (ITA, 2003)

Tepelná úprava dřeva mění jeho barvu a dřevo po procesu ztmavne (Obr.). Barevná změna je závislá na různých faktorech, jako je délka a teplota úpravy, přičemž s vyšší teplotou je barva dřeva tmavší. Dalšími faktory jsou druh dřeviny a prostředí, přičemž dřevo při úpravě ve vzduchu ztmavne více než kdyby bylo upraveno v prostředí páry. (Esteves a Pereira, 2009). Barčík et al. (2014) uvádí, že nejvýraznější změny barvy nastávají při teplotách vyšších než 200 °C. Za změnou barvy stojí chemická degradace hemicelulóz a množství extraktiv, která ve dřevě po tepelné úpravě přetrvávají (Esteves a Pereira, 2009).

Změny mechanických vlastností

Zhoršení mechanických vlastností je považováno jako největší nevýhodou termicky modifikovaného dřeva. Tepelným zpracováním jsou nejvíce ovlivněny pevnosti ve statickém a dynamickém ohybu. Pokles těchto pevností je závislý na podmínkách tepelné úpravy a druhu dřeviny, kdy jehličnaté dřeviny jsou odolnější než listnaté dřeviny. Termickou úpravou při nižších teplotách se razantně pevnost v ohybu nesnižuje, ztráta pevnosti se začíná projevovat při teplotách vyšších než 220 °C. Naopak u rázové houževnatosti dochází k poklesu pevnosti již při teplotě 170 až 180 °C a dochází tím ke snížení pevnosti nejméně o 30 %. Hodnoty pevnosti v tlaku podél vláken tepelně upraveného dřeva jsou vyšší než u neupraveného dřeva. Modul pružnosti ve statickém ohybu při nižších teplotách úpravy má rostoucí trend. Až při vyšších teplotách úpravy, při které dřevo ztrácí větší množství hmoty, modul klesá (Esteves a Pereira, 2009). Z důvodu poklesu výše popsaných mechanických vlastností se modifikované dřevo nedoporučuje používat jako konstrukční prvek nosných konstrukcí (ITA, 2003).

4 Metodika

4.1 Příprava vzorků a klimatizace

Vytěžení reprezentativních zástupců přípravných dřevin probíhalo v Kostelci nad Černými lesy, kde se z každé dřeviny vymanipulovaly 3-4 výškové sekce. Následně byla kulatina rozmítána na středové a boční řezivo které se nechalo vyschnout na cca 15 %. Zkušební vzorky o rozměrech $20 \times 20 \times 300$ mm (šířka \times výška \times délka) byly vyhotoveny z listnatých dřevin, konkrétně ze dřeva topolu osiky, olše lepkavé a vrby jívy a jeřábu ptačího v paralelních sériích. Zkušební tělesa se rozdělila do tří sérií, kdy první byla neupravená referenční, druhá tepelně upravená při $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ a třetí při $190\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro snadnější identifikaci těles jim byl přiřazen trojmístný kód, kdy první číslo značilo druh dřeviny, druhé pořadí v lati a třetí stupeň termické úpravy. Pro měření pevnosti ve statickém a dynamickém ohybu byla použita zkušební tělesa o rozměrech $20 \times 20 \times 300$ mm. Vzorků o těchto rozměrech bylo vyrobeno 381 kusů, přičemž 202 se využilo pro stanovení statického ohybu a zbylý počet 179 kusů pro stanovení rázové houževnatosti. Z uvedených vzorků byly následně odřezány konce o délce 30 mm, pro dostatečné množství vzorků bylo uřezáváno i více konců. Zkušební tělesa o rozměrech $20 \times 20 \times 30$ mm (šířka \times výška \times délka) sloužily pro měření pevnosti v tlaku a pro stanovení vlhkosti. Vzorků o těchto rozměrech bylo vyrobeno 642 kusů.

Po termické úpravě těles je bylo nutné klimatizovat. Tělesa byla v prostředí klimatizační komory od společnosti Weisstechnik (Obr.13). Na klimatizační skříní byly nastaveny dva hlavní parametry ovlivňující vlhkost dřeva, a to relativní vlhkost vzduchu,



Obrázek 13 – Vzorky v klimatizační komoře (autor)

4.2 Termická úprava

Proces termické modifikace se uskutečnil v externím výzkumném areálu v Kostelci nad Černými lesy. Vzorky byly uloženy do speciální termokomory vyrobené společností Katres (Obr.!). Jako způsob tepelné úpravy byl použit finský způsob ThermoWood zmíněný v podkapitole 3.4.1. Ze tří sérií vzorků se dvě podrobily tepelné úpravě při teplotě 170 a 190 °C a jedna série byla ponechána bez úpravy jako referenční.



Obrázek 14 – Termokomora (autor)

4.3 Měření fyzikálních a mechanických vlastností

Veškeré měření hodnot zkoumaných fyzikálních i mechanických vlastností se uskutečnilo v laboratořích Fakulty lesnické a dřevařské na České zemědělské univerzitě v letním období roku 2023. Seznam kapitol v metodice je seřazen postupně, přesně tak, jak probíhala práce na měření vzorků.

4.3.1 Hustota

Zjištění hustoty proběhlo v souladu s normou ČSN 49 0108. Tato norma uvádí postup stanovení hmotnosti a objemu dřeva při dané vlhkosti. Pro měření rozměrů zkušebních těles s přesností 0,01 mm bylo vyžito digitální posuvné měřítko značky Kinex. Pro stanovení hmotnosti jednotlivých vzorků s přesností na 0,01 g byla použita digitální laboratorní váha značky Kern (viz obr.!). Rozměry a hmotnosti všech zkušebních vzorků byly stanoveny po

klimatizaci na 12 % absolutní vlhkost dřeva. Pro výpočet hustoty při dané vlhkosti byl využit následující vztah:

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

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], (ČSN 49 0108).



Obrázek 15 – Laboratorní váha a digitální posuvné měřítko (autor)

4.3.2 Pevnost ve statickém ohybu a statický modul pružnosti

Pro zkoušku pevnosti v třibodovém ohybu a modulu pružnosti byl využit zkušební stroj TIRA 2850 S (Obr.16), který vyvine maximální zatížení 50 kN. Zkušební zařízení je opatřeno softwarem TIRA-test, ve kterém je možné nastavit vstupní základní parametry (rozměry vzorku, rychlost zatížení atd.) nezbytné pro průběh zkoušky. Princip zkoušky je založen na působení síly kolmo k vláknům zkušebního tělesa v tangenciálním směru čili na radiální plochu tělesa. Zkušební těleso o rozměru $20 \times 20 \times 300$ mm bylo uloženo na dvou podpěrách, kdy vzdálenost jejich středů od sebe měřila 240 mm. K maximálnímu zatížení docházelo za 60 sekund s odchylkou ± 30 s a k tomuto časovému parametru byla nastávána příslušná rychlost zatížení.

K výpočtu pevnosti v třibodovém ohybu byl využit vztah:

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

σ_w – pevnost ve statickém ohybu při dané vlhkosti [MPa],

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

l – vzdálenost mezi středy podpěr [mm],

b – šířka zkušebního tělesa [mm],

h – výška zkušebního tělesa [mm], (ČSN 49 0115).

Pro výpočet statického modulu pružnosti byl využit následující vztah:

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

E_w – statický modul pružnosti při dané vlhkosti [MPa],

l – vzdálenost mezi středy podpěr [mm],

ΔF – rozdíl sil při 10 % a 40 % z maximální zatížení [N],

b – šířka tělesa [mm],

h – výška tělesa [mm],

Δf – rozdíl průhybu při 10 % a 40 % z maximální zatížení [mm], (ČSN EN 310).



Obrázek 16 Zkušební zařízení TIRA 2850 S (autor)

4.3.3 Rázová houževnatost v ohybu

Při stanovení hodnot rázové houževnatosti v ohybu bylo vycházeno z normy ČSN 49 0117. Tato norma uvádí základní metodický postup, při kterém Charpyho kladivo (Obr.17) vykonalo mechanickou přerážecí práci. Při zkoušení dynamického ohybu byla zkušební tělesa o rozměrech $20 \times 20 \times 300$ mm symetricky uložena na podpěry tak, aby porušení úderem kyvadlového kladivo nastalo v tangenciálním směru, tedy radiální ploše zkušebního tělesa.

Po provedení zkoušky bylo ze stupnice odečteno množství pohlcené práce, které bylo spotřebováno pro přeražení zkušební vzorku. Tato odečtená hodnota byla následně přepočtena na plochu tělesa pomocí vztahu:

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

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

Q – práce spotřebovaná na přeražení tělesa [J],

b, h – rozměry tělesa [cm], (ČSN 49 0117).



Obrázek 17 – Charpyho kladivo (autor)

4.3.4 Pevnost v tlaku podél vláken a modul pružnosti v tlaku

Jak již bylo zmíněno výše na začátku kapitoly metodiky, tak zkušební vzorky pro stanovení pevnosti v tlaku podél vláken vznikly odřezáním konců vzorků po zkoušce rázové houževnatosti. Zkušební tělesa z odřezaných konců byla vyhotovena o rozměrech $20 \times 20 \times 30$ mm a změřena s přesností na 0,01 mm. Metodický postup zkoušení proběhl v souladu s normou ČSN 49 0110. Podstatou této metody bylo zjištění maximálního zatížení, které způsobilo porušení zkušebních těles. Jako zkušební zařízení byl využit stroj UTS 50 (Obr.18). Vzorky do zařízení UTS 50 byly ukládány tak, aby tlakové zatížení působilo ve směru rovnoběžným s vlákny a rychlost zatěžování byla nastavena tak, aby k maximálnímu zatížení došlo za 60 sekund s odchylkou ± 30 s a došlo tak k porušení tělesa.

K výpočtu pevnosti v tlaku podél vláken byl využit vztah:

$$\sigma_w = \frac{F_{max}}{a \cdot b} [MPa]$$

σ_w – pevnost v tlaku při dané vlhkosti [MPa],

F_{max} – hodnota maximálního zatížení [N],

a, b – příčné rozměry zkušebního tělesa [mm], (ČSN 49 0110).

Pro výpočet modulu pružnosti v tlaku ve směru vláken byl využit následující vztah:

$$E_w = \frac{\Delta F \cdot l}{a \cdot b \cdot \Delta l} [MPa]$$

E_w – modul pružnosti v tlaku ve směru vláken při dané vlhkosti [MPa],

ΔF – rozdíl sil při 10 % a 40 % z maximální zatížení [N],

l – vzdálenost mezi hroty tenzometru [mm],

a, b – příčné rozměry zkušebního tělesa [mm],

Δl – rozdíl průhybu při 10 % a 40 % z maximální zatížení [mm], (ČSN 49 0111).



Obrázek 18 – Zkušební stroj UTS 50 (autor)

4.3.5 Absolutní vlhkost

Po vykonání zkoušky pevnosti v tlaku bylo náhodně vybráno 20 vzorků od jednotlivých druhů dřeviny z již odzkoušených vzorků. Tyto vzorky byly zváženy na digitální laboratorní váze s přesností na 0,01 g (Obr. 19). Po tomto kroku následoval proces sušení, při kterém byla tělesa sušena v sušárně (Obr.20) při teplotě 103 ± 2 °C, a to až po dobu, kdy nedocházelo k úbytku váhy. Jednotlivé vzorky byly ze sušárny vyndávány a následoval znovu proces vážení.

Po získání hmotností vzorků se postupovalo při výpočtu absolutní vlhkosti ze vztahu:

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

w_{abs} – absolutní vlhkost dřeva [%]

m_w – hmotnost vlhkého dřeva [g],

m_0 – hmotnost absolutně suchého dřeva [g], (ČSN 49 0103).



Obrázek 19 – Sušárna (autor)



Obrázek 20 – Vážení vzorku (autor)

4.3.6 Statistické vyhodnocení dat

Výsledky a data zkoumaných vlastností byly zpracovány v grafické a tabelární podobě. Neměřené data a výsledné hodnoty zkoumaných vlastností byly zaznamenávány v programu Microsoft Excel, který také sloužil i pro tabelární zpracování. Grafy byly zpracovány v programu STATISTICA 14, kde byla použita jednofaktorová a vícefaktorová analýza rozptylu ANOVA, která vystihla trend hodnocených vlastností. K určení, zda existuje mezi hodnocenými vlastnostmi a jednotlivými dřevinami statisticky významný rozdíl byl využit Duncanův post-hoc test. Ke grafům byly dotvořeny příslušné tabulky obsahující základní popisné statistické údaje. Jako hladina statistické významnosti byla určena hodnota $\alpha = 0,05$ %

5 Výsledky a diskuse

Tabulka 1 uvádí souhrn procentuálních změn jednotlivých sledovaných vlastností termicky upraveného dřeva v porovnání s referenčním. Z tabulky lze také pozorovat trend hodnot v závislosti na úpravě.

Tabulka 1- Přehled změn vlastností upraveného dřeva v porovnání s referenčním v %

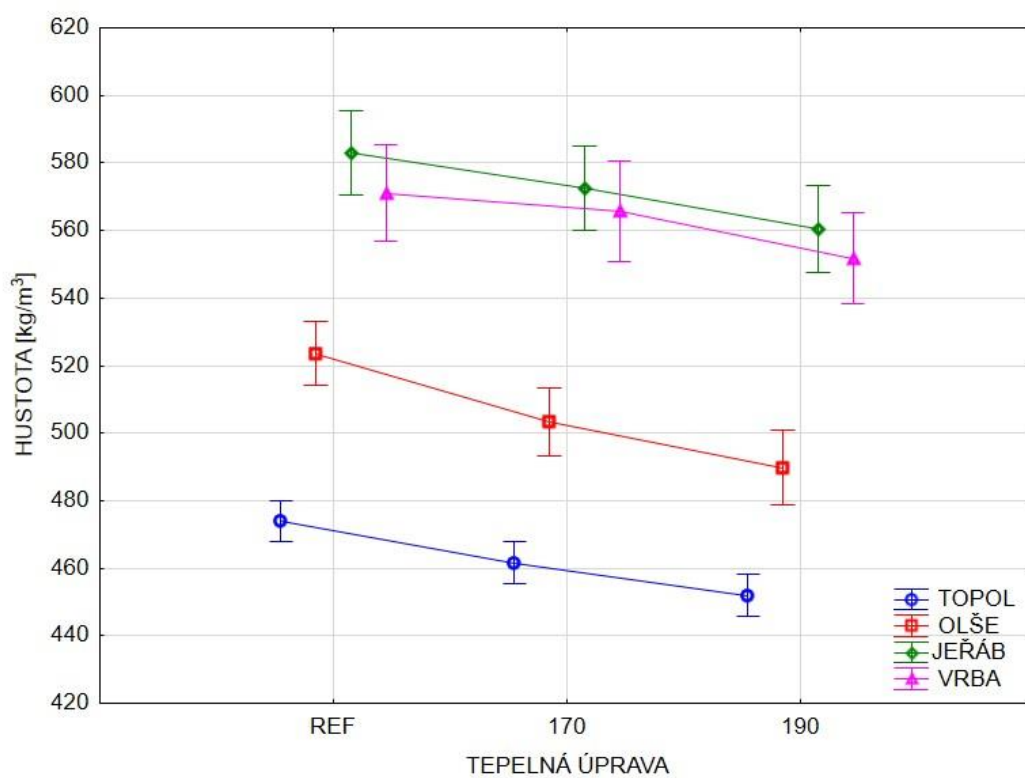
	Stupeň tepelné úpravy	Topol osika	Olše lepkavá	Jeřáb ptačí	Vrba jíva
Hustota	170/REF	-2,6	-4,0	-1,7	-0,9
	190/REF	-4,6	-6,5	-3,9	-3,3
Pevnost v tlaku podél vláken	170/REF	17,1	21,8	15,1	16,5
	190/REF	22,7	27,1	25,2	40,6
Modul pružnosti v tlaku	170/REF	11,2	24,4	10,1	-14,4
	190/REF	16,4	20,9	14,7	-0,8
Vlhkost	170/REF	-26,0	-28,7	-21,9	-27,0
	190/REF	-36,5	-43,5	-39,0	-43,2
Pevnost ve statickém ohybu	170/REF	-2,7	-	-	-
	190/REF	-20,8	-	-	-
Modul pružnosti ve statickém ohybu	170/REF	-0,3	-	-	-
	190/REF	-1,7	-	-	-
Rázová houževnatost	170/REF	-54,0	-	-	-
	190/REF	-71,4	-	-	-

Hustota

Během tepelné úpravy dochází u dřeva k poklesu hustoty, přičemž tento fakt je zapříčiněn ztrátou hmotnosti a tím i svého objemu (ITA, 2003). Gündüz et al., (2007) uvádí, že hustota je klesající s rostoucí teplotou a časem. Z tabulky 2 a grafu 1 lze pozorovat mírný pokles průměrných hodnot hustoty jednotlivých dřevin v závislosti na teplotě úpravy. Vzorky, které prošly tepelnou úpravou při 190 °C měly nižší hustotu po úpravě při 170 °C. Statisticky významný rozdíl hustoty byl prokázán u dřeva topolu a olše upravených při 190 °C, kdy dřevo topolu pokleslo o 4,6 % a olše o 6,5 % oproti referenčnímu dřevu. Hodnoty hustoty byly stanoveny při parametrech prostředí s relativní vlhkostí vzduchu 65 % a teplotou 20 °C.

Tabulka 2 - Popisné statistické údaje hustoty v kg/m^3

Dřevina	Úprava	Počet vzorků	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Topol osika	REF	196	474	397	587	31	6,6
	170	191	462	365	597	34	7,5
	190	186	452	344	552	35	7,8
Olše lepkavá	REF	80	524	352	793	42	8,10
	170	71	503	464	536	18	3,5
	190	58	490	432	550	24	5,0
Jeřáb ptačí	REF	46	583	494	686	51	8,7
	170	45	573	475	665	58	10,1
	190	43	560	460	650	61	10,89
Vrba jíva	REF	35	571	245	680	87	15,2
	170	33	566	429	616	48	8,5
	190	39	552	282	612	87	15,8



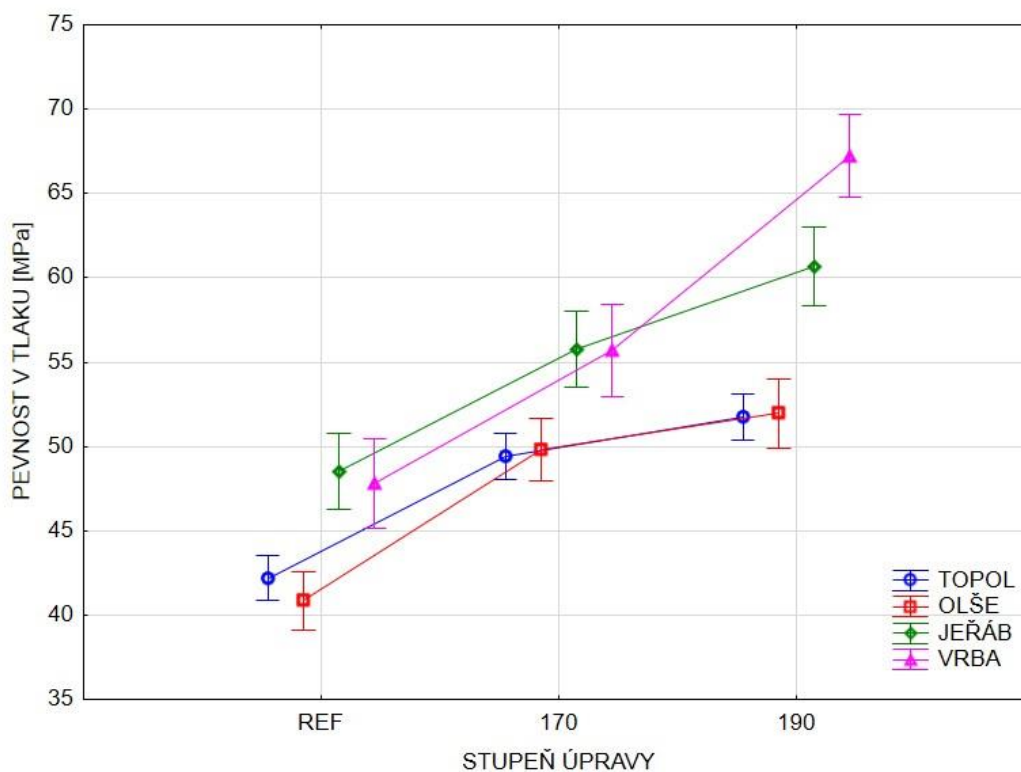
Graf 1 - Vliv tepelné úpravy na hustotu

Pevnost v tlaku podél vláken a modul pružnosti

V tabulce (tab !) jsou uvedené průměrné hodnoty pevnosti v tlaku jednotlivých dřevin. Pro zjištění statistické významnosti hodnot pevnosti mezi jednotlivými dřevinami bylo využito Duncunova testu (příloha !). Na grafu (graf !) lze pozorovat u všech dřevin rostoucí trend pevnosti v ohybu v závislosti na stupni úpravy. Nejvyšší nárůst pevnosti měla oproti referenčnímu dřevu vrba upravená při 190 °C kdy nárůst činil 40,6 %. Podobné výsledky jsou uvedené v Thermowood handbooku (ITA, 2003) pro dřevo smrku.

Percin et al. (2018) uvádí nárůst pevnosti v tlaku upraveného bukového dřeva při 175 °C po dobu 5 hodin o 19,3 %. Tomuto zvýšení pevnosti odpovídají hodnoty naměřené u dřeva topolu upraveného při 170 °C v této práci. Jeho pevnost se zvýšila o 17,1 % oproti referenční sadě. Hannouz et al. (2015) zjistili u dřeva jasanu zvýšení pevnosti v tlaku při 210 °C o 11 %. Jeřáb naměřený v této práci upravený při 170 °C vykazoval nárůst pevnosti o 15,1 %. Kol et al. (2015) u dřeva jedle zaznamenal 13 % navýšení pevnosti v tlaku při teplotě 210 °C, přičemž vrba ošetřená při 170 °C v této práci má nárůst pevnosti 16,5 %.

Boonstra (2007) modifikoval dřevo smrku dvoufázovým procesem, přičemž první fáze byla hydrolýza při 165 °C dlouhá 0,5 hodiny a v druhé fázi proběhla termická úprava při 180 °C po dobu 6 hodin. Dřevo po úpravě vykazovalo nárůst pevnosti o 28 %. Výše zmíněný nárůst je nejvíce podobný dřevu olše upravené při 170 °C, která zvýšila svou pevnost o 27,1 %.



Graf 2 - Vliv tepelné úpravy na pevnost v tlaku

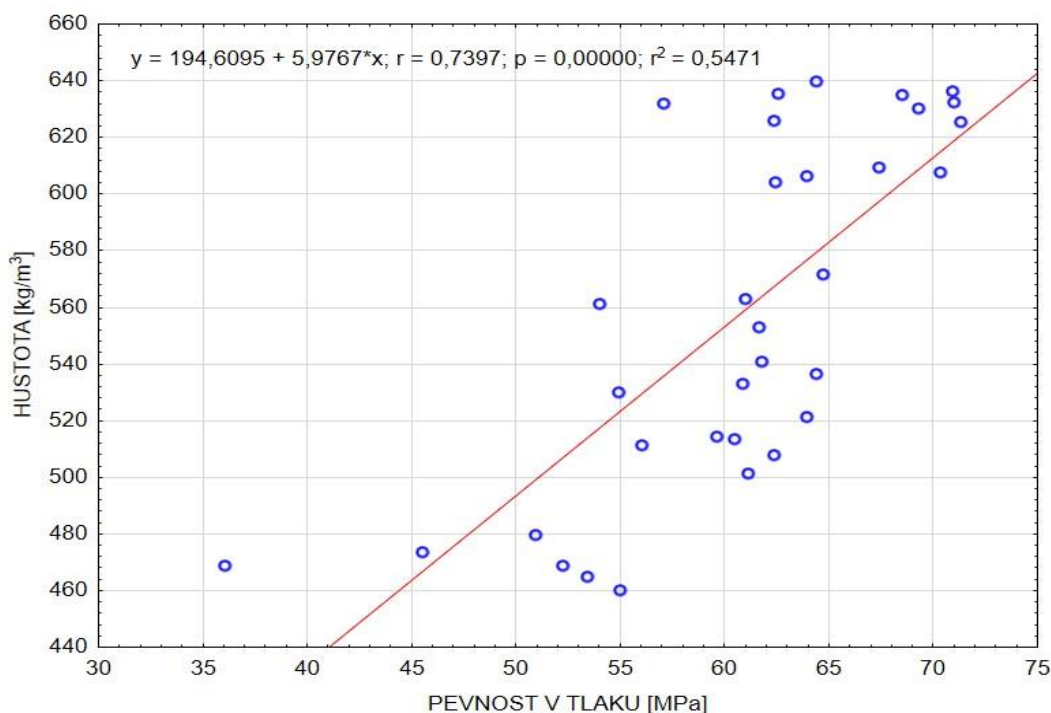
Za možné důvody zvýšení pevnosti v tlaku lze považovat degradaci hemicelulóz a zvýšený obsah krystalické celulózy v důsledku degradace anebo krystalizace amorfni celulózy (Boonstra, 2007).

Tabulka 3 - Popisné statistické údaje pevnosti v tlaku v MPa

Dřevina	Úprava	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Topol osika	REF	42,2	30,6	49,9	3,7	8,8
	170	49,4	34,7	58,9	5,0	10,2
	190	51,8	33,7	66,7	5,8	11,1
Olše lepkavá	REF	40,9	28,0	48,7	4,4	10,8
	170	49,8	38,5	59,2	4,1	8,2
	190	52,0	25,5	62,5	7,2	13,8
Jeřáb ptačí	REF	48,5	40,0	65,5	6,2	12,8
	170	55,8	36,3	68,8	5,2	9,3
	190	60,7	36,1	71,3	7,7	12,6
Vrba jíva	REF	47,8	12,2	61,9	13,6	28,5
	170	55,7	35,7	72,9	11,5	20,6
	190	67,2	21,1	81,0	15,4	22,9

Závislost modulu pružnosti na pevnosti v tlaku u vrby upravené při 190 °C byla prokázána vysoká závislost korelačním koeficientem o hodnotě 0,767. Graf je uveden v příloze 4.

Na grafu je prezentována závislosti pevnosti v ohybu na hustotě u dřeva jeřábu upraveného při 190 °C. Korelační koeficient o hodnotě 0,7397 indikuje vysokou závislost těchto hodnot.

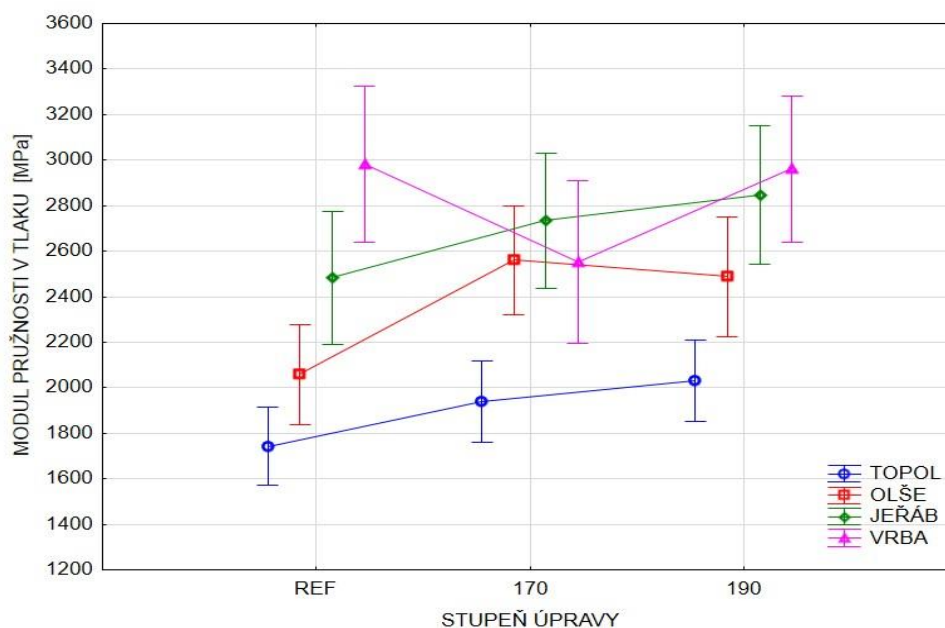


Graf 3 - Závislost pevnosti v tlaku na hustotě

Modul pružnosti v tlaku měl u jednotlivých dřevin rostoucí trend, tepelná úprava neměla statisticky významně rozdílný vliv na dřeva topolu a jeřábu. Nejvyšší nárůst byl naměřen u tepelně upravené olše při 170 °C a to 24,4 % oproti referenčnímu dřevu. Tento nárůst byl Duncanovým testem vyhodnocen jako statisticky významný. Dřevo vrby jako jediné naopak vykazovalo klesající trend, modifikované dřevo při 170 °C oproti referenčnímu pokleslo o 14,8 % a při 190 °C o 0,8 %. Fajdiga et al. (2016) ve své práci naměřil u bukového dřeva upraveného při 210 °C po dobu 4 hodin zvýšení modulu pružnosti v tlaku o 29,4 %. Rogério da Silva (2013) zjistil u dřeva upraveného v atmosféře dusíku při 180 °C nárůst modulu o 25 % vůči referenčnímu dřevu. Yilmaz Aydin (2016) udává u dřeva dubu 17 % nárůst modulu pružnosti při 150 °C po dobu 8 hodin. Piernik et al. (2022) deklaruje u dřeva borovice upravené při 220 °C po dobu čtyř hodin 17 % nárůst modulu pružnosti. Colanego et al. (2011) uvádí pokles modulu o 7 %.

Tabulka 4 - Popisné statistické údaje modulu pružnosti v tlaku v MPa

Dřevina	Úprava	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Topol osika	REF	1743	899	2880	493	28,3
	170	1939	957	3184	452	23,3
	190	2029	1161	3714	523	25,8
Olše lepkavá	REF	2058	698	3197	640	31,1
	170	2561	976	3435	576	22,5
	190	2488	1070	3402	696	28,0
Jeřáb ptačí	REF	2484	1095	3685	574	23,1
	170	2734	1608	3455	554	20,3
	190	2849	933	3792	644	22,6
Vrba jíva	REF	2984	386	13129	3448	115,6
	170	2554	1633	3683	648	25,4
	190	2961	777	4056	894	30,2

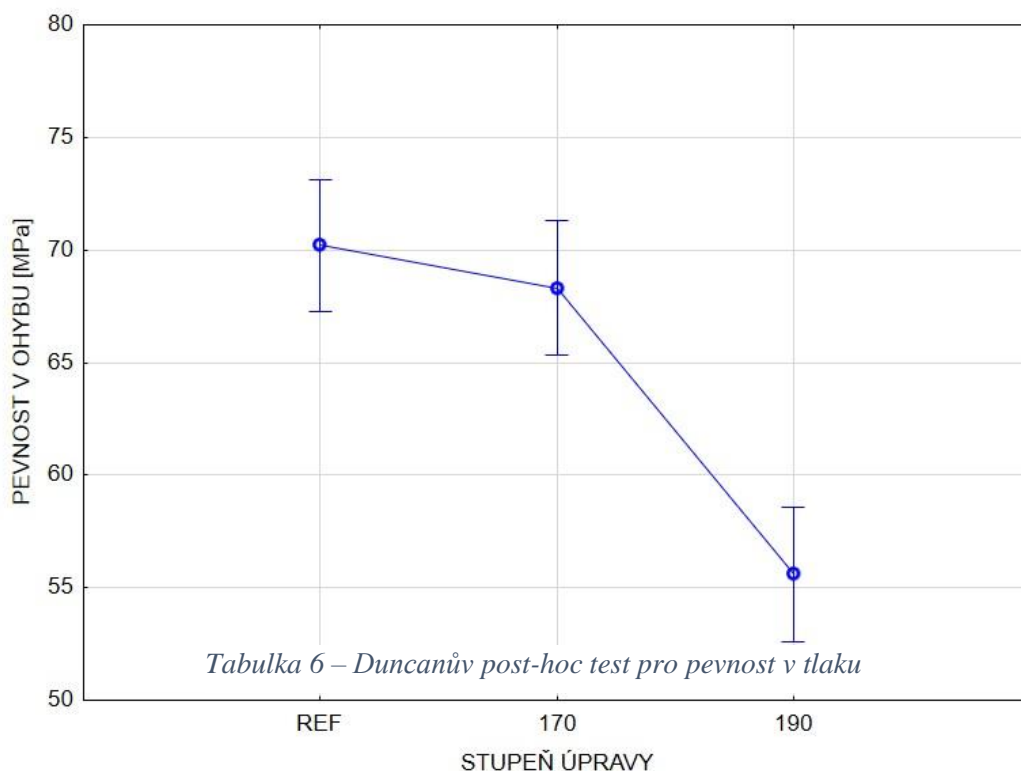


Graf 4 - Vliv tepelné úpravy na modul pružnosti v tlaku

Pevnost ve statickém ohybu a modul pružnosti

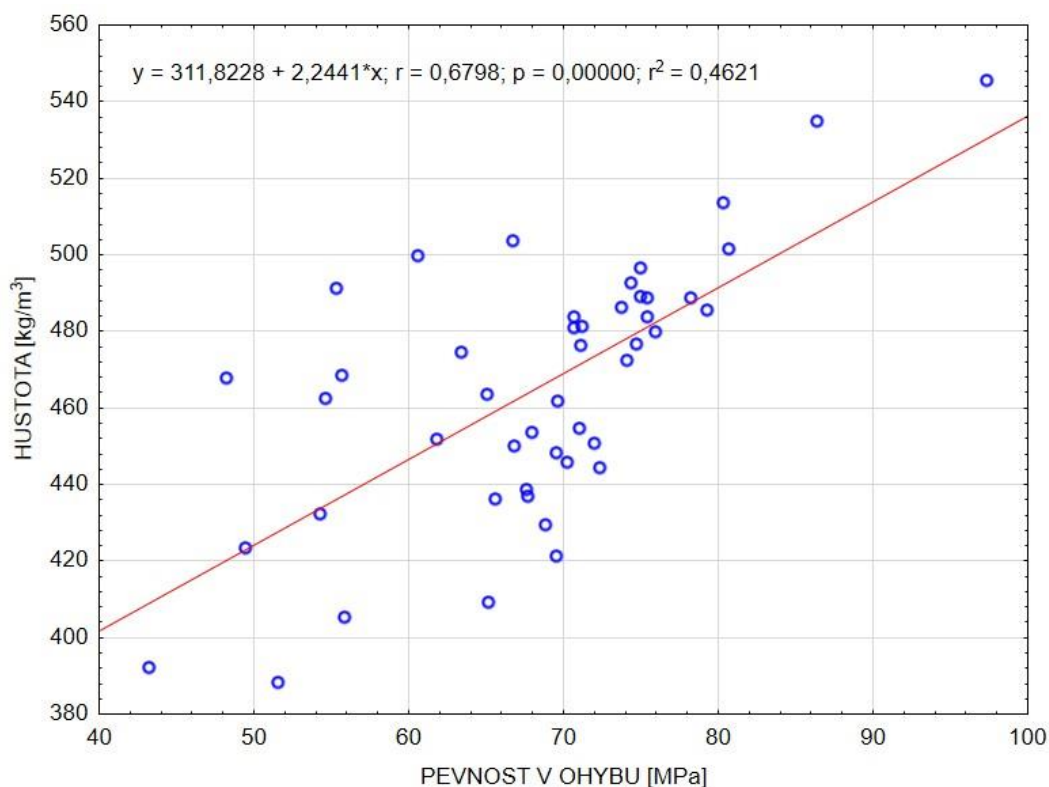
Z důvodu dostatečného množství vzorků byl pro stanovení pevnosti ve statickém ohybu a modulu pružnosti vybrán topol, kdy počet vzorků byl vyšší než minimální potřebný, tedy 30 kusů. Z tabulky (tab. !) lze vypočítat u dřeva topolu naměřené průměrné hodnoty pevnosti v ohybu, přičemž referenční vzorky mají pevnost 70,2 MPa, tepelně upravené při 170 °C 68,3 MPa a při 190 °C 55,6 MPa. Z výše uvedených hodnot a grafu (graf !) je patrné, že pevnost v ohybu má v závislosti na stupni tepelné úpravy klesající trend. Pro zjištění statistické významnosti byl použit Duncanův test (tab. !), který prokázal statistickou významnost mezi tepelným ošetřením při 170 a 190 °C. U vzorků modifikovaných při 170 °C nastal pokles pevnosti o 2,7 % a při 190 °C došlo k poklesu o 20,8 % oproti neupraveným vzorkům. Li Shi et al. (2007) uvádí, že u upraveného dřeva topolu při 200 °C po dobu tří hodin dochází k poklesu pevnosti oproti referenčnímu dřevu o 35 %. Neupravené dřevo nabývá průměrné hodnoty pevnosti v ohybu 75,1 MPa, přičemž je to velmi obdobná hodnota, která byla naměřena v této práci.

Kamperidou a Barboutis (2017) uvádějí u neupraveného topolového dřeva pocházejícího z Řecka průměrnou pevnost v ohybu 65 MPa. Rozdíl v pevnostech lze přisoudit hustotě dřeva, která je u řeckého 385 kg/m³ a hustota topolu v této práci je 474 kg/m³. U dřeva modifikovaného při teplotě 180 °C po dobu sedmi hodin oznamuje pokles pevnosti o 21,89 % vůči dřevu referenčnímu. Tato procentuální hodnota je velmi obdobná hodnotě naměřené u dřeva ošetřeného při 190 °C v této práci. Tato hodnota poklesu činí 20,8 %.



Kozakiewicz et al. (2020) popisuje u tepelně upraveného dřeva topolu černého mírný pokles pevnosti v ohybu, ke statisticky významnému poklesu došlo v jeho práci u úpravy při 220 °C po dobu dvou hodin a to o 48 %.

Tabulka prezentuje hodnoty modulu pružnosti v ohybu topolového dřeva, kdy průměrná hodnota pro referenční sadu vzorků je 6812 MPa, upravené při 170 °C je 6789 MPa a při 190 °C je průměrná hodnota 6696 MPa. Z grafu lze pozorovat mírný pokles těchto hodnot, u vzorků, které prošly úpravou došlo k redukci pevnosti o 0,3 % a 1,7 % oproti neupraveným vzorkům. Duncanův test prokázal statistickou nevýznamnost změny modulu pružnosti v ohybu. Ke snížení modulu pružnosti dospěli Kamperidou a Barboutis (2017), kteří u topolového dřeva při 180 °C po dobu tří hodin zaznamenali pokles o 5,66 %. Naopak odlišné výsledky uvádí Li Shi et al. (2007) i Kocafe et al. (2008), kteří deklarují u topolového dřeva nárůst modulu pružnosti. Li Shi et al. (2007) ve své práci zaznamenal 15 % nárůst modulu pružnosti pro topolové dřevo při úpravě 200 °C oproti referenčnímu dřevu.

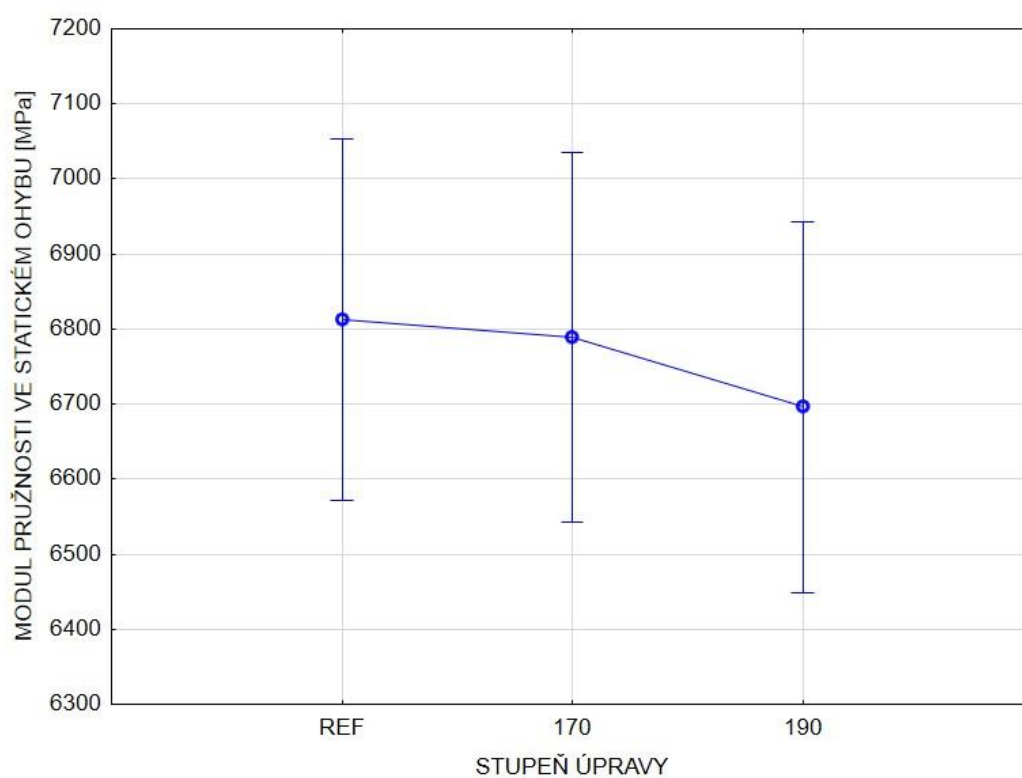


Kocafe et al. (2008) uvádí fakt, že modul pružnosti je rostoucí se zvyšující se teplotou úpravy. Ve své práci použil dřevo upravené při 120 až 220 °C. V obou pracích použili autoři dřevo pocházející z Kanady a odlišný trend modulu pružnosti lze přisoudit odlišnému druhu dřeviny s odlišnými půdními a pěstebními podmínkami, oproti dřevu v této práci.

Modul pružnosti je vlivem tepelné úpravy ovlivněn méně než pevnost v ohybu. Modul má při nižších teplotách úpravy rostoucí trend a při úpravách 200 °C a vyšších nastává klesající trend (Militz a Altgen, 2014). Příklad takové trendu modulu pružnosti je uvedený v Thermowood Handbooku (ITA, 2003). K těmto výsledkům dospěli ve své práci také Borůvka et al. (2018) a Poncsak et al. (2006). Zvyšující se trend na nižších stupních úpravy víceméně souvisí s tím, že změny ve struktuře dřeva jsou zanedbatelné a projevuje se pouze pozitivní vliv nižší vlhkosti, který je důležitý při vyšších stupních nad 200 °C a výše kvůli významným změnám v chemické stavbě hemicelulóz.

Tabulka 7 - Duncanův post-hoc test pro modul pružnosti v ohybu

Chyba: meziskup. PČ = 7114E2, SV = 139,00			
	Topol REF	Topol 170	Topol 190
Topol REF		0,895040	0,677343
Topol 170	0,895040		0,753001
Topol 190	0,677343	0,753001	



Graf 7 - Vliv tepelné úpravy na modul pružnosti ve statickém ohybu

Tabulka 8 - Popisné statistické údaje modulu pružnosti v ohybu v MPa

Dřevina	Úprava	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
	REF	6812	5500	8900	712	10,5
	170	6789	5200	9300	802	11,8
	190	6696	4300	8900	1024	15,3

Závislost modulu pružnosti na pevnosti v ohybu u dřeva topolu upraveného při 190 °C byla prokázána vysoká závislost korelačním koeficientem o hodnotě 0,829. Graf je uveden v příloze číslo!!!!

Rázová houževnatost v ohybu

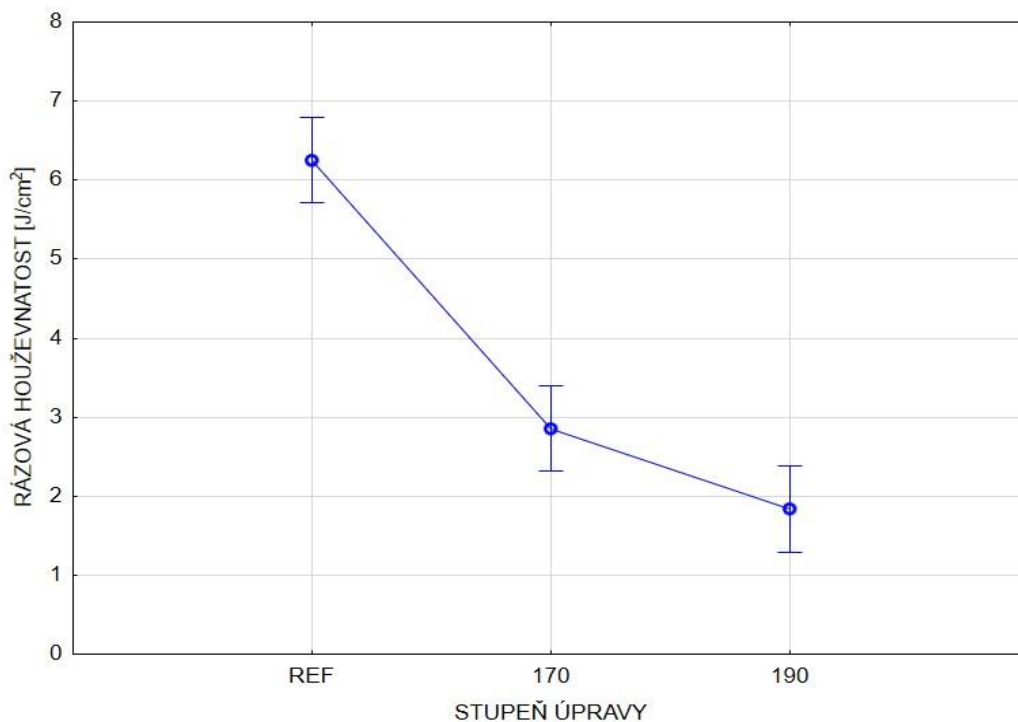
Z důvodů velkého množství, které přesáhlo minimální hodnotu statistické významnosti 30 měření, jsou výsledky rázové houževnatosti prezentovány na dřevu topolu osiky. V tabulce (tab. !) jsou uvedeny průměrné hodnoty rázové houževnatosti, které jsou pro neupravené topolové dřevo $6,3 \text{ J/cm}^2$, pro upravené při $170 \text{ }^\circ\text{C}$ $2,9 \text{ J/cm}^2$ a při $190 \text{ }^\circ\text{C}$ $1,8 \text{ J/cm}^2$. Z grafu (graf !) je patrný pokles, který při $170 \text{ }^\circ\text{C}$ je 54 % a při $190 \text{ }^\circ\text{C}$ je 71,4 %. Duncanův test (příloha !) prokázal pro tento pokles hodnot statistickou významnost mezi všemi úpravami. Lze tak tvrdit, že vlivem tepelné úpravy dochází k poklesu hodnot rázové houževnatosti u topolového dřeva.

Rázová houževnatost v ohybu je pravděpodobně nejkritičtější mechanická vlastnost pro všechny procesy tepelného zpracování. Výrazně tak klesá, dřevo se stává křehkým (Militz a Altgen, 2014). Korkiewicz et al. (2022) uvádí ve své práci u dřeva topolu černého pokles v rázové houževnatosti o 47,4 % u dřeva při úpravě $180 \text{ }^\circ\text{C}$ a pokles 62,02 % při $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Doba trvání byla u obou stupňů úpravy 7 hodin.

Borůvka et al. (2015) uvádí u dřeva buku upravené při $210 \text{ }^\circ\text{C}$ pokles o 81 % oproti referenčnímu dřevu. Tento pokles je nepatrně vyšší, což může být zapříčiněno vyšší hustotou bukového dřeva oproti zde uvedenému topolu.

Tabulka 9 - Popisné statistické údaje rázové houževnatosti

Dřevina	Úprava	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
	REF	6,3	1,0	12,6	2,5	40,7
	170	2,9	0,5	6,3	1,5	51,0
	190	1,8	0,3	4,4	1,2	62,9



Graf 856 - Vliv tepelné úpravy na rázovou houževnatost

Absolutní vlhkost

Tabulka uvádí základní statistické hodnoty absolutní vlhkosti u zkoumaných dřevin. Průměrné hodnoty absolutní vlhkosti odpovídají parametrům relativní vlhkosti vzduchu 65 % a teplotě 20 °C, při kterých byly zkušební vzorky klimatizovány.

Tabulka 10 Popisné statistické údaje absolutní vlhkosti v %

Dřevina	Úprava	Průměr	Minimum	Maximum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Topol osika	REF	10,4	9,8	10,8	0,3	2,8
	170	7,7	7,2	8,1	0,3	3,3
	190	6,6	5,4	9,8	1,3	19,9
Olše lepkavá	REF	10,8	6,8	16,9	2,1	19,7
	170	7,7	6,5	8,5	0,4	5,1
	190	6,1	5,3	6,6	0,3	5,5
Jeřáb ptačí	REF	10,5	8,5	11,7	1,1	10,5
	170	8,2	7,3	9,2	0,6	7,1
	190	6,4	5,9	7,3	0,3	5,0
Vrba jíva	REF	11,1	10,4	12,6	0,4	4,0
	170	8,1	7,8	8,6	0,2	2,7
	190	6,3	5,9	6,7	0,2	3,7

6 Závěr

V této práci byl posuzován důsledek tepelné úpravy na mechanické vlastnosti dřeva topolu, olše, vrby a jeřábu. Pevnost v tlaku se jako jediná mechanická vlastnost vyznačovala vzrůstajícím trendem u obou stupňů tepelného ošetření, kdy ke statisticky významným nárůstům došlo u dřeva vrby, jeřábu i olše. Nejvyšší nárůst byl zaznamenán právě u dřeva olše modifikované při teplotě 190 °C a to 27,1 %. U hodnot pevnosti v ohybu byl u topolového dřeva sledován klesající trend vlivem teploty úpravy, přičemž ke statisticky významnému poklesu došlo u úpravy při 190 °C. Rozdíl v poklesu hodnot byl potvrzen Duncanovým post-hoc testem a činil 20,8 % oproti neupravenému dřevu. Tepelná úprava při 170 °C sice snížila pevnost topolového dřeva ale statisticky nevýznamně. U hodnot rázové houževnatosti byl u topolového dřeva prokázán statisticky významný pokles a lze tak tvrdit, že stupeň termické úpravy snižuje u topolového dřeva jeho pevnost v dynamickém ohybu.

V rámci měření pevnosti v ohybu a tlaku byly zaznamenány data pro stanovení Youngových modulů pružnosti těchto veličin. Vlivem teploty úpravy docházelo u topolového dřeva k poklesu modulu pružnosti, tento pokles však nebyl vyhodnocen jako statisticky významný. Modul pružnosti v tlaku měl u jednotlivých dřevin rostoucí trend, tepelná úprava neměla statisticky významně rozdílný vliv na dřevo dřeva topolu a jeřábu. Nejvyšší nárůst byl naměřen u ošetřené olše při 170 °C a to 24,4 % oproti referenčnímu dřevu. Tento nárůst byl Duncanovým testem vyhodnocen jako statisticky významný. Dřevo vrby jako jediné naopak vykazovalo klesající trend, modifikované dřevo při 170 °C oproti referenčnímu pokleslo o 14,8 % respektive o 0,8 % při 190 °C. Vlivem působení teplot při tepelné úpravě docházelo u dřeva také k úbytku hmoty a tím i ke snížení hustoty, kde se statisticky významný pokles projevil u dřeva vrby a jeřábu.

Pozitivní vlastností je u tepelně modifikovaného dřeva zvýšení rozměrové stability, nejvýznamnějším negativem je pokles mechanických vlastností. Tyto dva důležité faktory jsou rozhodující o jeho využití. Dřevo upravené při nižších teplotách úpravy lze využít na podlahy v interiéru, terasy, kdy je dřevo v exteriéru vystavené povětrnostním vlivům a jiné dřevěné cesty. U dřeva ošetřeného za vyšších teplot dochází k poklesu pevnosti a je důležité, aby nebylo vytavené rázovému zatížení. V truhlářství se z tepelně upraveného dřeva vyrábí jak interiérový, tak zahrani nábytek a okna. V neposlední řadě se upravené dřevo hodí jako obklad, jak v interiéru, tak hlavně v exteriéru při obkladu fasád budov díky své rozměrové stabilitě.

7 Literatura

Literatura:

- BABIAK, Marián a Ján DUBOVSKÝ, 2001. *Problémy z mechanických vlastností dreva: príručka*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. ISBN 80-228-1076-2.
- BORŮVKA, Vlastimil a Marián BABIAK, 2022. *Vlastnosti dřeva v příkladech*. Druhé vydání. [Praha]: Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-3198-3.
- 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.
- HORÁČEK, Petr, 1998. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-715-7347-7.
- HORÁČEK, Petr, 2019. *Encyklopedie listnatých stromů a keřů*. 2. vydání. V Brně: CPress. 2. vydání. ISBN 978-80-264-2462-8.
- JURCZYKOVÁ, Tereza a František KAČÍK, 2020. *Chemické zpracování dřeva*. V Praze: Česká zemědělská univerzita. ISBN 978-80-213-3104-4.
- MATOVÍČ, Anton. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva: Určeno pro posl. les. fak. obor dřevař a les*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. 212 s. ISBN 80-7157-086-9.
- MUSIL, Ivan a Jana MÖLLEROVÁ, 2005. *Lesnická dendrologie*. Praha: Česká zemědělská univerzita. ISBN 80-213-1367-6.
- POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1
- REINPRECHT, Ladislav a Zuzana VIDHOLDOVÁ, 2011. *Termodrevo: Thermowood*. [1. vyd.]. [S. l.]: Šmíraprint. ISBN 978-80-87427-05-7.
- SPOHN, Margot a Roland SPOHN, 2013. *Stromy Evropy: 680 stromů, 2600 ilustrací*. Praha: Beta-Dobrovský. ISBN 978-80-7291-227-8.
- VERMEULEN, Nico, 2008, c1998. *Stromy a keře: encyklopedie*. 4. vyd. Přeložil Petra KOUDELKOVÁ. Čestlice: Rebo. Encyklopedie (Rebo). ISBN 978-80-7234-934-0.
- VĚTVIČKA, Václav, 2001. *Stromy a keře*. 2. české vyd. Praha: Avicenum. Souborné svazky. ISBN 80-7151-178-1.
- 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.

Elektronické zdroje:

AYTIN, Ayhan, Süleyman KORKUT a Nevzat CAKICIER, 2019/03/05. *The Effect of ThermoWood Method Heat Treatment on Physical and Mechanical Properties of Sorbus torminalis*. Dostupné z: doi:10.15376/biores.14.2.3289.3300

BARCÍK, Štefan, RAZUMOV, Evgeny a GAŠPARÍK, Miroslav. 2014. Effect of thermal modification on the colour changes of oak wood. *Wood Research*. 2014, Vol. 60, 3, 385-396.

BOONSTRA, Michiel. 2008 A two-stage thermal modification of wood. Ph.D. dissertation in cosupervision Ghent University and Université Henry Poincaré - Nancy 1, 297 p.

BORŮVKA, Vlastimil, Aleš ZEIDLER a Tomáš HOLEČEK, 2015. Comparison of Stiffness and Strength Properties of Untreated and Heat-Treated Wood of Douglas Fir and Alder. *BioResources* [online]. 2015-08-05, **10**(4), 8281-8294 [cit. 2024-04-05]. ISSN 1930-2126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.10.4.8281-8294

BORŮVKA, Vlastimil, Aleš ZEIDLER, Tomáš HOLEČEK a Roman DUDÍK, 2018. Elastic and Strength Properties of Heat-Treated Beech and Birch Wood. *Forests* [online]. **9**(4) [cit. 2024-04-05]. ISSN 1999-4907. Dostupné z: doi:10.3390/f9040197

CALONEGO, F., Durgante SEVERO a Adriano BALLARIN, 2012/07/01. Physical and mechanical properties of thermally modified wood from *E. grandis*. *European Journal of Wood and Wood Products*. **70**. Dostupné z: doi:10.1007/s00107-011-0568-5

Caudullo, G., de Rigo, D., 2016. *Populus tremula* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg, pp. e01f148+

ČEKOVSKÁ, Hana, Milan GAFF, Anton OSVALD, František KAČÍK, Jiří KUBŠ a Lukáš KAPLAN, 2016. Fire Resistance of Thermally Modified Spruce Wood. *BioResources* [online]. 2016-11-02, **12**(1), 947-959 [cit. 2024-04-05]. ISSN 1930-2126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.12.1.947-959

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: z:

<https://ebookcentral-proquestcom.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=5893880>

Enescu, C. M., Houston Durrant, T., de Rigo, D., Caudullo, G., 2016. *Salix caprea* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D.,

Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), European Atlas of Forest Tree Species. Publ. Off. EU, Luxembourg, pp. e01322d+

ESTEVEES, Bruno M. a Helena M. PEREIRA, 2009. Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources* [online]. **4**(1), 370-404 [cit. 2024-04-05]. ISSN 19302126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.4.1.370-404

FAJDIGA, Gorazd, Boštjan ZAFOSŃNIK, Bojan GOSPODARIČ a Aleš STRAŽE, 2015/11/13. Compression test of thermally treated beech wood: Experimental and numerical analysis: Experimental and numerical analysis. *Bioresources*. **11**, 223-234. Dostupné z: doi:10.15376/biores.11.1.223

GÜNDÜZ, Gökhan, Süleyman KORKUT a Derya Sevim KORKUT, 2008. The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyanı Black Pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) wood. *Bioresource Technology* [online]. **99**(7), 2275-2280 [cit. 2024-04-05]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2007.05.015

HANNOUZ Simon, Robert Collet, Jean-Claude Butaud, Laurent Bléron, Kévin Candelier. Mechanical characterization of heat-treated ash wood in relation with structural timber standards. *PRO LIGNO - Open Access Scientific Journal in the Field of Wood Engineering*, 2015, 11 (2), pp.13. <hal-01162542>

HOUSTON Durrant, T., de Rigo, D., Caudullo, G., 2016. *Alnus glutinosa* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), European Atlas of Forest Tree Species. Publ. Off. EU, Luxembourg, pp. e01f3c0+

Olše lepkavá. In: Lesnická a dřevařská fakulta - Lesnická a dřevařská fakulta [online]. [cit. 2024-01-01]. Dostupné z: https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevena=jr

KORKUT Sevim, Derya; KORKUT, Suleyman; BEKAR, Ilter; BUDAKCI, Mehmet; DILIK, Tuncer et al. The Effects of Heat Treatment on the Physical Properties and Surface Roughness of Turkish Hazel (*Corylus colurna* L.) Wood. *International journal of molecular sciences*. 2008/10/01, roč. 9, s. 1772-83. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijms9091772>.

KAMPERIDOU, Vasiliki a Ioannis (John) BARBOUTIS, 2017/10/01. *MECHANICAL STRENGTH AND SURFACE ROUGHNESS OF THERMALLY MODIFIED POPLAR WOOD*. **13**, 2017.

KOCAEFE, Duygu, Sandor PONCSAK a Yaman BOLUK, 2008/05/01. Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen. *BioResources*. **3**. Dostupné z: doi:10.15376/biores.3.2.517-537

KOL, Hamiyet, Yusuf SEFIL a Sema AYSAL, 2015/09/17. *EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES, AND DIMENSIONAL STABILITY OF FIR WOOD*.

KORKUT, Süleyman a Mehmet BUDAKÇI, 2009. Effect of High-Temperature Treatment on the Mechanical Properties of Rowan (*Sorbus aucuparia* L.) Wood. *Drying Technology* [online]. 2009-10-16, **27**(11), 1240-1247 [cit. 2024-04-05]. ISSN 0737-3937. Dostupné z: doi:10.1080/07373930903267161

SHI, Jun Li, D. KOCAEFE a J. ZHANG, 2007. Mechanical behaviour of Québec wood species heat-treated using ThermoWood process. *Holz als Roh- und Werkstoff* [online]. 2007-7-24, **65**(4), 255-259 [cit. 2024-04-05]. ISSN 0018-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00107-007-0173-9

Olše lepkavá. In: Lesnická a dřevařská fakulta - Lesnická a dřevařská fakulta [online]. [cit. 2024-01-01]. Dostupné z: https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevina=ol

PERCIN, O., Hüseyin PEKER a Abdi ATILGAN, 2016/01/01. The effect of heat treatment on the some physical and mechanical properties of beech (*Fagus orientalis* lipsky) wood. *Wood research*. **61**, 443-456.

PIERNIK, M., M. WOŹNIAK, G. PINKOWSKI, K. SZENTNER, I. RATAJCZAK a A. KRAUSS, 2022. Impact of the Heat Treatment Duration on Color and Selected Mechanical and Chemical Properties of Scots Pine Wood. *Materials* [online]. **15**(15) [cit. 2024-04-05]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15155425

PONCSÁK, S, D. KOCAEFE, M. BOUAZARA a A. PICHETTE, 2006. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Science and Technology*. **40**(8), 647-663. ISSN 1432-5225. Dostupné z: doi:10.1007/s00226-006-0082-9

RATY, M., Caudullo, G., de Rigo, D., 2016. *Sorbus aucuparia* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-MiguelAyanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg, pp. e0179de+

ROGEÉRIO , Marcio da Silva, Gilmara de Oliveira MACHADO, José Otávio BRITO a Carlito CALIL JUNIOR, 2013. Strength and stiffness of thermally rectified eucalyptus wood under compression. *Materials Research* [online]. **16**(5), 1077-1083 [cit. 2024-04-05]. ISSN 1980-5373. Dostupné z: doi:10.1590/S1516-14392013005000086

SANDBERG, D, A KUTNAR a G MANTANIS, 2017. Wood modification technologies - a review. *IForest - Biogeosciences and Forestry* [online]. **10**(6), 895-908 [cit. 2024-04-05]. ISSN 19717458. Dostupné z: doi:10.3832/ifor2380-010

Topol osika. In: Lesnická a dřevařská fakulta - Lesnická a dřevařská fakulta [online]. [cit. 2024-01-01]. Dostupné z:
https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevena

Vrba jíva. In: Lesnická a dřevařská fakulta - Lesnická a dřevařská fakulta [online]. [cit. 2024-01-01]. Dostupné z:
https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevena=vr

YILMAZ AYDIN, T., Ergün GÜNTEKIN a Murat AYDIN, 2016/10/26. *Effects of heat treatment on some orthotropic mechanic properties of oak (quercus petraea) wood.*

Normy:

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

ČSN 49 0108 Drevo. Zisťovanie hustoty. 1993

ČSN 49 0110 Drevo. Medza pevnosti v tlaku v smere vlákien. 1980

ČSN 49 0111 Drevo. Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zisťovania modulu pružnosti v tlaku pozdĺž vlákien. 1992

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 použitých grafu, tabulek, obrázků a příloh

Graf 1 – Vliv tepelné úpravy na hustotu

Graf 2 – Vliv tepelné úpravy na pevnost v tlaku

Graf 3 – Závislost pevnosti v tlaku na hustotě

Graf 4 – Vliv tepelné úpravy na modul pružnosti v tlaku

Graf 5 Závislost pevnosti v ohybu v hustotě

Graf 6 – Vliv tepelné úpravy na pevnost v ohybu

Graf 7 – Vliv tepelné úpravy na modul pružnosti ve statickém ohybu

Graf 8 – Vliv tepelné úpravy na rázovou houževnatost

Tabulka 1 Přehled změn vlastností upraveného dřeva v porovnání s referenčním v %

Tabulka 2 - Popisné statistické údaje hustoty v kg/m³

Tabulka 3 - Popisné statistické údaje pevnosti v tlaku v MPa

Tabulka 4 - Popisné statistické údaje modulu pružnosti v tlaku v MPa

Tabulka 5 - Popisné statistické údaje pevnosti v tlaku v MPa

Tabulka 6 – Duncanův post-hoc test pro pevnost v tlaku

Tabulka 7 - Duncanův post-hoc test pro modul pružnosti v ohybu

Tabulka 8 - Popisné statistické údaje modulu pružnosti v ohybu v MPa

Tabulka 9 - Popisné statistické údaje rázové houževnatosti

Tabulka 10 Popisné statistické údaje absolutní vlhkosti v %

Obrázek 1 – Dřevo topolu osiky v jednotlivých řezech: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez

Obrázek 2 Dřevo vrby jívy v jednotlivých řezech A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez

Obrázek 3 - Dřevo vrby jívy v jednotlivých řezech: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez

Obrázek 4- Dřevo jeřábu ptačího v jednotlivých řezech: A – příčný řez; B – radiální řez; C – tangenciální řez

Obrázek 5 Diagram pro určení rovnovážné vlhkosti dřeva

Obrázek 6 – Vliv hustoty a vlhkosti na modul pružnosti

Obrázek 7 – Základní směry ve dřeva

Obrázek 8 – Pracovní diagram dřeva

Obrázek 9 – Zatížení dřeva v ohybu

Obrázek 10 – Průběh napětí při zatížení dřeva v ohybu

Obrázek 11 – Průběh tepelné úpravy

Obrázek 12- Změna barvy dřeva vlivem teploty úpravy

Obrázek 13 – Vzorky v klimatizační komoře

Obrázek 14 – Termokomora

Obrázek 15 – Laboratorní váha a digitální posuvné měřítko

Obrázek 16 Zkušební zařízení TIRA 2850 S

Obrázek 17 – Charpyho kladivo

Obrázek 18 – Zkušební stroj UTS 5035

Obrázek 19 – Sušárna

Obrázek 20 – Vážení vzorku

Příloha 1 - Duncanův post-hoc test pro hustotu

Příloha 2 - Duncanův post-hoc test pro pevnost v tlaku

Příloha 3 - Duncanův post-hoc test pro modul pružnosti v tlaku

Příloha 4 - Duncanův post-hoc test pro rázovou houževnatosti

Příloha 5- Závislost modulu pružnosti na pevnosti v tlaku

Příloha 6- Závislost modulu pružnosti na pevnosti v tlaku

9 Samostatné přílohy

Příloha 16 - Duncanův post-hoc test pro hustotu

Chyba: meziskup. PČ = 1851,5, SV = 762,00													
DŘEVINA	ÚPRAVA	TOPOL REF	TOPOL 170	TOPOL 190	OLŠE REF	OLŠE 170	OLŠE 190	JERAB REF	JERAB 170	JERAB 190	VRBA REF	VRBA 170	VRBA 190
TOPOL	REF		0,246671	0,041250	0,000003	0,002221	0,102947	0,000001	0,000005	0,000004	0,000001	0,000004	0,000004
TOPOL	170	0,246671		0,323378	0,000004	0,000032	0,007341	0,000001	0,000001	0,000004	0,000001	0,000005	0,000004
TOPOL	190	0,041250	0,323378		0,000004	0,000005	0,000311	0,000002	0,000001	0,000004	0,000001	0,000001	0,000005
OLŠE	REF	0,000003	0,000004	0,000004		0,046485	0,000622	0,000004	0,000006	0,000189	0,000004	0,000008	0,000036
OLŠE	170	0,002221	0,000032	0,000005	0,046485		0,125109	0,000005	0,000004	0,000011	0,000004	0,000004	0,000003
OLŠE	190	0,102947	0,007341	0,000311	0,000622	0,125109		0,000001	0,000004	0,000003	0,000005	0,000004	0,000004
JEŘÁB	REF	0,000001	0,000001	0,000002	0,000004	0,000005	0,000001		0,289397	0,035515	0,534237	0,198663	0,105189
JEŘÁB	170	0,000005	0,000001	0,000001	0,000006	0,000004	0,000004	0,289397		0,262782	0,610584	0,770827	0,517075
JEŘÁB	190	0,000004	0,000004	0,000004	0,000189	0,000011	0,000003	0,035515	0,262782		0,120552	0,373452	0,583190
VRBA	REF	0,000001	0,000001	0,000001	0,000004	0,000004	0,000005	0,534237	0,610584	0,120552		0,454730	0,278575
VRBA	170	0,000004	0,000005	0,000001	0,000008	0,000004	0,000004	0,198663	0,770827	0,373452	0,454730		0,686901
VRBA	190	0,000004	0,000004	0,000005	0,000036	0,000003	0,000004	0,105189	0,517075	0,583190	0,278575	0,686901	

Příloha 2 - Duncanův post-hoc test pro pevnost v tlaku

Chyba: meziskup. PČ = 47,576, SV = 630,00													
DŘEVINA	ÚPRAVA	TOPOL REF	TOPOL 170	TOPOL 190	OLŠE REF	OLŠE 170	OLŠE 190	JERAB REF	JERAB 170	JERAB 190	VRBA REF	VRBA 170	VRBA 190
TOPOL	REF		0,000006	0,000004	0,375476	0,000005	0,000004	0,000053	0,000001	0,000001	0,000221	0,000005	0,000001
TOPOL	170	0,000006		0,142181	0,000004	0,774125	0,123444	0,546485	0,000075	0,000004	0,312826	0,000080	0,000005
TOPOL	190	0,000004	0,142181		0,000004	0,203806	0,891228	0,046939	0,013439	0,000004	0,016416	0,012637	0,000004
OLŠE	REF	0,375476	0,000004	0,000004		0,000004	0,000005	0,000003	0,000001	0,000001	0,000017	0,000001	0,000002
OLŠE	170	0,000005	0,774125	0,203806	0,000004		0,185721	0,405536	0,000209	0,000004	0,217829	0,000214	0,000004
OLŠE	190	0,000004	0,123444	0,891228	0,000005	0,185721		0,038564	0,016009	0,000003	0,012706	0,013692	0,000004
JEŘÁB	REF	0,000053	0,546485	0,046939	0,000003	0,405536	0,038564		0,000009	0,000005	0,634869	0,000009	0,000001
JEŘÁB	170	0,000001	0,000075	0,013439	0,000001	0,000209	0,016009	0,000009		0,001147	0,000005	0,958970	0,000011
JEŘÁB	190	0,000001	0,000004	0,000004	0,000001	0,000004	0,000003	0,000005	0,001147		0,000001	0,001374	0,000023
VRBA	REF	0,000221	0,312826	0,016416	0,000017	0,217829	0,012706	0,634869	0,000005	0,000001		0,000005	0,000001
VRBA	170	0,000005	0,000080	0,012637	0,000001	0,000214	0,013692	0,000009	0,958970	0,001374	0,000005		0,000003
VRBA	190	0,000001	0,000005	0,000004	0,000002	0,000004	0,000004	0,000001	0,000011	0,000023	0,000001	0,000003	

Příloha 32 - Duncanův post-hoc test pro modul pružnosti v tlaku

Chyba: meziskup. PČ = 7933E2, SV = 630,00													
DŘEVINA	ÚPRAVA	TOPOL REF	TOPOL 170	TOPOL 190	OLŠE REF	OLŠE 170	OLŠE 190	JERAB REF	JERAB 170	JERAB 190	VRBA REF	VRBA 170	VRBA 190
TOPOL	REF		0,314904	0,166768	0,143028	0,000105	0,000372	0,000342	0,000003	0,000001	0,000002	0,000107	0,000001
TOPOL	170	0,314904		0,642357	0,570133	0,004047	0,009927	0,008959	0,000170	0,000017	0,000002	0,004008	0,000002
TOPOL	190	0,166768	0,642357		0,885058	0,014470	0,029806	0,026150	0,000933	0,000101	0,000006	0,014072	0,000009
OLŠE	REF	0,143028	0,570133	0,885058		0,019006	0,035664	0,028780	0,001387	0,000164	0,000013	0,017963	0,000018
OLŠE	170	0,000105	0,004047	0,014470	0,019006		0,727381	0,725070	0,374072	0,164472	0,051466	0,973383	0,059913
OLŠE	190	0,000372	0,009927	0,029806	0,035664	0,727381		0,984041	0,254970	0,100003	0,025416	0,733147	0,031332
JEŘÁB	REF	0,000342	0,008959	0,026150	0,028780	0,725070	0,984041		0,260910	0,103157	0,026013	0,736750	0,032428
JEŘÁB	170	0,000003	0,000170	0,000933	0,001387	0,374072	0,254970	0,260910		0,556308	0,247561	0,388603	0,275706
JEŘÁB	190	0,000001	0,000017	0,000101	0,000164	0,164472	0,100003	0,103157	0,556308		0,517098	0,171376	0,565528
VRBA	REF	0,000002	0,000002	0,000006	0,000013	0,051466	0,025416	0,026013	0,247561	0,517098		0,052242	0,904747
VRBA	170	0,000107	0,004008	0,014072	0,017963	0,973383	0,733147	0,736750	0,388603	0,171376	0,052242		0,062153
VRBA	190	0,000001	0,000002	0,000009	0,000018	0,059913	0,031332	0,032428	0,275706	0,565528	0,904747	0,062153	

Příloha 4 - Duncanův post-hoc test pro rázovou houževnatost

Chyba: meziskup. PČ = 3,3319, SV = 131,00			
	Topol REF	Topol 170	Topol 190
Topol REF		0,000009	0,000011
Topol 170	0,000009		0,008390
Topol 190	0,000011	0,008390	

