

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta lesnická a dřevařská**

**Katedra zpracování dřeva a biomateriálů**



**Fakulta lesnická  
a dřevařská**

**Posouzení vlivu tepelné úpravy na vztah k vodě a  
rozměrovou stabilitu dřeva z přípravných dřevin**

**Bakalářská práce**

Autor: Albert Marschner

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

2024

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Albert Marschner

Dřevařství  
Zpracování dřeva

Název práce

**Posouzení vlivu tepelné úpravy na vztah k vodě a rozměrovou stabilitu dřeva z přípravných dřevin**

Název anglicky

**Assessment of the effect of heat treatment on the relationship to water and dimensional stability of wood of pioneer woody plants**

### Cíle práce

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

### Metodika

- 1) Zpracovat literární rešerši o daných dřevinách, tepelné úpravě a posuzovaných vlastnostech.
- 2) Odebrat reprezentativní vzorníky z vybraného stanoviště a připravit zkušební tělesa. Následně provést termickou úpravu 2/3 paralelně vymanipulovaných vzorků.
- 3) Normalizovanými postupy na upravených i neupravených (referenčních), zkušebních tělesech stanovit bobtnání (v jednotlivých směrech a objemové), hustotu dřeva v absolutně suchém stavu a konvenční hustotu. Zaužívaným metodickým postupem stanovit i smáčivost (resp. kontaktní úhel) na přístroji KRÜSS DSA30. Vzorky pro stanovení smáčivosti před jakýmkoliv měřením na-klimatizovat v prostředí klimatizační komory s relativní vlhkostí vzduchu 65 % a teplotou 20 °C.
- 4) Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě.
- 5) Pokusit se analyzovat rozdíly v relevantních parametrech dřeva před a po termické úpravě, jejich možné příčiny, a to i z pohledu užitkových vlastností.

Harmonogram práce:

leden 2023 až duben 2023 – oficiální zadání práce do aplikace UIS

květen 2023 až prosinec 2023 – práce na literární rešerši

červenec 2023 až únor 2024 – příprava materiálu a experimentální část (měření a získávání dat)

listopad 2023 až březen 2024 – statistické vyhodnocení dat

únor 2024 až březen 2024 – stanovení závěrů a zhodnocení

březen 2024 až duben 2024 – finalizace práce a odevzdání práce do aplikace UIS



## Doporučený rozsah práce

40 – 50 stran (bez příloh)

## Klíčová slova

dřevo, tepelná úprava, topol osika, olše lepkavá, vrba jíva, smáčivost, bobtnání, variabilita vlastností

---

## Doporučené zdroje informací

BORŮVKA, V., BABIAK, M. (2022). Vlastnosti dřeva v příkladech, 2. vyd. Praha ČZU. 140 s.

ČSN 49 0103. (1979), ČSN 49 0108. (1993), ČSN 49 0126. (1989).

FAKOPP Ultrasonic Timer user's guide. <http://fakopp.com/docs/products/ultrasonic/UltrasonicGuide.pdf> (přístupné k 23.2.2023).

HILL, C.A.S. (2006). Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes, John Wiley & Sons: London, UK. 260 s.

ITA (International Thermowood Association). (2003). Thermowood Handbook; International Thermowood Association: Helsinki, Finland; Dostupné online: [https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw\\_handbook\\_080813.pdf](https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf) (přístupné k 23.2.2023).

POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. (1997). Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání. Bratislava: Príroda. 485 s.

REINPRECHT, L. (2016). Wood Deterioration, Protection and Maintenance, John Wiley & Sons, Oxford, United Kingdom. 376 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.

ZOBEL, B. J., VAN BUITENEN, J. P. (1989). Wood variation, its causes and control, Springer-Verlag, Berlin. 363 s.

---

## Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FLD

## Vedoucí práce

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

## Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

## Konzultant

Ing. Petr Horák

Elektronicky schváleno dne 9. 5. 2023

**doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 28. 7. 2023

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 23. 02. 2024

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Posouzení vlivu tepelné úpravy na vztah k vodě a rozměrovou stabilitu dřeva z přípravných dřevin“ 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 poděkoval doc. Ing. Vlastimilu Borůvkovi, Ph.D., Dipl. Mgmt. za odborné vedení práce, cenné rady a vstřícnost. Dále děkuji Ing. Petru Horákovi za pomoc při realizaci metodické části. V neposlední řadě chci poděkovat své přítelkyni a rodině za pochopení, veškerou pomoc a podporu při studiu.

# Posouzení vlivu tepelné úpravy na vztah k vodě a rozměrovou stabilitu dřeva z případných dřevin

## Abstrakt

Tato práce se zabývá posouzením vlivu tepelné úpravy na vybrané fyzikální vlastnosti přípravných dřevin. Konkrétní zkoumané dřeviny jsou topol osika (*Populus tremula* L.), olše lepkavá (*Alnus glutinosa* Gaertn.), vrby jívy (*Salix carpea* L.) a jeřábu ptačího (*Sorbus aucuparia* L.).

Tato práce se skládá z teoretické a praktické části.

V teoretické části jsou základní specifikace zkoumaných dřevin, jejich makroskopická a mikroskopická stavba a obecně je popsána stavba submikroskopická, dále jsou popsány fyzikální vlastnosti jako je vztah dřeva a vody, rozdělení vody ve dřevě, vlhkost dřeva, bobtnání, smáčivost a v neposlední řadě je popsána tepelná úprava dřeva, její vliv na stavbu dřeva a způsoby tepelné úpravy dřeva.

Praktická část se zabývá posouzením zmíněných fyzikálních vlastností všech zkoumaných dřevin. Vzorky byly rozděleny na třetiny, přičemž třetina zůstala neupravená, třetina byla tepelně upravena při 170 °C a třetina při 190 °C. Po naměření byly výsledky statisticky zpracovány a následně byly porovnány s odbornou literaturou. Největší vliv měla tepelná úprava na smáčivost, kde byly pozorovány velké procentuální změny vzhledem k referenčním vzorkům. Ostatní výsledky se podobají obecným trendům, nicméně u některých vlastností nebyly naměřeny statisticky významné hodnoty.

**Klíčová slova:** dřevo, tepelná úprava, topol osika, olše lepkavá, vrba jíva, smáčivost, bobtnání, variabilita vlastností

# **Assessment of the effect of heat treatment on the relationship to water and dimensional stability of wood of pioneer woody plants**

## **Absrtact**

This thesis deals with the assessment of the effect of heat treatment on selected physical properties of preparatory wood species. The specific tree species investigated are aspen (*Populus tremula* L.), sticky alder (*Alnus glutinosa* Gaertn.), willow (*Salix carpea* L.) and rowan (*Sorbus aucuparia* L.).

This thesis consists of a theoretical and a practical part.

In the theoretical part, there are the basic specifications of the examined wood species, their macroscopic and microscopic structure, and in general the submicroscopic structure is described, then physical properties such as the relationship between wood and water, the distribution of water in wood, wood moisture, swelling, wettability and last but not least are described heat treatment of wood, its effect on wood structure and methods of heat treatment of wood.

The practical part deals with the assessment of the mentioned physical properties of all examined wood species. The samples were divided into thirds, with one third left untreated, one third heat treated at 170 °C, and one third at 190 °C. After the measurement, the results were statistically processed and then compared with the professional literature. Heat treatment had the greatest effect on wettability, where large percentage changes were observed compared to the reference samples. Other results resemble general trends, however, statistically significant values were not measured for some properties.

**Keywords:** wood, heat treatment, poplar, aspen, alder, willow, wettability, swelling, variability of properties



# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Cíl práce</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Literární rešerše</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1 Zkoumané dřeviny</b> .....	<b>10</b>
3.1.1 Topol osika ( <i>Populus tremula</i> L.).....	10
3.1.2 Olše lepkavá ( <i>Alnus glutinosa</i> Gaertn.).....	10
3.1.3 Vrba jíva ( <i>Salix carpea</i> L.).....	10
3.1.4 Jeřáb ptačí ( <i>Sorbus aucuparia</i> L.).....	10
<b>3.2 Stavba dřeva</b> .....	<b>11</b>
3.2.1 Makroskopická stavba.....	11
3.2.2 Mikroskopická stavba .....	13
3.2.3 Submikroskopická stavba .....	17
<b>3.3 Vztah dřeva a vody</b> .....	<b>19</b>
<b>3.4 Dřevo jako kapilárně-pórovitá látka</b> .....	<b>19</b>
<b>3.5 Vlhkost dřeva</b> .....	<b>20</b>
3.5.1 Rozdělení vody ve dřevě .....	20
3.5.2 Rovnovážná vlhkost dřeva a teorie sorpce .....	21
<b>3.6 Bobtnání a sesychání dřeva</b> .....	<b>23</b>
3.6.1 Bobtnání .....	23
3.6.2 Sesychání.....	24
<b>3.7 Smáčivost</b> .....	<b>24</b>
<b>3.8 Tepelná modifikace dřeva</b> .....	<b>26</b>
3.8.1 Změny ve dřevě vlivem tepla .....	26
3.8.2 Změny v anatomické stavbě .....	27
3.8.3 Změny v chemické stavbě .....	27

3.8.4	Způsoby tepelné úpravy .....	28
<b>4</b>	<b>Metodika .....</b>	<b>31</b>
4.1	Vzorky a jejich příprava .....	31
4.2	Tepelná úprava .....	31
4.3	Měření.....	32
4.3.1	Smáčivost.....	32
4.3.2	Hustota.....	33
4.3.3	Bobtnání .....	34
4.4	Statistické zpracování dat .....	35
<b>5</b>	<b>Výsledky a diskuze.....</b>	<b>36</b>
5.1	Hustota v absolutně suchém stavu.....	37
5.2	Mez nasycení buněčných stěn .....	38
5.3	Bobtnání .....	40
5.4	Smáčivost .....	43
<b>6</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>Použité zdroje .....</b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b>Seznam grafů, obrázků a tabulek .....</b>	<b>50</b>
<b>9</b>	<b>Samostatné přílohy .....</b>	<b>52</b>

# 1 Úvod

Význam dřeva v poslední době roste, ačkoliv je to historicky jeden z nejdéle člověkem používaných materiálů. Díky trendům poslední doby je dřevo častěji používáno ve stavebnictví, nábytkářství, energetice a obalovém průmyslu. Jeho hlavní výhodou oproti ostatním materiálům je obnovitelnost, která souvisí s dlouhodobým udržitelným pěstováním lesů. Mezi výhody samotného dřeva řadíme výborné pevnostní vlastnosti vzhledem k jeho nízké hmotnosti, snadnou opracovatelnost a dobré tepelně izolační vlastnosti. Negativní vlastnosti dřeva jsou spojeny se zvýšenou vlhkostí. Mezi negativní vlastnosti dřeva způsobené vlivem vody řadíme rozměrovou nestabilitu, redukci mechanických vlastností, biodegradaci. Většinu těchto negativ můžeme redukovat tepelnou modifikací dřeva.

Tepelná modifikace dřeva využívá působením teplot od 150 °C do 260 °C v různých okolních prostředí a různých časových intervalech, obvykle jsou to řády jednotek hodin. Působením tepla se mění anatomická a chemická stavba dřeva, která ovlivňuje materiálové vlastnosti, které jsou částečně v této práci popsány. Cílem tepelné modifikace je tedy upravit dřevo tak, abychom zachovali jeho pozitivní vlastnosti a omezili ty negativní.

Mezi nejznámější tepelné modifikace dřeva patří ThermoWood, PlatoWood, Retiwood, OHT Wood (Jurczykova a Kačík, 2020). V praxi je nejběžnější a nejrozšířenější metoda ThermoWood, která byla použita i pro úpravu vzorků popisující tato práce.

Přípravné dřeviny jsou používány na přípravu stanovišť díky jejich rychlému růstu v mládí, odolnosti vůči extrémním podmínkám a obohacování půdy. Mezi tyto dřeviny patří i olše lepkavá (*Alnus glutinosa* Gaertn.), topol osika (*Populus tremula* L.) a vrba jíva (*Salix carpea* L.). Tyto dřeviny nejsou v dřevařství hojně využívány a mnoho dat a studií ohledně tepelné úpravy těchto dřevin není. Navíc je tato práce součástí rozsáhlejšího projektu na Fakultě lesnické a dřevařské, který zkoumá i jeřáb ptačí (*Sorbus aucuparia* L.) a z důvodu dostatečného počtu vzorků pro účely bobtnání byly naměřeny a porovnány hodnoty i této dřeviny.

## 2 Cíl práce

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

## 3 Literární řešerše

### 3.1 Zkoumané dřeviny

#### 3.1.1 Topol osika (*Populus tremula* L.)

Topol osika je listnatá opadavá dřevina, která je celosvětově velmi rozšířená. Strom roste v mírném pásmu severní polokoule od západní Evropy až po východní Asii (Hejný a Slavík, 1990). Topol osika patří do čeledi vrbovité (*Salicaceae*) a dorůstá výšky 15–35 m (Horáček, 2007). Kmen má v průměru 70 cm a strom se řadí do krátkověkých rostlin, dožívá se přibližně 160 let. (Hejný a Slavík, 1990). Topol osika je rychle rostoucí pionýrská dřevina, která se objevuje na obnažených částech vegetace. Je to nenáročná dřevina na půdní typ a je velmi odolná vůči vysokým výkyvům teplot. Dřevo topolu osiky se používá na výrobu dýh a překližek, vhodné je také na výrobu celulózy (Balabán, 1955; Sarvašová Kvietková, 2019)

#### 3.1.2 Olše lepkavá (*Alnus glutinosa* Gaertn.)

Olše lepkavá je listnatá opadavá dřevina s vzrůstem do 25 metrů. Dožívá se věku kolem 100 let její rozšíření je po celé Evropě a ve východní Asii v Sibiřské oblasti. Olše se vyskytuje ve vlhkých až promáčených místech, často roste na březích potoků a řek. Je heliofilní a řadí se do pionýrských dřevin. Díky její toleranci k průmyslovému znečištění se často vysazuje v městech. Olšové dřevo se používá na vodní stavby a překližované desky (Balabán, 1955; Sarvašová Kvietková, 2019).

#### 3.1.3 Vrba jíva (*Salix carpea* L.)

Vrba jíva je listnatý strom s průměrným vzrůstem od 6 do 12 metrů s nepravidelným kmenem a košatou korunou. Rozšířená je po celé Evropě a průměrně se dožívá 40–50 let. Vrba se řadí mezi pionýrské dřeviny, obsazuje všechna volná stanoviště, je však náchylná na zastínění ostatními stromy a na rozdíl od ostatních vrb jí nevyhovují podmáčené stanoviště. Je nenáročná a nevdá jí extrémní letní počasí ani vysoké zimní mrazy. Dřevo vrby jívy se používá na výrobu celulózy a na výrobu překližek (Balabán, 1955).

#### 3.1.4 Jeřáb ptačí (*Sorbus aucuparia* L.)

Jeřáb ptačí je strom, někdy i keř, vysoký 3–12 metrů, rostoucí v mírném pásmu Eurasie. Roste v půdách s vlhkým až mírně suchým kyselým prostředím (Hejný a Slavík, 1990). Má typické plody, které jsou podstatnou složkou ve výživě lesní zvěře a ptactva. Je jednou

z melioračních dřevin, které se používají při zalesňování. Dřevo jeřábu se používá hlavně v řezbářství a občasné i nábytkářství (Balabán, 1955).

## 3.2 Stavba dřeva

### 3.2.1 Makroskopická stavba

Makroskopická stavba dřeva definuje vnější vzhled dřeva a jeho znaků, které je pozorovatel schopen vidět pouhým okem či za pomoci lupy. Základními makroskopickými znaky jsou tři základní řezy, podíl letního a jarního dřeva, podíl bělí a jádra, dřevné paprsky, cévy a suky. Tři základní řezy jsou: transversální neboli příčný řez, radiální řez a tangenciální řez. Při transversálním řezu je rovina řezu kolmá na podélnou osu kmene a letokruhy jsou viditelné jako kružnice. Rovina řezu u radiálního řezu je rovnoběžná s podélnou osou kmene a řez prochází středem kmene tedy dřevní a letokruhy jsou viditelné jako rovnoběžné čáry. Tangenciální řez je také veden rovnoběžně s podélnou osou kmene, ale řez neprochází středem kmene a letokruhy jsou zobrazovány jako paraboly.

### Topol osika

Topol osika se řadí do skupiny roztroušeně pórovitých dřevin, má velmi široké letokruhy a hůře rozeznatelné jarní a letní dřevo a cévy nejsou pouhým okem patrné. Jádro není zbarvené, tudíž se jedná se o bělovou dřevinu, barva je v celém průřezu bílá až žlutobílá (Zeidler a Borůvka, 2016). Jedná se o velmi lehké a měkké dřevo, které se velmi podobá dřevu vrby. Na podélných řezech je dřevo lesklé.



Obrázek 1 – Makroskopická stavba topolu osiky: vlevo příčný řez, vpravo podélný řez (Mendelu, 2023)

### **Olše lepkavá**

Olše lepkavá je roztroušeně pórovitá dřevina, čerstvě poražené je dřevo bělavé či slabě narůžovělé, po reakci se vzduchem oranžově žlutne až červená následkem okysličení parenchymatických buněk (Balabán, 1955). Cévy nejsou na příčném řezu patrné, na podélných řezech se jeví jako jemné trhlinky. Letokruhy jsou méně nápadné a podél jejich rozhraní se často vyskytují dřeňové skvrny. Dřeňové paprsky se sdružují do mohutných nepravých, které jsou viditelné na všech řezech, na řezu tangenciálním se jeví jako dlouhé tmavší pásy.



Obrázek 2 – Makroskopická stavba olše lepkavé: vlevo příčný řez, vpravo podélný řez (Mendelu, 2023)

### **Vrba jíva**

Vrba jíva je roztroušeně pórovitá dřevina s barevně odlišitelným jádrem a širokými letokruhy. Běl je světle bílá až nažloutlá, slabě odlišitelná od jádra (Balabán, 1955). Dřeňové paprsky nejsou vidět na žádném řezu, cévy pouhým okem neviditelné ale lupou dobře patrné. Dřevo je měkké, řídké a lehké.



Obrázek 3 – Makroskopická stavba vrby: vlevo příčný řez, vpravo podélný řez (Mendelu, 2023)

## Jeřáb ptačí

Roztroušeně pórovitá dřevina s dobře rozlišitelným jádrem. Běl je narůžovělá a jádro je světle hnědé až tmavé. Dobře rozlišitelné jarní a letní dřevo, výrazná kresba letokruhů je vidět na každém řezu dostatečně. Na příčném řezu nejsou patrné cévy ani dřeňové paprsky, na řezu podélném jsou četné nahnědlé dřeňové skvrny (Balabán, 1955).



Obrázek 4 – Makroskopická stavba jeřábu ptačího: vlevo příčný řez, vpravo podélný řez (Mendelu, 2023)

### 3.2.2 Mikroskopická stavba

Mikroskopická stavba dřeva zkoumá jednotlivé buněčné elementy dřeva, konkrétně tři základní druhy morfologicky stejných buněk, které vznikají diferenciací při xylogenezi. Nově vzniklé buněčné elementy jsou buňky parenchymu, prozenchymu a sklerenchymu.

- *Parenchymatické buňky* – jsou tenkostěnné, mají hranolovitý tvar, jejich hlavní funkcí je vedení asimilačního proudu, popř. mají zásobní funkci.
- *Prozenchymatické buňky* – jsou silně protáhlé a na koncích zašpičatělé buňky, postupem času stěny buněk lignifikují, hlavními funkcemi je vedení vody a mechanická opora.
- *Sklerenchymatické buňky* – tlustostěnné buňky, časem lignifikují, tvoří sklerenchymatická vlákna, které slouží jako mechanická opora dřeva

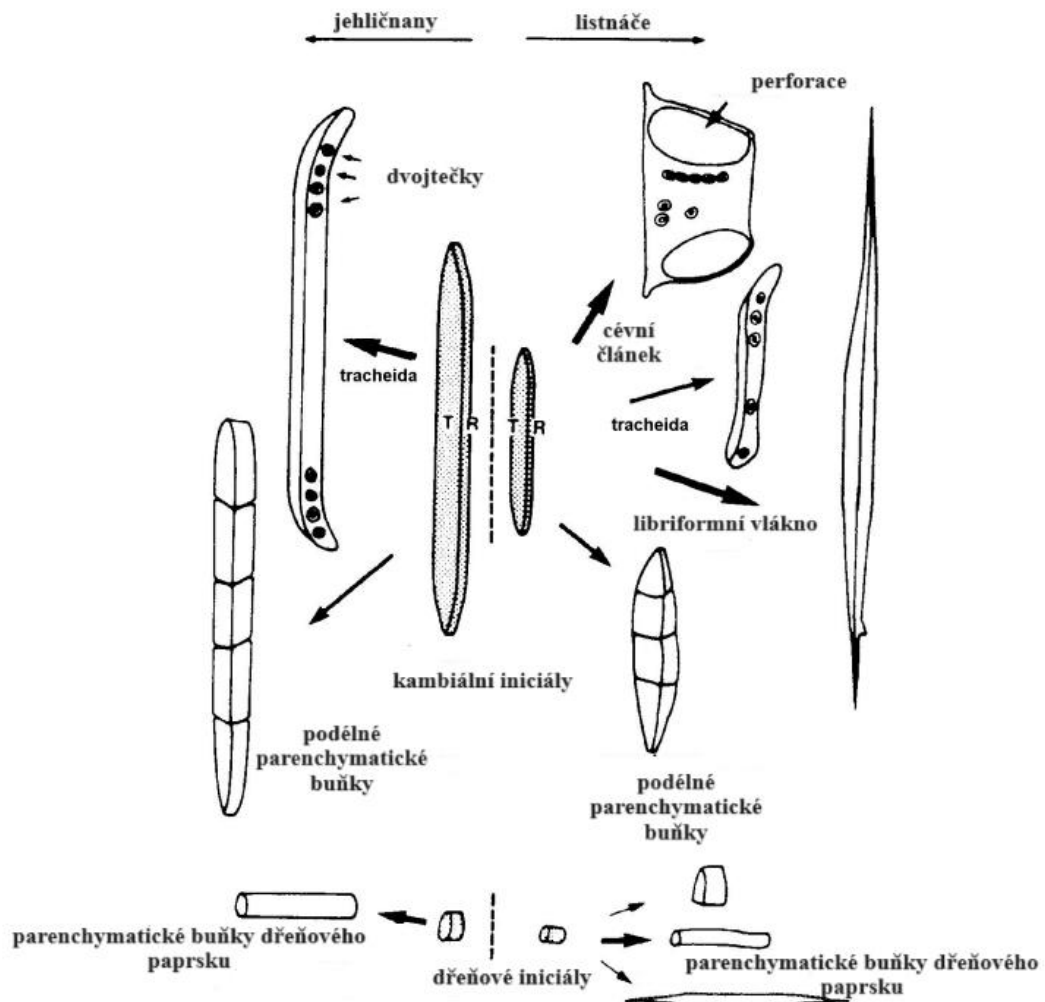
### Mikroskopická stavba jehličnatých x listnatých dřevin

Jehličnany jsou evolučně starší, tudíž jejich stavba je jednoduchá a morfologicky pravidelná. Až 95 % objemu jehličnatých dřevin tvoří prozenchymatické buňky – tracheidy, které plní hlavně funkci vodivou ale i pevnostní. Průměrná délka tracheidy se pohybuje v rozmezí 2 až 5 mm, přičemž tracheidy letního dřeva jsou cca o 10% delší. Průměr buňky



je od 2 do 8 mikrometrů, a mají značný počet dvojteček, letní dřevo 5-25 a jarní 60 až 100. Dvojtečky zajišťují vzájemné propojení tracheid, tudíž zajišťují transport látek. Parenchymatické buňky tvoří dřeňové paprsky, které jsou radiálně orientované a tvoří také podélně orientovaná parenchymatická pletiva a pryskyřičné kanálky.

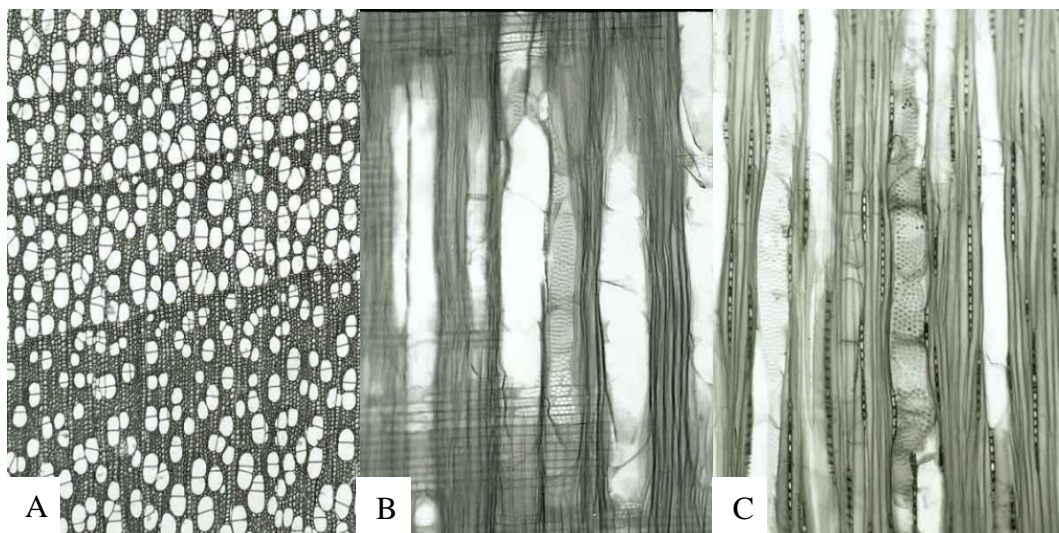
Listnaté dřeviny mají v porovnání s jehličnatými dřevinami mnohem složitější morfologickou stavbu. Pevnostní funkci plní libriformní vlákna, což jsou tlustostěnné zdřevnatělé buňky sklerenchymatického typu. Tvoří podstatnou složku z celkového objemu, v průměru 40-76 %. V průměru mají od 5 do 30 mikrometrů a jejich délka se pohybuje v rozmezí 0,3 – 2,2 mm. V důsledku malého počtu teček a dvojteček je vzájemná propojenost s ostatními elementy minimální. Tracheje (cévy) plní vodivou funkci, jejich objemové zastoupení 20-40 %. Průměr cév může být v rozpětí od 0,2 do 0,5 mm a délka je v průměru 10 mm ale například u dubu může mít céva až 7 metrů (Borůvka a Babiak, 2022).



Obrázek 5 – Buněčné elementy dřeva (Borůvka a Babiak, 2022)

### Topol osika

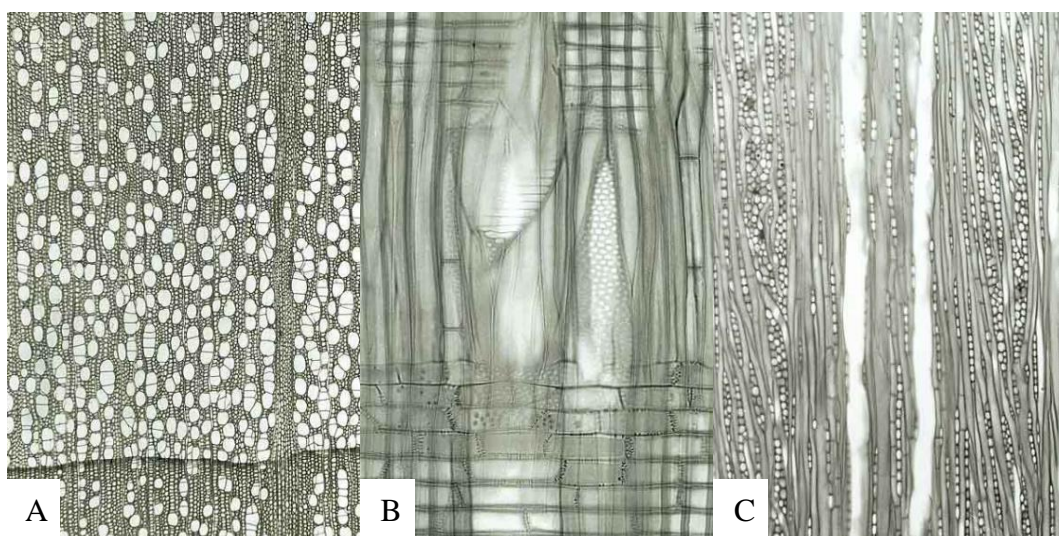
Cévy topolu osiky se vyskytují ve skupinách po 3–6 v radiálních řadách, dřevné paprsky jsou homogenní a většinou jednovrstvé. Perforace cév je jednoduchá a vykytuje se častý výskyt thyl.



Obrázek 6 – Mikroskopická stavba topolu: A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (Wood Anatomy, 2007)

### Olše lepkavá

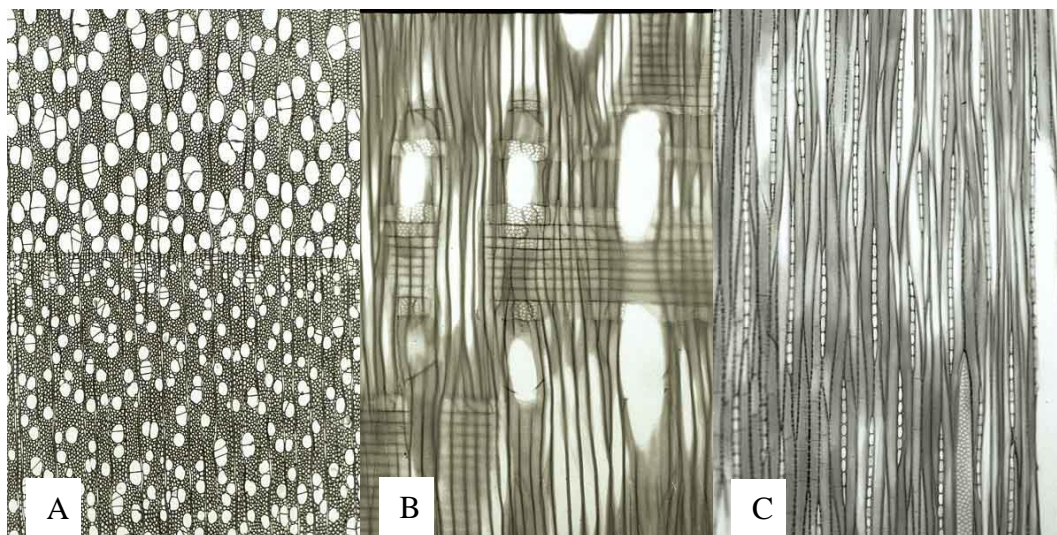
Cévy jsou velmi četné a úzké, vyskytují se krátkých radiálních řadách po 2-6, vyskytují se i samostatně, cévy jsou perforovány žebříčkovitě (12–25 příček). Dřevné paprsky jsou homogenní a jednovrstvé, často se seskupují v jeden sdružený nepravý dřevný paprsek a potom se tedy jeden sdružený dřevný paprsek skládá z 3-4 pravých jednovrstvných.



Obrázek 7 – Mikroskopická stavba olše: A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (Wood Anatomy, 2007)

## Vrba jíva

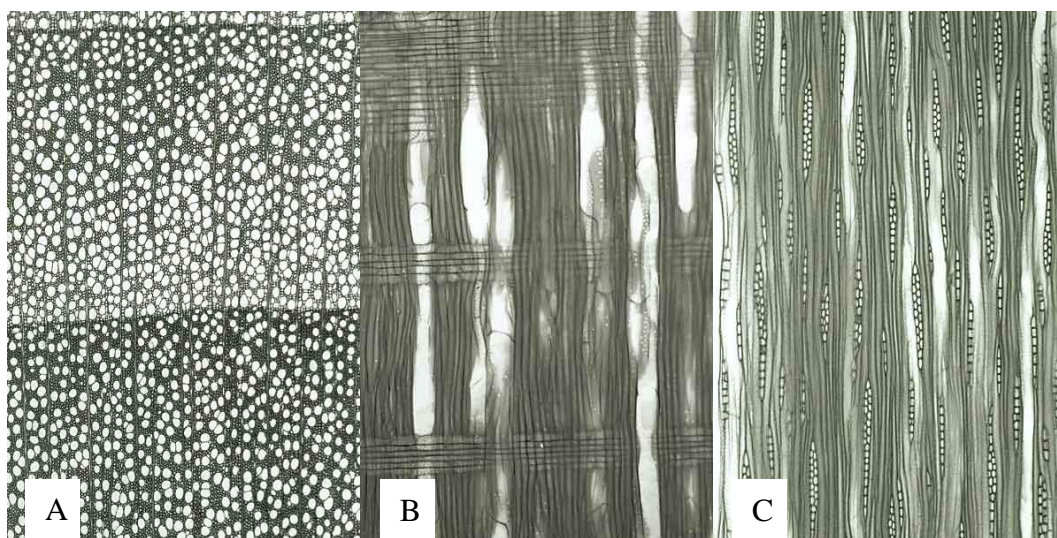
Mikroskopická stavba téměř identická s topolem, cévy jsou uspořádány jednotlivě nebo v krátkých radiálních řadách po 2-3. Perforace cév je jednoduchá, na podélných stěnách je častý výskyt dvojteček. Dřeňové paprsky jsou jednovrstevné a na rozdíl od topolu jsou heterogenní. Cévy nacházející se jádru neobsahují thyly (Balabán, 1955).



Obrázek 8 – Mikroskopická stavba vrby: A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (Wood Anatomy, 2007)

## Jeřáb ptačí

Cévy jsou úzké, samostatné a rovnoměrně roztroušené s jednoduchou perforací a častý je výskyt spirálních ztlustěnin. Dřeňové paprsky jsou heterogenní, jedno- i dvouvrstevné, poměrně tlustostěnné (Balabán, 1955).

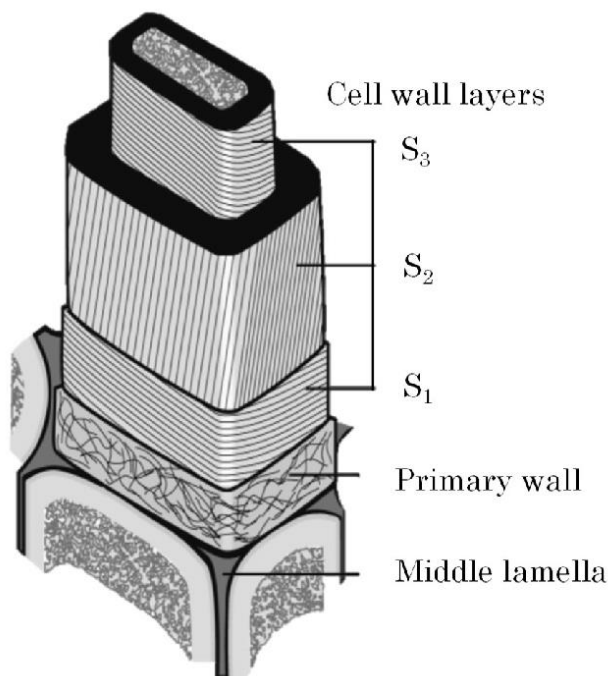


Obrázek 9 Mikroskopická stavba jeřábu: A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez (Wood Anatomy, 2007)

### 3.2.3 Submikroskopická stavba

Submikroskopická stavba dřeva zkoumá stavbu buněčných stěn z hlediska jejich vrstevnatosti. Samotná buněčná stěna není homogenní po strukturální a ani po chemické stránce a na jejím příčném řezu jí lze rozdělit na střední lamelu (SL), primární stěnu (P), sekundární stěnu, která se dělí na vnější vrstvu (S1), střední vrstvu (S2) a vnitřní vrstvu (S3).

Tvorba buněčné stěny probíhá při dělení buněk, kdy nejdříve vzniká plazmatická destička, která se následně diferencuje na střední lamelu a tvoří tedy první vzniklou vrstvu. Na nově vzniklé střední lamele vzniká primární vrstva a následně vzniká vrstva sekundární. Buňka tedy roste dovnitř, čímž se postupně zmenšuje vnitřní prostor buňky – lumen.



Obrázek 10 – Stavba buněčné stěny dřeva (Rowell, 2012)

#### **Střední lamela (SL)**

Střední lamela je spojovací strukturou mezi ostatními buňkami, jedná se o velmi úzkou, vysoce amorfní vrstvu, která silně lignifikuje. Tvoří jí až z 90 % lignin, který se ale chemickým i strukturálním složením liší od ligninu v ostatních vrstvách díky vyššímu polymerizačnímu stupni. (Gandelová a kol., 2009).

#### **Primární stěna (P)**

Primární stěna se tloušťkou a ani chemickou stavbou příliš neliší od střední lamely, je tedy těžko od střední lamely rozeznatelná. (Požgaj, 1993). V primární stěně pozorujeme

vyšší podíl celulózy, než u střední lamely, a právě díky orientaci celulózových fibril rozlišujeme primární vrstvu na dvě podvrstvy. Pro vnější primární vrstvu je typický nepravidelný průběh fibril a předpokládá se, že tyto fibrily procházejí i do střední lamely, čímž se vysvětluje podobnost vrstev. Vnitřní část primární stěny má celulózové fibrily částečně lehce orientovány a s podélnou osou buňky svírá úhel v rozmezí 0–90 ° (Požgaj, 1993).

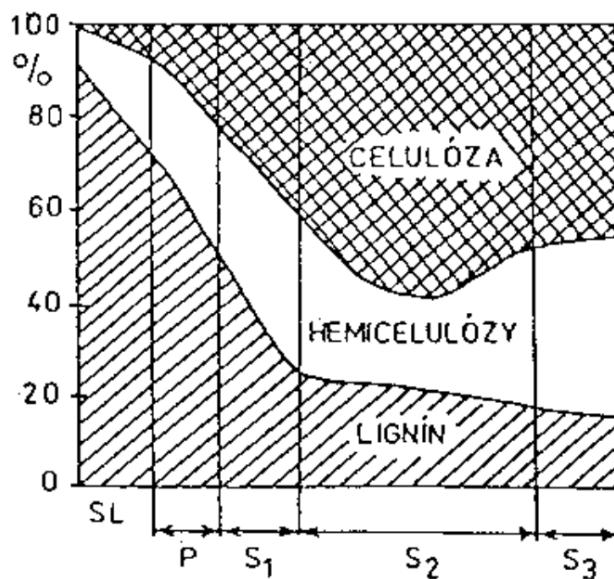
### **Sekundární stěna (S)**

Sekundární buněčná stěna je nejdůležitější částí buněčné stěny, jelikož udává buňce tvar a její vlastnosti výrazně ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Od předchozích vrstev se liší tloušťkou, vyšším zastoupením základních biopolymerů (celulózy a hemicelulózy) a orientací fibril. Dělí se na tři vrstvy, konkrétně to je vnější vrstva S1, střední vrstva S2 a vnitřní vrstva S3.

Vnitřní vrstva S1 je napojena na primární vrstvu, má největší podíl ligninu ze všech tří vrstev sekundární stěny a má více celulózy než vrstva primární. Fibrily jsou seskupeny do dvou navzájem kolmých vrstev a fibrily svírají s podélnou osou buňky úhel 45–80 °.

Vrstva S2 je nejpodstatnější částí celé buněčné stěny, jelikož je netlustší částí a její vlastnosti ovlivňují nejvíce vlastnosti dřeva. Vrstva S2 obsahuje nejvíce celulózy, která je zde ve velké části v krystalické formě. Odklon fibril od podélné osy buňky je 5–15°, přičemž fibrily probíhají v pravotočivých spirálách.

Vrstva S3 bývá vrstvou nejužší, je neblíže k lumenu a je tvořena hlavně celulózou a hemicelulózami. Vrstva u některých pozorovaných listnatých dřevin vůbec nelignifikuje. (Gandelová a kol., 2009). Ačkoliv je vrstva tenká, díky přítomnosti povlaku protoplazmy má vliv na sorpci, difúzi či propustnost.



Graf 1 – chemické složení buněčné stěny dřeva (Požgaj, 1993)

### 3.3 Vztah dřeva a vody

Dřevo je hygrokopický materiál, který je schopen přijímat nebo odevzdávat vodu v plynném či kapalném skupenství, a tudíž má schopnost měnit svoji vlhkost podle vlhkosti okolního prostředí. Tato schopnost dřeva vyplývá z ontogeneze anatomických částí dřeva, které byly při buněčné diferenciaci v plně nasyceném vodním prostředí (Horáček, 1998). Voda je tedy velmi důležitou součástí nejen rostoucího stromu, kde je nezbytná pro jeho existenci ale hraje také velmi důležitou roli samotném dřevě, kde ovlivňuje jeho fyzikální i mechanické vlastnosti. Díky hygrokopicitě dřevo však vždy prakticky nějakou vodu obsahuje.

### 3.4 Dřevo jako kapilárně-pórovitá látka

Díky různorodým anatomickým elementům dřeva je dřevo heterogenní pórovitá látka, která přijímá a vede vodu dvěma kapilárními systémy. Jedná se o systém mikrokapilární a makrokapilární.

- **Mikrokapilární systém** – fibriální struktura buněčné stěny, je tvořena intermicelárními a interfibriálními prostory, systém poutá vodní páru, tedy vodu vázanou

- **Makrokapilární systém** – to jsou všechny lumény a mezibuněčné prostory, které poutají vodu volnou

V podélném směru transport vody zajišťují hlavně makrokapiláry, přičemž hybnou silou je gradient tlaků, což je fyzikální síla. Napříč se voda pohybuje makrokapiláry, konkrétně ztenčeninami buněčných stěn a lumény dřevných paprsků a přes buněčnou stěnu se voda pohybuje mikrokapiláry. Hybnou silou u makrokapilárů je gradient koncentrací, tj. síla chemického charakteru.

### 3.5 Vlhkost dřeva

Vlhkost dřeva je přítomnost vody ve dřevě, konkrétně je to podíl hmotnosti vody k hmotnosti dřeva. Vlhkost dřeva se dělí na absolutní relativní. Absolutní vlhkost je vyjadřována jako podíl vody ve dřevě ku hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu. Právě vlhkost absolutní se používá pro charakteristiku fyzikálních vlastností dřeva její jednotka jsou procenta (Požgaj, 1993).

Relativní vlhkost dřeva je podíl hmotnosti vody ku hmotnosti mokrého dřeva. Tato vlhkost se využívá tam, kde je nutné znát procentuální zastoupení vody z celkové hmotnosti mokrého dřeva, tj. například při prodeji či nákupu dřeva (Požgaj, 1993).

#### 3.5.1 Rozdělení vody ve dřevě

Z hlediska uložení vody ve dřevě můžeme dělit vodu na chemicky vázanou, vodu vázanou a vodu volnou (Gandelová a kol., 2009).

- **Chemicky vázaná voda:** Je součástí chemických sloučenin nacházejících se ve dřevě a nemá vliv na vlastnosti dřeva. Z celkového objemu sušiny zastupuje pouze 1-2 % a nedá se ze dřeva odstranit jinak než spálením.
- **Voda vázaná:** Jinak také nazývaná hygroskopická je voda, která je vázaná vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny amorfní části celulózy a hemicelulózy. Nachází se tedy v buněčných stěnách a ve dřevě se vyskytuje v průměru v hodnotách 0-30 % právě tato vlhkost má největší vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti.
- **Voda volná:** Známa i pod jménem kapilární je ta voda, která vyplňuje lumény a interceluláry. Ve dřevě se vyskytuje jako volná kapalina za předpokladu, že se

tam vyskytuje i voda vázaná. Její vlhkostní hodnota je tedy od 30-200 % a nijak zásadně neovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti.

Stav buňky, kdy je buněčná stěna plně nasycena vodou, ale lumen ani interceluláry žádnou vodu v kapalném stavu neobsahuje, nazýváme bodem nasycení vláken (BNV). Podle prostředí, kterému je dřevo vystaveno, dělíme tento stav na mez hygroskopicity (MH) a mez nasycení buněčných stěn (MNBS). Mez hygroskopicity je tedy rovnovážná vlhkost dřeva, kterou dosáhne při dlouhodobému vystavení v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu blíží se maximální hodnotě. MNBS je definována jako maximální vlhkost buněčných stěn při dlouhodobém uložení dřeva ve vodě.

At' už je buněčná stěna nasycena v jakémkoliv prostředí, bude kterákoliv další voda, kterou dřevo přijme, uložena do lumenů buněčných stěn a intercelulár, a tudíž se bude jednat o vodu volnou, která vlastnosti dřeva neovlivňuje. (Hill, 2006).

Jak již bylo zmíněno, BNV je v průměru 30 % ale obecně se pohybuje v 22-35 %. Záleží na druhu dřeviny a její chemické a anatomické stavbě. BNV pro topol, olši, vrbu je 32-35 % (Gandelová a kol., 2009).

### 3.5.2 Rovnovážná vlhkost dřeva a teorie sorpce

Dřevo díky hygroskopicitě mění svoji vlhkost dle podmínek okolního prostředí a pokud se nachází v prostředí, kde je stálá relativní vzdušná vlhkost a teplota, nastává v dřevu stav, který nazýváme rovnovážná vlhkost dřeva. Stav, který je takto dosažen, je stavem vlhkostní rovnováhy (SVR). Dřevo tedy mění s každou změnou relativní vlhkosti a teploty svojí RVD a pokud je vlhkost dřeva nižší, než odpovídá SVR, dřevo z okolí přijímá – adsorbuje – vodu, dokud nedosáhne SVR. Pokud je vlhkost dřeva vyšší než SVR, dřevo naopak svému okolí vodu odevzdává, což nazýváme desorpce.

Adsorpce probíhá ve třech parciálních dějích. Mononukleární sorpce, polymolekulární sorpce a kapilární kondenzace.

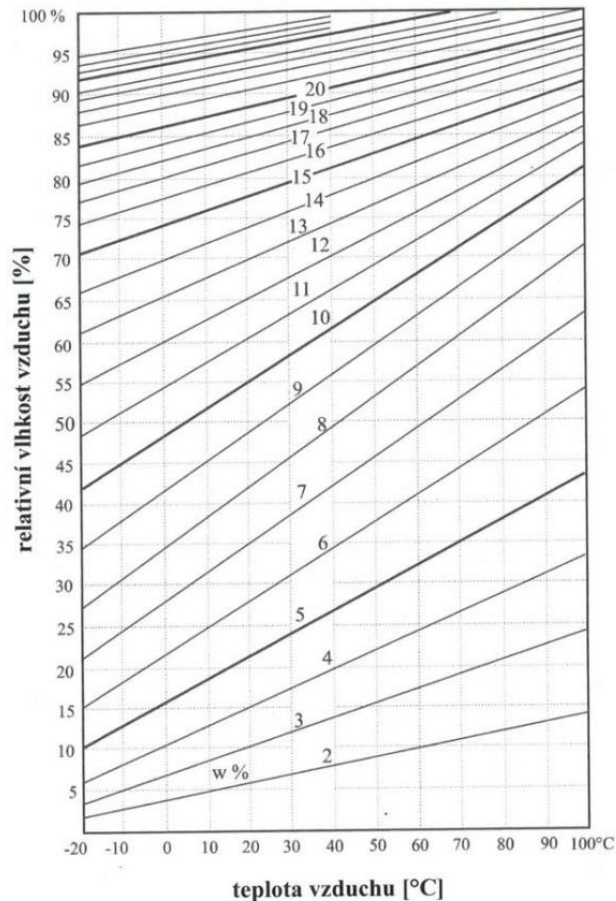
- **Mononukleární sorpce**, tj. molekuly vody jsou poutány přitažlivými silami k amorfním částem holocelulózy, kde jsou uchyceny vodíkovými můstky na volné hydroxylové skupiny. (Horáček, 1998). Při této sorpci je pravděpodobně na každé volné hydroxylové vazbě jedna molekula vody.
- **Polymolekulární sorpce** je druhá fáze, při které se na vrstvu molekul vody absorbují další molekuly vody a tvoří až pět řad molekul. Tato vrstva není rozložena rovnoměrně, některé oblasti adsorbují více než jiné.



- **Kapilární kondenzaci** způsobují mezimolekulární síly v mikrokapilárách, kde dochází ke kondenzaci vzdušné vlhkosti. Uplatňují se zde kapilární jevy a kohezní síly.

Vztah mezi vlhkostí dřeva a relativní vlhkostí okolního prostředí při konstantní teplotě můžeme graficky vyjádřit sorpční izotermou. Sorpční izoterma při adsorpci a desorpci není identická a tento jev se nazývá hystereze sorpce. Hodnoty adsorpce jsou nižší než hodnoty desorpce. Dle Gandelové a kol. (2009) je vysvětlení tohoto jevu obtížné a existuje několik teorií, z nichž žádnou nelze upřednostnit.

- Teorie rozdílného počtu volných hydroxylových skupin – Tato teorie předpokládá, že při adsorpci je méně volných hydroxylových skupin z důvodu vzniku silných chemicko-fyzikálních vazeb u suchého dřeva.
- Teorie kónických mikrokapilár – mikrokapiláry jsou ukončeny kónicky, a proto jsou rozdílné poloměry tvaru tekutiny na konci kapiláry. Rozdíl tlaků je při adsorpci nižší než při desorpci, což se projevuje na vyšší vzlínivosti mikrokapilárů při adsorpci, než při desorpci.
- Teorie hygroelastičnosti dřeva – mechanická napětí jsou jiná při desorpci a adsorpci, konkrétně při adsorpci vzniká napětí tlakové v povrchových vrstvách a při desorpci vzniká napětí tahové. Tudíž při tlakovém napětí



Graf 2 – diagram určující rovnovážnou vlhkost dřeva (Borůvka a Babiak, 2022)

### 3.6 Bobtnání a sesychání dřeva

Pokud se mění vlhkost dřeva v rozsahu 0 % až BNV, tj. v rozsahu volné vody, podléhá dřevo rozměrovým změnám. Rozměrové změny jsou lokalizovány v buněčné stěně, kde při bobtnání dochází k oddalování fibrilární struktury a při sesychání dochází naopak přibližování fibril.

#### 3.6.1 Bobtnání

Bobtnání ( $\alpha$ ) je schopnost dřeva zvětšovat svoje lineární, plošné či objemové rozměry. Bobtnání se dělí na celkové – tj. od absolutně suchého dřeva po BNV a bobtnání částečné, tj. v jakémkoliv menším intervalu. Bobtnání se nejčastěji vyjadřuje v procentech a je to podíl změny nabobtnalého dřeva k původnímu rozměru.

Bobtnání má anizotropní charakter a k největšímu bobtnání dochází napříč vláken díky orientaci fibril v S2 vrstvě, které mají odklon od podélné osy 15-30°. Nejvíce dřevo

bobtná v tangenciálním směru, konkrétně o 6-12 %, v radiálním směru bobtná o 3-6 % a nejméně ve směru podélném 0,1-0,4 % (Gandelová a kol., 2009). Bobtnání v konkrétních směrech vyjadřuje následující poměr:

$$\alpha_t : \alpha_r : \alpha_l = 20 : 10 : 1$$

Koeficient bobtnání  $K_{\alpha}$  uvádí změnu rozměrů, objemu či plochy, jestliže se vlhkost změní o 1 %. Tento koeficient se uvádí většinou v procentech a dle Horáčka (1998) vypočítá následujícím vztahem:

$$K_{\alpha_i} = \frac{\alpha_i}{dw} [\%]$$

$K_{\alpha_i}$  – Koeficient bobtnání [%]

$\alpha$  – bobtnání [%]

$i$  – index udávající směr, plochu nebo objem

$dw$  – rozdíl vlhkostí [%]

### 3.6.2 Sesychání

Sesychání ( $\beta$ ) je schopnost dřeva zmenšovat svoje lineární, plošné a objemové rozměry v důsledku ztráty vody volné. I sesychání má svůj koeficient sesychání  $K_{\beta}$  a Gandelová a kol. (2009) dělí dřeviny dle koeficientu objemového sesychání na:

- **dřeviny málo sesychavé:** akát, topol, vrba, olše, tis,
- **dřeviny středně sesychavé:** smrk, jedle, dub, javor, osika, jasan,
- **dřeviny hodně sesychavé:** bříza, buk, modřín, lípa, habr.

### 3.7 Smáčivost

Smáčivost je vlastnost kapaliny přilnout k povrchu tuhé látky. Pokud umístíme kapku kapaliny na povrch pevného tělesa, mohou nastat podle Bartovské a Šiškové (2005) dvě situace. Pokud je povrchová energie povrchu tělesa větší, než součet povrchové energie kapky a mezifázové energie těleso-kapka, pak se kapka rozestře do souvislé vrstvy. Pokud naopak bude povrchová energie tělesa menší, než součet povrchové energie kapky a mezifázové energie těleso-kapka, získává kapka na povrchu tělesa rovnovážný tvar, který je charakterizovaný tzv. kontaktním úhlem ( $\theta$ ), což je úhel, který svírá tečna k povrchu kapky začínají v rozhraní těleso-kapka (viz. Obrázek 11). Pokud je velikost úhlu smáčení  $\theta$  menší

než  $90^\circ$ , kapalina tuhou látku smáčí velmi dobře a daný materiál označujeme za hydrofilní. Pokud je naopak kontaktní úhel vyšší než  $90^\circ$ , mluvíme o špatné smáčivosti a smáčený materiál můžeme označit za hydrofobní.

Kontaktní úhel můžeme zjistit pomocí Youngovy rovnice, která platí pro ideálně hladký, chemicky homogenní a atomárně hladký povrch (Vineeth a kol. 2023).

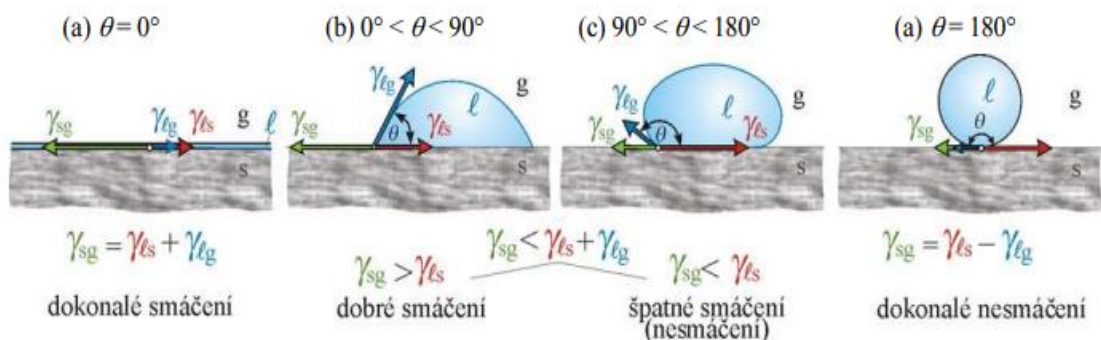
$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad [^\circ]$$

$\theta$  – Kontaktní úhel  $[^\circ]$

$\gamma_{sg}$  – mezifázové napětí pevná látka – plyn

$\gamma_{sl}$  – mezifázové napětí pevná látka – kapalina

$\gamma_{lg}$  – mezifázové napětí kapalina – plyn



Obrázek 11 – Kapka kapaliny na povrchu pevné látky (Bartovská a Šišková, 2005)

Smáčivost dřeva je oproti jiným látkám složitější z důvodu pórovitosti jeho struktury. Povrchová energie je jen jeden z mála faktorů, které smáčivost dřeva ovlivňují. Dalšími faktory jsou drsnost povrchu, heterogenita povrchu, vlhkost dřeva a mnoho dalších (Papp a kol., 2020). Díky pórovitosti Obecně platí, že je větší smáčivost na příčném řezu z důvodů příčného přerážnutí pórů, do kterých může voda lépe vnikat než do podélných vláken na podélných řezech.

Nejčastěji používaným způsobem měření smáčivosti je metodou přisedlé kapky pomocí měřicí aparatury skládající se ze zdroje světla, zařízení aplikující kapky, mikroskopu, kamery a počítače. Zdroj světla, mikroskop a kamera jsou umístěny ve stejné rovině, přičemž testovaný materiál je vložen mezi zdroj světla a mikroskop s kamerou. Po

zaostření mikroskopu se aplikuje kapka na zkoumaný povrch a kamera přenáší přiblížený obraz přes mikroskop do počítače, kde se vyhodnocuje kontaktní úhel.



Obrázek 12 – Aparatura k měření kontaktního úhlu pomocí přisedlé kapky (Holub, 2010)

### 3.8 Tepelná modifikace dřeva

Modifikace dřeva je proces, při němž se snažíme eliminovat negativní vlastnosti dřeva (rozměrová nestabilita vlivem vlhkosti, nízká biologická odolnost apod.) a zároveň se snažíme zachovat vlastnosti pozitivní (pevnost, pružnost, nízká hmotnost apod.) (Jurczyková a Kačík, 2020). Jednou z nejvíce používaných modifikací je právě tepelná modifikace. Tepelně upravené dřevo je takové dřevo, které bylo vystaveno vysokým teplotám určitou dobu v kontrolovaných podmínkách.

Již ve 20. letech minulého století se zjistilo, že tepelně upravené dřevo snižuje RVD a bobtnání (Esteves a Pereira 2009). Dalšími pozitivními vlastnostmi je nižší hygroskopicitu, zvýšená odolnost vůči biotickým činitelům, změna barvy dřeva a přirozenou vyšší trvanlivost dřeva. Tepelná úprava může mít i negativní vliv na vlastnosti, konkrétně na ty mechanické. Hill (2006) uvádí, že je dřevo křehčí a snižuje se jeho pevnost v rázové houževnosti, ohybu či tlaku.

#### 3.8.1 Změny ve dřevě vlivem tepla

Důvodem změn vlastností dřeva vlivem tepelné úpravy jsou změny, které se dějí na úrovni chemického složení dřeva. Do jaké míry je chemická stavba pozměněna závisí na teplotě. V teplotách v rozmezí 20 °C až 150 °C dochází k dehydrataci dřeva, přičemž nejdříve se ztrácí voda volná a následně voda vázaná. (Jurczyková a Kačík, 2020). Při

teplotách 150–170 °C dochází k zásahům v polymerní struktuře, přičemž nastávají významnější termooxidační a termolytické reakce (Reinprecht a Vidholdová, 2008). V rozmezí teplot od 180 do 250 °C, což je rozmezí teplot nejčastěji používané k tepelné úpravě, dochází k odbourávání ligninu a hemicelulóz za vzniku vody, oxidu uhličitého, kyselin a jiných látek. Při teplotách vyšších, než 260 °C dochází k procesu zuhelnatění.

Při termické úpravě dochází k poklesu hustoty což souvisí s poklesem hmotnosti. Důvodem je odbourávání některých chemických látek a vypařování vody. S vyšší teplotou klesá hustota dřeva, přičemž k nejvýraznějším úbytkům dochází při 170 °C a výše.

Dřevo má menší navlhavost oproti tepelně neupravenému dřevu, a zase zde platí, čím vyšší teplota a doba, tím menší navlhavost. Hlavní příčinou bude odbourávání hemicelulóz a hydrofilních hydroxylových skupin. Konkrétněji je tato problematika popsána v kapitole změny v chemické stavbě.

### 3.8.2 Změny v anatomické stavbě

Pro změnu v anatomické stavbě dřeva stačí teplota od 100 °C do 260 °C, přičemž hlavní a zásadní změnou je vznik trhlin v buněčných stěnách (Reinprecht a Vidholdová, 2008). Trhliny v buněčné stěně, konkrétně mezi vrstvou S1 a S2, objevil Fengel a Wegener (1989) a to již při 150 °C. Boonstra a kol. (2006) uvádí, že topol a buk byly náchylné na kolaps cév a deformaci libriformních vláken. Všechny zmíněné změny způsobují křehkost dřeva, a tudíž jsou více náchylné k mechanickému poškození.

### 3.8.3 Změny v chemické stavbě

- **Hemicelulózy:** Nejméně termicky stabilní složka ve dřevě, její termický rozklad probíhá od 170 °C, probíhá deacetylace, přičemž vzniká kyselina octová působí jako katalyzátor k depolymerizaci dalších polysacharidů. (Esteves a Pereira, 2009). Dle Weilanda a Guyonneta (2003) je hemicelulóza nejvíce hydrofilní polymer dřeva, a právě její degradací má termicky upravené dřevo nízkou afinitu k vodě, a tudíž lepší rozměrovou stálost.
- **Celulóza** je méně ovlivněna působením tepla především díky své většinové krystalické struktuře. Při termickém působení se krystalický podíl zvyšuje, jelikož degraduje amorfní podíl celulózy, a tudíž se zmenšuje počet hydroxylových skupin, na které se poutají molekuly vody.

- **Lignin** je nejvíce termicky stálou složkou dřeva, nejdříve dochází k jeho plastifikaci v rozmezí teplot 100-180 °C, při vyšších teplotách již nastávají chemické změny a nad 260 °C probíhá štěpení uhlíkových a etherových vazeb, tj. depolymerizace ligninu (Jurczykova a Kačík 2020).

### 3.8.4 Způsoby tepelné úpravy

Dle Jurczykova a Kačíka (2020) v poslední době stoupá zájem o termodřevo, jelikož současné trendy jako je udržitelnost, trvanlivost a netoxičita jsou pro zákazníky důležité. V současnosti mají největší význam tyto modifikace:

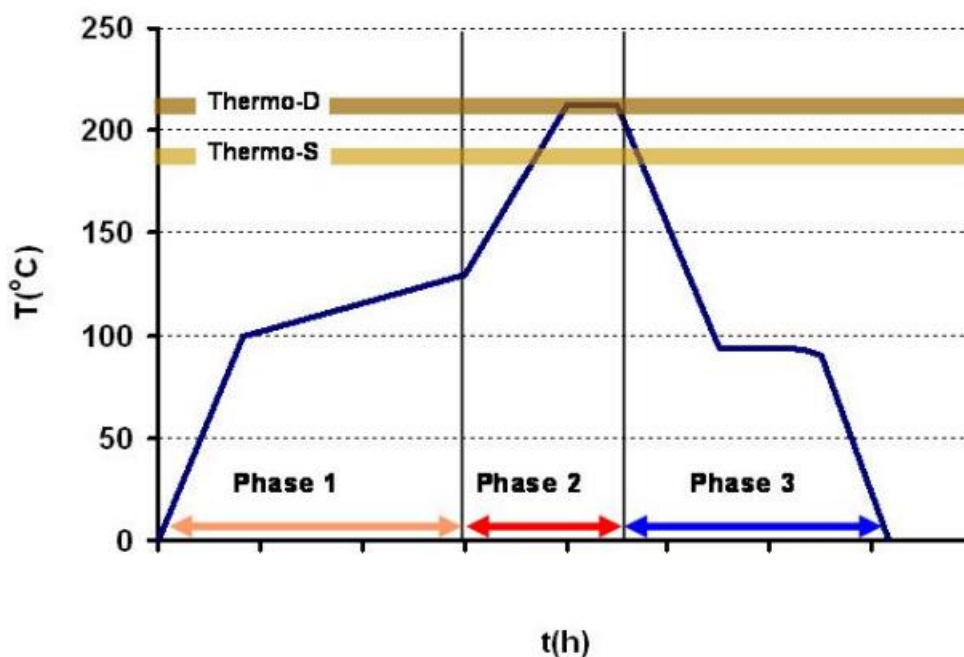
#### **ThermoWood**

Tento patentovaný, původně finský proces je neznámější a nejrozšířenější v Evropě. Nejčastěji se takto upravují dřeviny smrku a borovice. Celý proces se stává ze tří navzájem navazujících fází:

1. Fáze – Zvýšení teploty a předsušení – teplota se rapidně zvýší na 100 °C a poté pomalu až na 130 °C, přičemž odpařená voda ve formě vodní páry nahrazuje kyslík uvnitř komory a proces je tedy mírně pod tlakem.
2. Fáze – Tepelná modifikace – teplota se zvýší na 185-220 °C po dobu 2 až tří hodin. Finální teplota a čas závisí na požadovaném stupni modifikace.
3. Fáze – Chlazení a úprava vlhkosti – Při finální fázi se dřevo zchladí vodou na teplotu 80-90 °C a přítomnost vody zajistí zvýšení vlhkosti dřeva na požadovanou úroveň, nejčastěji mezi 4-7% rovnovážné vlhkosti.

ThermoWood dělí své modifikovaná dřeva dle teploty, při které tepelná modifikace probíhá, na Thermo – S, které je modifikováno při teplotě 190 °C a Thermo – D, jehož teplota při modifikaci je 212 °C. Výše uvedené teploty platí pro smrk (ITA,2003).

## ThermoWood® process



Graf 3 - Průběh tepelné úpravy ThermoWoodu (ITA, 2003)

## PlatoWood

Tento způsob, používaný hlavně v Nizozemí, používá čerstvé dřevo a má 4 fáze.

1. Fáze – Hydrotermolýza – trvá 4-5 hodin v rozmezí teplot 160-190 °C ve vlhkém prostředí při zvýšeném tlaku
2. Fáze – Sušení – Dřevo je vysoušeno na rovnovážnou vlhkost okolo 10 % v časovém rozmezí 3-5 dnů.
3. Fáze – Dřevo je znovu termováno na 170-190 °C po dobu 14-16 hodin, tentokrát ale v suchém prostředí.
4. Fáze – Stabilizace – dřevo se stabilizuje na normální vlhkost po dobu asi 3 dnů, přičemž RVD se ustálí na 4-6 %.

Celková doba působení závisí na druhu dřeviny, rozměrech a finálnímu použití výrobku (Esteves a Pereira, 2009).

## OHT Wood

Tento zcela odlišný způsob používá lněný olej, který je zahříván na teploty v rozmezí 180–200 °C po dobu 2-4 hodin. Celková doba i fázemi chlazení trvá 18 hodin. Výhodou



oleje jako média je fakt, že umožňuje dobrý rovnovážný ohřev a redukuje přístup kyslíku, na druhou stranu dřevo díky své hygroskopicitě nasává při ohřevu značnou část oleje a jeho hmotnost na konci procesu je vyšší v průměru o 60 % (Rapp a kol.,2001).

### **Retiwood**

Při tomto procesu se používá dřevo s vlhkostí 12 % a je vystaveno teplotám od 200 °C do 240 °C v dusíkové atmosféře s maximální 2 % koncentrací kyslíku. (Jurczykova a Kačík, 2020).

## 4 Metodika

### 4.1 Vzorky a jejich příprava

Vytěžení reprezentativních zástupců zkoumaných dřevin probíhalo v Kostelci nad Černými lesy. Následně byla kulatina rozmítána na středové a boční řezivo, které se nechalo vyschnout na cca 15% absolutní vlhkosti. Po vyschnutí se z fošen vymanipulovala zkušební tělesa o rozměrech 300x100x20 mm (délka x šířka x výška) pro měření smáčivosti. Druhý typ vzorků měl rozměry 300x20x20mm, přičemž tyto vzorky byly po tepelné úpravě testovány na mechanické vlastnosti v rámci jiné závěrečné práce. Po naměření mechanických vlastností se z krajních částí odřízly 30 mm vzorky, které byly použity ke stanovení míry bobtnání. Finální rozměr těchto vzorků byl tedy 30x20x20 mm (délka x šířka x výška).

### 4.2 Tepelná úprava

Vzorky byly rozděleny na třetiny, přičemž jedna třetina nebyla nijak termicky upravena, druhá třetina vzorků byla tepelně upravena na 170 °C a poslední třetina vzorků byla tepelně upravena na 190 °C. Tepelná úprava se prováděla podle způsobu ThermoWood. Vzorky byly tepelně upraveny v Kostelci nad Černými lesy ve výzkumné stanici Truba v laboratorní vysokoteplotní komoře typu KHT od firmy KATRES.

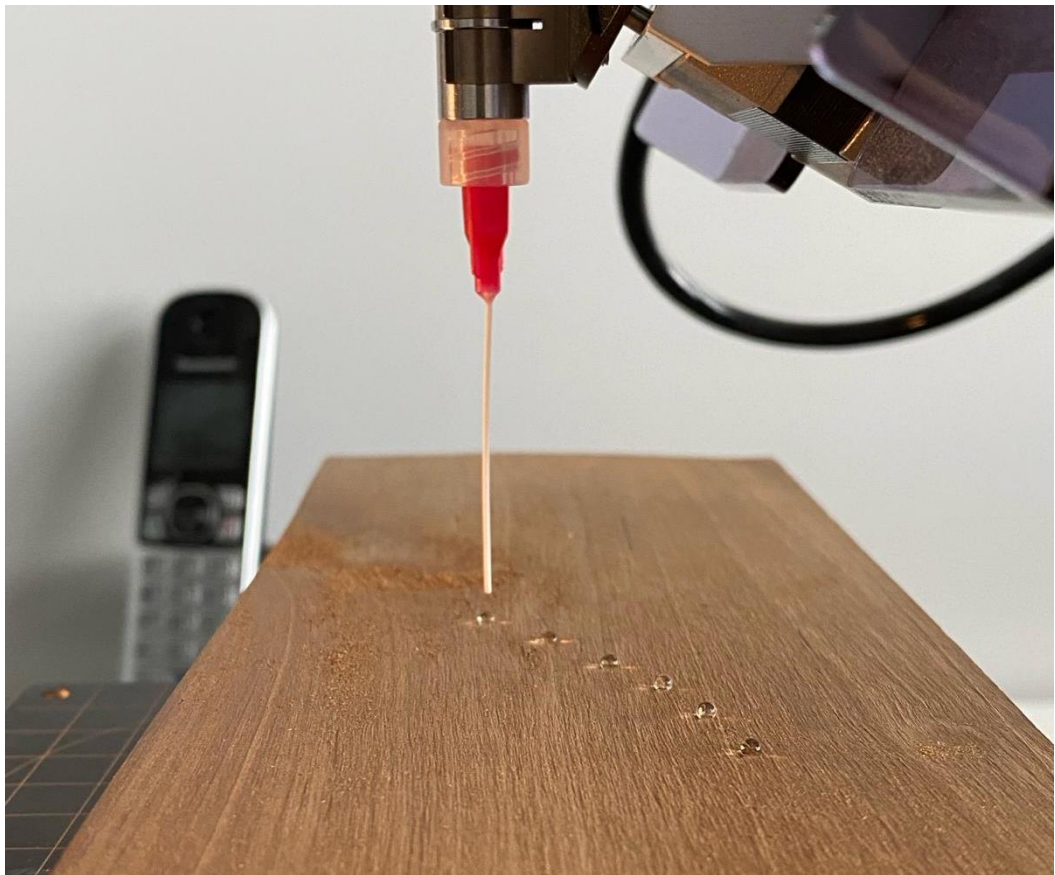


Obrázek 13 – Komoře typu KHT od firmy KATRES (autor)

## 4.3 Měření

### 4.3.1 Smáčivost

Před měřením byly vzorky klimatizovány na 20 °C a 65% relativní vzdušné vlhkosti. Smáčivost byla naměřena pomocí metody kontaktního úhlu na přístroji KRÜSS DSA30. Kapalinou používanou na měření byla destilovaná voda o teplotě 20 °C a velikost jedné kapky byla 5  $\mu$ l. Kapky byla nanášeny na plochy podélných řezů vzorků, konkrétně na jednom vzorku bylo měření provedeno šestkrát. Kapky byly nanášeny na vzorek úhlopříčně (viz. obr. 14), aby nedocházelo k měření jen v rámci jednoho či dvou letokruhů. Po nanesení kapky a uplynutí 5 vteřin byl pořízen snímek kapky a software vyhodnotil oba dva kontaktní úhly, ze kterých byl udělán aritmetický průměr, který byl zaznamenán do tabulky.



Obrázek 14 – Měření smáčivosti (autor)

### 4.3.2 Hustota

Určení hustot všech vzorků bylo zjištěna dle normy ČSN 49 0108, přičemž hmotnost vzorků v gramech byla stanovena na digitální laboratorní váze KERN KB 3600-2N s přesností na 0,01g a rozměry vzorků byly zjištěny pomocí digitálního posuvného měřítka KINEX ABSOLUTE ZERO s přesností na 0,01 mm.

Hustota absolutně suchého dřeva byla zjišťována u všech vzorků, které byly zkoumány na rozměrovou stabilitu. Dle výše zmíněné normy se hustota v absolutně suchém stavu vypočítá následovně:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad [kg.m^{-3}]$$

$\rho_0$  – hustota dřeva v absolutně suchém stavu [kg.m<sup>-3</sup>]

$m_0$  – hmotnost tělesa v suchém stavu [kg]

$V_0$  – objem tělesa v suchém stavu [m<sup>-3</sup>]

Konvenční hustota udává, kolik sušiny se nachází v maximálně nabobtnalém objemu dřeva. Dle výše uvedené normy se konvenční hustota vypočítá následovně:

$$\rho_k = \frac{m_0}{V_{max}} \quad [kg.m^{-3}]$$

$\rho_k$  – konvenční hustota [kg.m<sup>-3</sup>]

$m_0$  – hmotnost tělesa v suchém stavu [kg]

$V_{max}$  – objem tělesa při vlhkosti vyšší než BNV [m<sup>-3</sup>]



Obrázek 15 – Laboratorní váha KERN KB3600 – 2N a digitální posuvné měřítko KINEX ABSOLUTE ZERO (autor)

### 4.3.3 Bobtnání

Stanovení bobtnání všech vzorků proběhlo dle normy ČSN 49 0126. Pro určení maximálního bobtnání byly vzorky vysušeny na nulovou absolutní vlhkost při teplotě  $103 \pm 2$  °C do ustálení rozměrů. Po vysušení se zjistily pomocí digitálního posuvného měřítka rozměry vzorků v jednotlivých směrech. Následně byly vzorky uloženy do destilované vody o teplotě  $20 \pm 2$  °C a bylo zajištěno, aby vzorky byly ponořeny celé. Vzorky byly průběžně kontrolovány a po ustálení rozměrů se vzorky z vody vyjmuly a byly znovu změřeny rozměry v konkrétních směrech pomocí digitálního posuvného měřítka.

V jednotlivých směrech se maximální bobtnání vypočítá dle ČSN 49 0126 následovně:

$$\alpha_{x \max} = \frac{l_{x \max} - l_{x \min}}{l_{x \min}} * 100 [\%]$$

$\alpha_{x \max}$  – maximální bobtnání v daném směru [%]

$l_{x \max}$  – rozměr vzorku v daném směru při vlhkosti větší než BNV [mm]

$l_{x \min}$  – rozměr vzorku v daném směru v absolutně suchém stavu [mm]

Celkové objemové bobtnání ( $\alpha_{Vmax}$ ) uvádí, o kolik se zvětšil objem vzorku. Uvádí se většinou v procentech a ČSN 49 0126 ho vykládá následovně:

$$\alpha_{Vmax} = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{min}} * 100 \text{ [%]}$$

$\alpha_{Vmax}$  – Celkové objemové bobtnání [%]

$V_{max}$  – Objem vzorku při vlhkosti vyšší než BNV [mm<sup>3</sup>]

$V_{min}$  – Objem vzorku v absolutně suchém stavu [mm<sup>3</sup>]

#### **4.4 Statistické zpracování dat**

Záznam dat a základní statistické hodnoty byly zaznamenány a zhotoveny v programu Microsoft Excel. Pro výzkum vlivu tepelné úpravy a konkrétní dřeviny na konkrétní vlastnost byla použita dvou-faktorová analýza rozptylu (ANOVA) v programu Statistica. Pro ověření statistické významnosti zjištěného efektu byl použit Duncanův post-hoc test. Hladina významnosti byla pro všechny zmíněné testy  $\alpha=0,05$ .

Ve stejném programu byla vyhotovena závislost mezi sledovanými faktory a pro vyjádření této závislosti byl vyhotoven korelační diagram.

## 5 Výsledky a diskuze

Na následujících stranách jsou vyobrazeny výsledky v grafické a tabelární podobě. V první tabulce této kapitoly jsou uvedené procentuální změny měřených vlastností vzhledem k referenčním vzorkům. V dalších podkapitolách jsou rozebrány konkrétní vlastnosti, je popsáno, co se změnilo a nezměnilo vlivem tepelné úpravy a hodnoty jsou porovnány s odbornou literaturou či odbornými články. Ke každé kapitole je přidána přehledná tabulka se základními statistickými údaji a grafická podoba výsledků je výstup z ANOVY.

Tabulka 1 – Přehled procentuálních změn zkoumaných vlastností vztažených k referenčním vzorkům

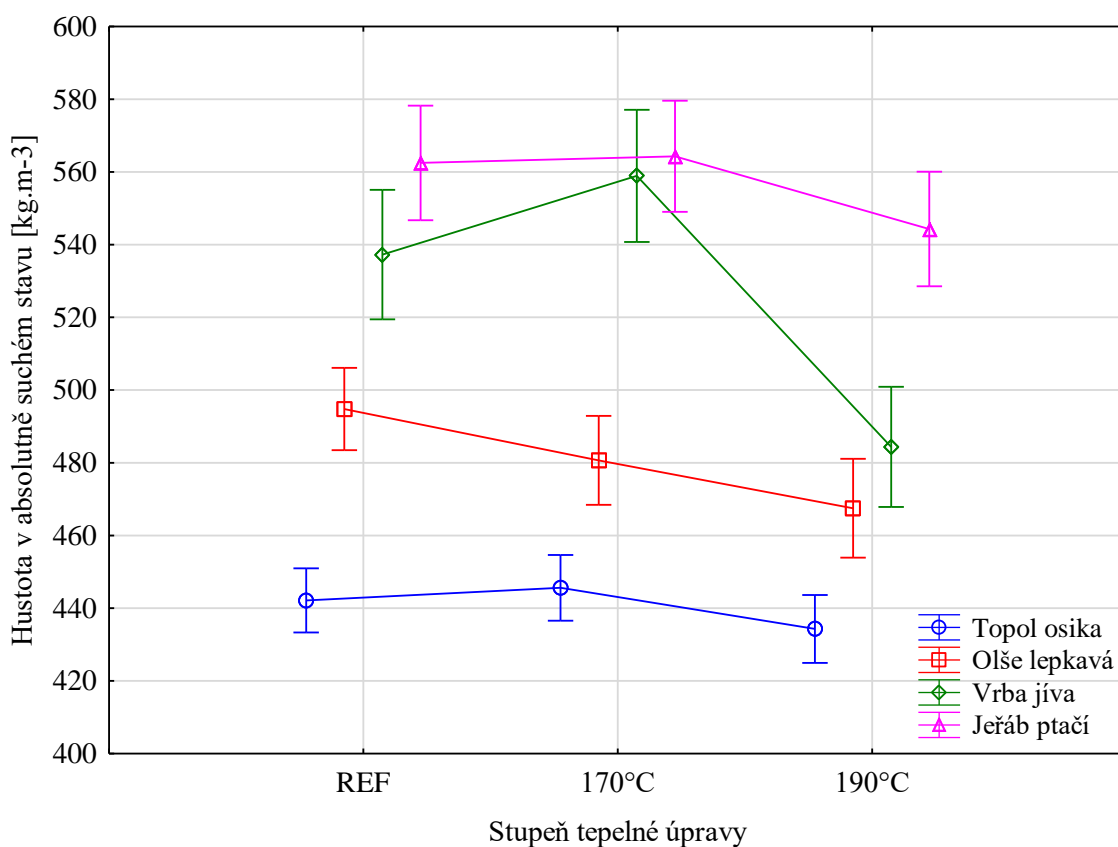
	Topol		Olše		Vrba		Jeřáb	
	170 °C	190 °C	170 °C	190 °C	170 °C	190 °C	170 °C	190 °C
<b>Hustota v abs. suchém stavu</b>	0,8	-1,8	-2,8	-5,6	4,1	-10,6	0,5	-3,2
<b>Konvenční hustota</b>	3,4	3,7	-0,2	0,0	-4,8	-5,5	0,8	1,7
<b>MNBS</b>	-18,2	-37,0	-15,5	-36,1	-17,7	-33,7	-2,5	-31,5
<b>Bobtnání - objemové</b>	-17,3	-37,7	-17,7	-39,6	-7,8	-36,9	-1,6	-33,3
<b>Bobtnání - radiální směr</b>	-13,5	-28,8	-22,0	-33,9	-11,8	-27,5	0,0	-31,6
<b>Bobtnání - tangenciální směr</b>	-17,7	-37,5	-10,2	-37,5	-3,6	-40,2	-1,8	-29,5
<b>Smáčivost - kontaktní úhel</b>	42,4	40,7	23,6	30,7	58,8	76,4		

Při vyhodnocení výsledků bylo primární posoudit vliv tepelné úpravy, konkrétně jak velký rozdíl je mezi jednotlivými dřevinami, a tedy zda nějaká dřevina vykazuje odlišné vlastnosti při stejném stupni tepelné úpravy než dřeviny ostatní. Tento jev můžeme pozorovat u smáčivosti vrby a u většiny posuzovaných vlastností první tepelné úpravy jeřábu. Ostatní posuzované vlastnosti kopírovaly podobný trend nebo zůstaly bez výraznější změny.

## 5.1 Hustota v absolutně suchém stavu

Hustoty dřevin v absolutně suchém stavu částečně kopírují trendy jiných podobných výzkumů, tj. s vyšším stupněm tepelné úpravy klesá hustota. Výjimkou je zde vrba, konkrétně první stupeň tepelné úpravy, kde se hustota zvýšila. Podobný trend zjistil Yildiz (2002), který pozoroval navýšení hustoty buku o 2,25 % při tepelné úpravě 130 °C po dobu 2 hodin. S prvním stupněm tepelné úpravy se statisticky významně změnila jen hustota vrby, ostatní dřeviny dle Duncanova testu (viz. příloha 1) významnou změnou neprošly.

Pokles hustot nastal u všech zkoumaných dřevin při dosažení druhého stupně tepelné úpravy (190 °C), statisticky významně se vůči referenčním vzorkům změnila hustota olše a vrby. Hustota se snížila i u topolu (-1,8 %) a u jeřábu (-3,2 %), nicméně Duncanův test nepovažuje tyto změny za statisticky významné. Podobné trendy potvrdili i Tasdemir a Hiziroglu (2014) kdy při tepelné úpravě topolu při 200 °C byla hustota nižší o téměř 4 %, dále pak Kvietková a kol. (2015), při teplotě 190 °C klesla hustota břízy o 5 %. Trend potvrzuje i ITA (2003), která udává trend poklesu hustoty od 160 °C.



Graf 4 – Vliv tepelné úpravy na hustotu v absolutně suchém stavu



Tabulka 2 – Základní statistické údaje hustoty v absolutně suchém stavu

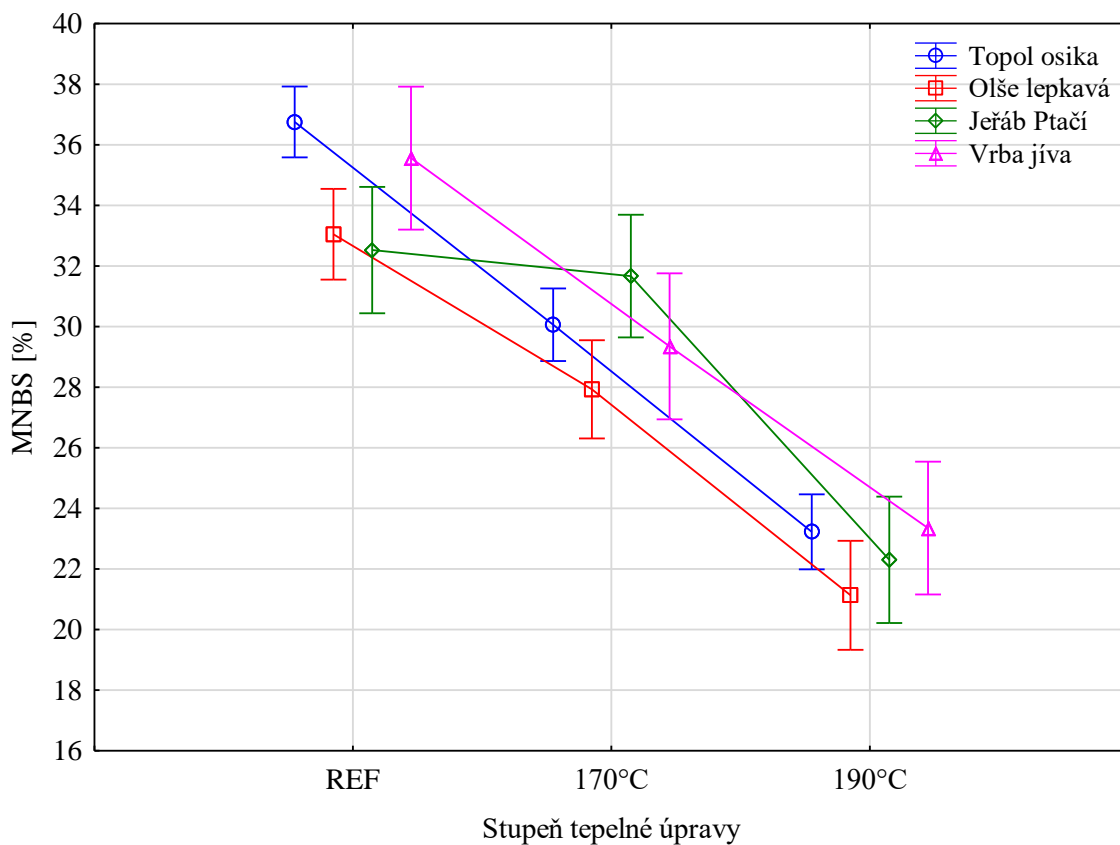
Dřevina a stupeň úpravy		Průměr	MIN	MAX	Směrodatná odchylka	Variační koeficient [%]
Topol	REF	442	370	566	36	8
	170 °C	446	348	570	40	9
	190 °C	434	339	560	33	8
Olše	REF	495	462	540	21	4
	170 °C	481	410	538	25	5
	190 °C	467	413	510	26	6
Vrba	REF	537	199	625	94	17
	170 °C	559	473	595	38	7
	190 °C	484	279	595	95	20
Jeřáb	REF	562	466	618	45	8
	170 °C	565	456	654	57	10
	190 °C	544	447	683	52	10

Průměrné referenční hodnoty, tj. hustoty absolutně suchých dřevin všechny, se shodují s odbornou literaturou. Dokonce i vrba, která má široký rozptyl hodnot, tudíž i nejvyšší variabilní koeficient.

## 5.2 Mez nasycení buněčných stěn

Meze nasycení buněčných stěn u všech dřevin s tepelnou úpravou klesají téměř identicky. Výjimkou je jeřáb, kterou první stupeň tepelné úpravy neovlivnil tak výrazně, jako ostatní dřeviny (viz. Graf 5). Duncanův test (viz. Příloha 2) tento mírný pokles nepovažuje za statisticky významný, ostatní změny již statisticky významné jsou. Druhý stupeň již vrba kopíruje trend ostatních dřevin.

Hill a kol. (2021) uvádí, že s rostoucím stupněm tepelné úpravy klesá maximální nasycení buněk volnou vodou z důvodu redukce hydroxylových skupin. Hrčka a kol (2020) uvádí podobné změny, při tepelné úpravě dubu v rozmezí teplot 160 °C až 240 °C klesá maximální nasycení buněčných stěn podobným trendem.



Graf 5 – Vliv tepelné úpravy na mez nasycení buněčných stěn

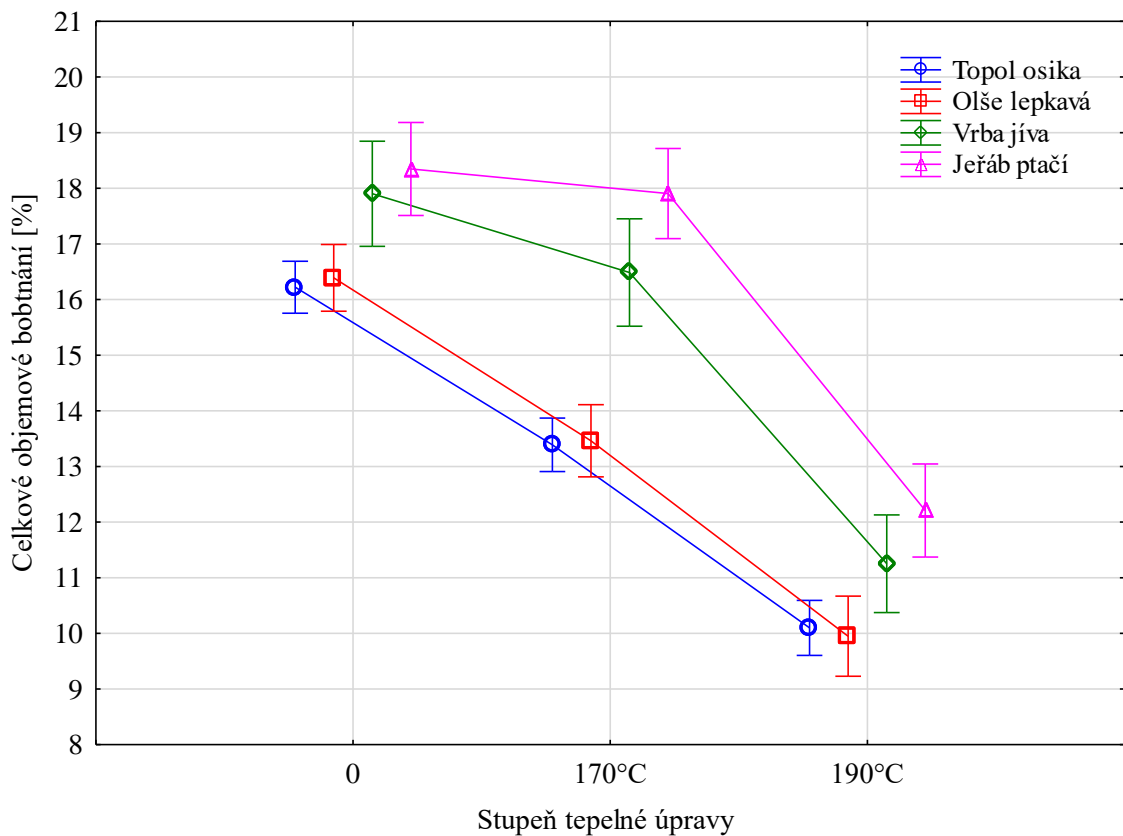
Tabulka 3 – Základních statistické údaje meze nasycení buněčných stěn

Dřevina a stupeň úpravy		Průměr	MIN	MAX	Směrodatná odchylka	Variační koeficient [%]
Topol	REF	36,8	18,4	64,3	5,6	15,2
	170 °C	30,1	15,9	43	4,2	13,8
	190 °C	23,2	16	39,6	3,5	15,2
Olše	REF	33	24,1	43,2	3,8	11,6
	170 °C	27,9	20	41,9	4,2	14,9
	190 °C	21,1	14,8	31,9	3,8	17,8
Vrba	REF	36,9	25,5	131,8	20,1	54,5
	170 °C	29,3	22,3	37,3	3,5	12
	190 °C	23,6	16,3	35,8	3,7	15,8
Jeřáb	REF	32,5	26,1	42,7	3,9	11,8
	170 °C	31,7	24	47,3	4	12,4
	190 °C	22,3	16,6	27,8	2,6	11,8

### 5.3 Bobtnání

Bobtnání bylo po smáčivosti druhou nejvíc ovlivněnou vlastností dřeva po tepelné úpravě. Posuzováno bylo hlavně bobtnání ve směru radiálním a tangenciálním, jelikož dochází k největším rozměrovým změnám napříč vláken. K změnám podél vláken dochází také ale jsou minimální a díky tomu se výrazněji projeví chyby měření.

Dle literatury tepelně upravené dřevo bobtná méně. Tato skutečnost se potvrdila u všech dřevin, přičemž při druhém stupni úpravy (190 °C) bylo objemové bobtnání nejnižší. Zatímco u topolu, olše a vrby bylo bobtnání statisticky významné, u jeřábu první úprava při 170 °C bobtnání zásadně neovlivnila a dle Duncanovo testu (viz Příloha 4) nebyla ani statisticky významná. Hlavní zlom nastal u úpravy při 190 °C, kde u všech dřevin bobtnání statisticky významně kleslo.



Graf 6 – Vliv tepelné úpravy na celkové objemové bobtnání

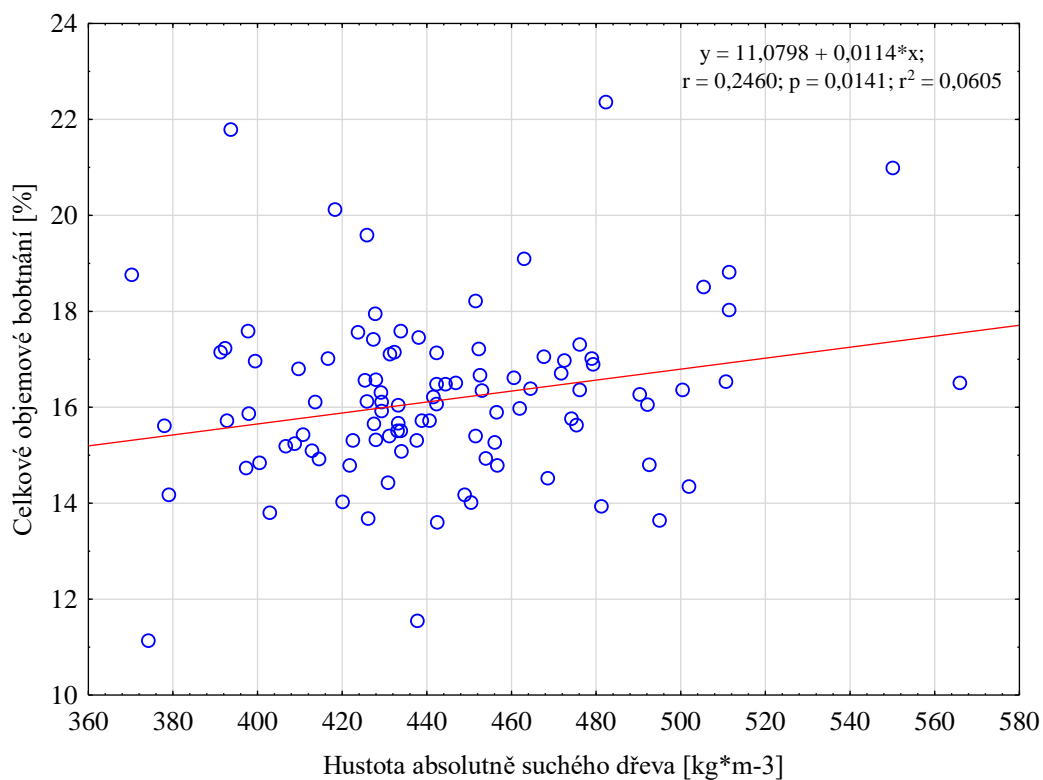
Düzkale Sözbir a Bektas (2017) uvádí celkové objemové bobtnání topolového dřeva upraveného při 160 °C přibližně 12 % a při 200 °C přibližně 8 %. Aytin a Korkuk (2016) pro tepelně upravenou olši uvádí celkové objemové bobtnání při úpravě 180 °C přibližně 14,4 %, radiální bobtnání 5,3 % a tangenciální bobtnání 8 %. Při úpravě 200 °C objemové bobtnání vyšlo necelých 12,3 %, radiální 4,7 % a tangenciální 6,9 %. Při srovnání s vypočtenými hodnotami je vidět stejný trend procentuálních změn. Grafické výsledky radiálního a tangenciálního bobtnání jsou v příloze, viz. Příloha 5 a 6 a základní statistické údaje těchto bobtnání jsou uvedeny v tabulkách 5 a 6.

Tabulka 4 - Základní statistické údaje celkového objemového bobtnání

Dřevina a stupeň úpravy		Průměr	MIN	MAX	Směrodatná odchylka	Variační koeficient [%]
Topol	REF	16,2	7,3	27	2,2	13,7
	170 °C	13,4	6,5	20,5	1,9	14,3
	190 °C	10,1	5,7	16,9	1,5	15,2
Olše	REF	16,4	12,5	20,5	2	12
	170 °C	13,5	10	21,3	2,2	16
	190 °C	9,9	6,1	16	2,1	3,8
Vrba	REF	17,9	1,8	26,4	4,8	26,8
	170 °C	16,5	11,5	21,6	2,5	15
	190 °C	11,3	6,4	16,2	2,5	21,8
Jeřáb	REF	18,9	14,4	26,3	2,8	14,6
	170 °C	17,9	12,9	22,7	2,7	14,8
	190 °C	12,2	8,1	16,6	2	16,5

Největší objemové bobtnání neupravených dřevin bylo v průměru naměřeno u jeřábu, naopak nejméně bobtnající neupravená dřevina byl topol. Naopak největší vliv tepelné úpravy můžeme pozorovat při druhém stupni tepelné úpravy olše, které klesla hodnota objemového bobtnání vůči referenčním hodnotám o 39,6 %. Významnost tohoto trendu potvrzuje i nízký variační koeficient.

Graf 7 udává závislost celkového objemového bobtnání topolu na hustotu v absolutně suchém stavu. Kořaleční koeficient vyšel nízký, pouze 0,25, což značí nepatrnou závislost. Dle Požgaje (1993) se s rostoucí hustotou zvyšuje procentuální podíl bobtnání, což potvrzuje zjištěná závislost topolu.



Graf 7 - Závislost celkového objemového bobtnání topolu na jeho hustotu v absolutně suchém stavu

Tabulka 5 - Základní statistické údaje radiálního bobtnání

Dřevina a stupeň úpravy		Průměr	MIN	MAX	Směrodatná odchylka	Variační koeficient [%]
Topol	REF	5,2	2,6	10	1,5	27,6
	170 °C	4,5	0,1	9,1	1,5	32,3
	190 °C	3,7	-1,8	10,7	1,7	47,3
Olše	REF	5,9	2,8	12,2	1,6	26,5
	170 °C	4,6	1	9,4	1,3	37,8
	190 °C	3,9	1,5	7,8	1,5	28
Vrba	REF	5,1	2,9	10,3	1,8	35,8
	170 °C	4,5	2,5	7,8	1,1	24,4
	190 °C	3,7	1	8,1	1,3	36
Jeřáb	REF	5,7	-1,9	11,6	2,4	41,6
	170 °C	5,7	2,7	11,2	1,7	29,3
	190 °C	3,9	1,2	6	0,9	24

Tabulka 6 - Základní statistické údaje tangenciálního bobtnání

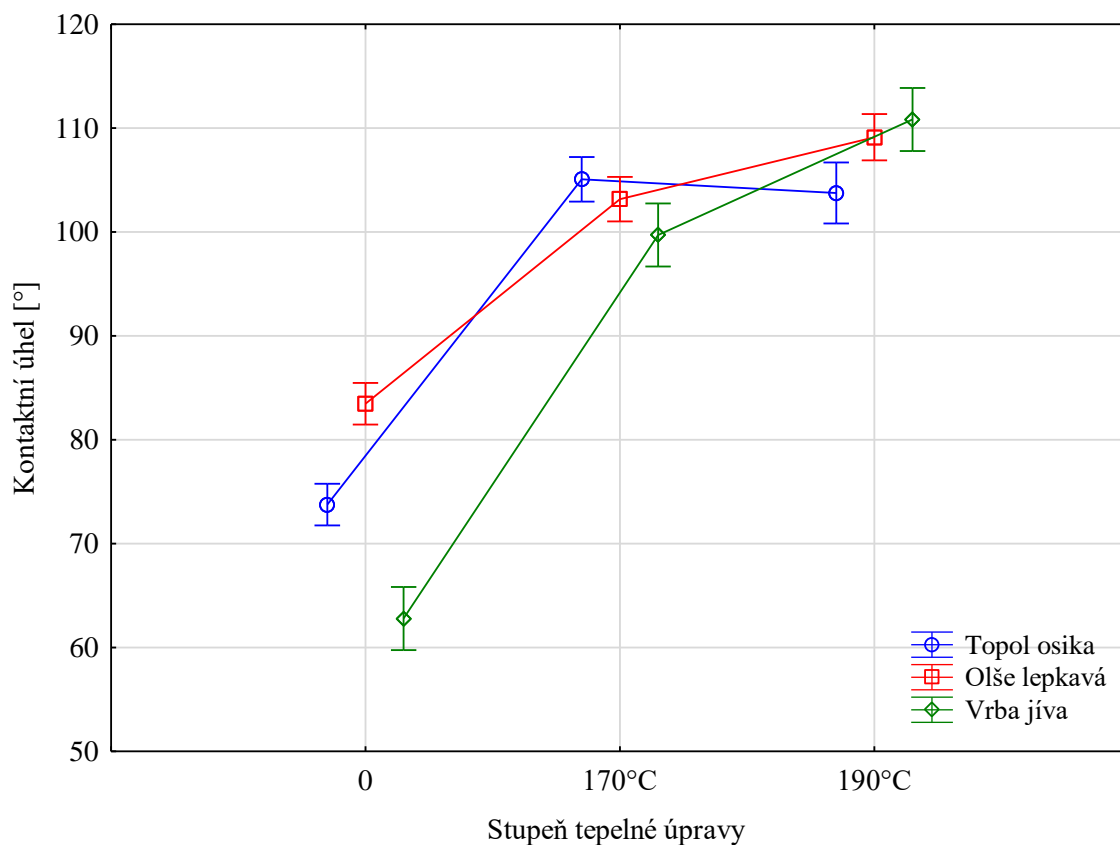
Dřevina a stupeň úpravy		Průměr	MIN	MAX	Směrodatná odchylka	Variační koeficient [%]
Topol	REF	9,6	2,8	15,8	2,2	13,7
	170 °C	7,9	3,4	10,3	1,2	15,1
	190 °C	6	0,4	9,6	1,5	24,5
Olše	REF	8,8	2,7	12,7	1,9	21,3
	170 °C	7,8	5,3	14,6	1,6	20,4
	190 °C	5,5	2,3	8,5	1,5	27
Vrba	REF	11,5	5,2	15,6	2,6	21,8
	170 °C	10,8	6,3	14	1,6	14,8
	190 °C	6,7	1,9	10	2	29,8
Jeřáb	REF	11,2	2,5	13,9	2,4	21,3
	170 °C	11	6,1	13,4	2	18
	190 °C	7,9	4,8	10,7	1,5	19,6

## 5.4 Smáčivost

Tepelná úprava měla na smáčivost největší vliv ze všech sledovaných vlastností, co se týče procentuální změny. Z grafu je patrné, že již první stupeň tepelné úpravy (170 °C) má velký vliv na velikost kontaktního úhlu. S úpravou 190 °C se velikost kontaktního úhlu dále zvětšuje, ale ne tak razantně. Výjimkou je topol, jehož smáčivost s úpravou 190 °C nepatrně klesla. Za zmínku stojí dřevo vrby, které se kontaktní úhel zvýšil vůči referenčním vzorkům při úpravě 170 °C o téměř 60 % a při úpravě 190 °C o 76 %.

Hakkou a kol. (2003) při měření kontaktního úhlu na topolu, buku a smrku došel k závěru, že největší vliv na změnu smáčivosti má teplota 135°C. Po dosažení této teploty se z hydrofilního dřeva stává materiál hydrofobní. Při vyšších teplotách se velikost kontaktního nemění, Kocaefe a kol. (2008) naopak pozoroval snížení kontaktního úhlu u jasanu a javoru při teplotách nad 200°C. Navickas a kol. (2015) u tepelně upravené borovice a smrku při 190 °C pozorovali nárůst kontaktního úhlu vůči referenčním vzorkům až o 140 %, přičemž měřili úhel po 5 sekundách od nanesení. Kontaktní úhel u neupravených vzorků smrku a borovice byl v průměru 45° a kontaktní úhel tepelně upravených dřevin byl u smrku necelých 100° a u borovice 110°.

Základní statistické údaje námi zkoumaných dřevin jsou v Tabulce 7.



Graf 8 - Vliv tepelné úpravy na smáčivost

Tabulka 7 - Základní statistické údaje smáčivosti

Dřevina a stupeň úpravy		Průměr	MIN	MAX	Směrodatná odchylka	Variační koeficient [%]
Topol	REF	73,8	51,5	96,8	10,6	14,4
	170 °C	105,1	82,2	131,3	11,1	10,5
	190 °C	103,8	76,7	141,3	17,5	16,8
Olše	REF	83,5	49,5	141,3	17,9	21,5
	170 °C	103,2	89,7	119,2	7,1	6,9
	190 °C	109,1	90,3	127,5	7,4	6,8
Vrba	REF	62,8	34,9	141,3	23	36,5
	170 °C	99,7	82,6	126,9	11,2	11,2
	190 °C	110,8	85,8	141,3	9,6	8,7

## 6 Závěr

V této práci byly posuzovány fyzikální vlastnosti tepelně upravených dřevin topolu osiky, olše lepkavé, vrby jívy a jeřábu ptačího. Konkrétními fyzikálními vlastnostmi bylo bobtnání, smáčivost, hustota v absolutně suchém stavu, konvenční hustota a mez nasycení buněčných stěn. Tepelná úprava proběhla podle procesu ThermoWood, přičemž první stupeň úpravy byl 170 °C a druhý stupeň byl 190 °C. Výsledky byly statisticky zpracovány a prezentovány v grafické, tabelární a textové podobě. Hlavním statistickým nástrojem byla dvou-faktorová analýza rozptylu (ANOVA). Výsledky byly porovnány Duncanovým post-hoc testem, aby se zjistila jejich statistická významnost. Výsledky a trendy byly následně porovnány s odbornou tištěnou literaturou a s odbornými vědeckými články.

Statisticky významné změny vykazovaly hodnoty meze nasycení buněčných stěn, smáčení a bobtnání. Vliv úpravy na mez nasycení buněčných stěn byl statisticky významný u všech dřevin se každým stupněm tepelné úpravy snížila MNBS o přibližně 18 % vůči předchozímu stupni. Jedinou výjimkou byl jeřáb při prvním stupni úpravy, MNBS se snížila o statisticky nevýznamných 2,5 %. Smáčivost byla u referenčních vzorků výrazně vyšší (tj. kontaktní úhel byl menší), po prvním stupni tepelné úpravy se velikost kontaktního úhlu razantně zvětšila u všech dřevin, přičemž u druhého stupně tepelné úpravy takový rozdíl pozorován nebyl, kontaktní úhel se naopak u topolu nepatrně zmenšil. Hodnoty bobtnání se dle předpokladu s tepelnou úpravou také zmenší, všechny dřeviny tuto skutečnost potvrdily. U dřeva jeřábu a vrby nenastal tak statisticky významný rozdíl u prvního stupně tepelné úpravy, u druhého však hodnoty zmíněných dřevin významně klesly. Statisticky méně významné byly hodnoty hustot téměř všech dřevin, přičemž při prvním stupni tepelné úpravy statisticky významnou změnu vykazovala vrba, které se hustota překvapivě lehce zvýšila. Při druhém stupni klesly hustoty všech dřevin, na úrovni významnosti však jen vrbě a olši.

Výsledky nepřinesly žádné výrazné změny a trendy v porovnání s jiným zdroji, nicméně srovnané hodnoty z jiných zdrojů mohou být trochu jiné. Hlavními důvody jsou rozdílné postupy tepelných úprav, odlišné teploty, doby trvání a atmosférické prostředí, ve kterém jsou úpravy prováděny.

V závěru lze konstatovat, že tepelná úprava snižuje smáčivost a rozměrovou stabilitu zkoumaných dřevin, což je například klíčové pro některé dřevařsko – průmyslové odvětví. Tepelně upravené dřeviny, které mají menší smáčivost a bobtnání se mohou použít například na dřevěné podlahy v exteriéru, venkovní nábytek či na jiné dřevěné konstrukce a prvky vystavené vlhkosti exteriéru.



## 7 Použité zdroje

### Literatura:

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

BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠÍŠKOVÁ. Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav. 5th ed. Praha: VŠCHT Praha, 2005. ISBN 80-7080-579-X

BORŮVKA, Vlastimil a Marian BABIAK. Vlastnosti dřeva v příkladech. 2. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2022. ISBN 978-80-213-3198-3.

FENGEL, Dietrich a Gerd WEGENER. *Wood—Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin: Walter de Gruyter, 1989.

HILL, Callum A. S. Wood modification: chemical, thermal and other processes. Chichester: John Wiley, 2006. ISBN 0-470-02172-1.

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

HEJNÝ, Slavomil a Bohumil SLAVÍK. *Květena České republiky*. 2. vydání. Praha: Academica, 1990.

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

HORÁČEK, Petr. Encyklopedie listnatých stromů a keřů. Brno: Computer Press, 2007, 747 s. ISBN 978-80-251-1708-8.

JURCZYKOVÁ, Tereza a František KAČÍK. Chemické zpracování dřeva. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2020. ISBN 978-80-213-3104-4.

POŽGAJ, Alexander, Dušan CHOVANEC, Stanislav KURJATKO a Marián BABIAK, 1993. Štruktúra a vlastnosti dreva. Druhé vydání. Bratislava: Príroda. ISBN 80-07-00960-4.

REINPRECHT, Ladislav a Zuzana VIDHOLDOVÁ. 2008. Termodrevo. Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, 89 s. ISBN: 978-80-228-1920-6.

SARVAŠOVÁ KVIETKOVÁ, Monika. Dřevařské komodity I. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2019. ISBN 978-80-213-2951-5.

ZEIDLER, Aleš a Vlastimil 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: WSL Startseite - WSL [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://www.wsl.ch/land/products/dendro/species.php?code=ALGL>

AYTIN, Ayhan a Süleyman KORKUT. Effect of thermal treatment on the swelling and surface roughness of common alder and wych elm wood [online]. 2016, 225-229 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: DOI:10.1007/s11676-015-0136-7

BOONSTRA, Michiel J a Bôke TJEERDSMA. Chemical analysis of heat treated softwoods. European Journal of Wood and Wood Products [online]. 2006 [cit. 2024-04-02].  
Dostupné z: DOI:10.1007/s00107-005-0078-4

DÜZKALE SÖZBİR, Gonca a Ibrahim BEKTAŞ. The Effect of Heat Modification and Densification on Physical Properties of Poplar Wood [online]. 2017, 315-321 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: DOI:10.5552/drind.2017.1719

ESTEVEES, Bruno M. a Helena M. PEREIRA. 2009. Wood modification by heat treatment: A Review. Bioresource 4 (1). 370-404. Dostupné z: DOI: 0.15376/biores.4.1.370-404

HAKKOU, Mohammed, Mathieu PÉTRISSANS, Idriss EL BAKALI, Philippe GÉRARDIN1 a André ZOULALIAN. Evolution of Wood Hydrophobic Properties During Heat Treatment [online]. 2003, 59-64 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Dennis-Jones-5/publication/292702217\\_Interlace\\_treatment-wood\\_modification\\_with\\_N-methylol\\_compounds/links/649d802dc41fb852dd3e5ca0/Interlace-treatment-wood-modification-with-N-methylol-compounds.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Dennis-Jones-5/publication/292702217_Interlace_treatment-wood_modification_with_N-methylol_compounds/links/649d802dc41fb852dd3e5ca0/Interlace-treatment-wood-modification-with-N-methylol-compounds.pdf)

HILL, Callum, Michael ALTGEN a Lauri RAUTKARI. Thermal modification of wood—a review: chemical changes and hygroscopicity. J Mater Sci [online]. 2021, 6581-6614 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: DOI: 10.1007/s10853-020-05722-z

HOLUB, Jiří. Smáčivost povrchu vůči kapalinám a druhá viskozita kapalin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010 [cit. 2024-04-02]. Bakalářská práce 38 s.

HRČKA, Richard, Viera KUČEROVÁ, Tatiana HÝROŠOVÁ a Vladimír HÖNIG. Cell Wall Saturation Limit and Selected Properties of Thermally Modified Oak Wood and Cellulose. *Forests* [online]. 2020 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: DOI: 10.3390/f11060640

International Thermowood association. *Thermowood Handbook*. Helsinki: Finnish Thermowood Association 2010 [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://www.thermowood.fi/esitteet-ja-kirjat>

Jeřáb ptačí. In: Lesnická a dřevařská fakulta – Lesnická a dřevařská fakulta [online]. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: [https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba\\_dreva/lexikon/makro/index.html?drevina=jr](https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/makro/index.html?drevina=jr)

KOCAEFE, Duygu, Sandor PONCSAK a Ramdane YOUNSI. Effect of heat treatment on the wettability of white ash and soft maple by water [online]. 2008, 355-361 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: DOI: 10.1007/s00107-008-0233-9

KVIETKOVÁ, Monika, Miroslav GAŠPARÍK a Milan GAFF. Effect of Thermal treatment on Surface Quality of Beech Wood after Plane Milling. *BioRes* [online]. 2015, 4226-4238 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: DOI: 10.15376/biores.10.3.4226-4238

NAVICKAS, Povilas, Sandra KARPAVIČIŪTĖ a Darius ALBREKTAS. *Effect of Heat Treatment on Wettability and Modulus of Elasticity of Pine and Spruce Wood* [online]. Kaunas University of Technology, Lithuania, 2015, 400-404 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: DOI: 10.5755/j01.ms.21.3.7304

Olše lepkavá. In: Lesnická a dřevařská fakulta – Lesnická a dřevařská fakulta [online]. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: [https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba\\_dreva/lexikon/makro/index.html?drevina=ol](https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/makro/index.html?drevina=ol)

PAPP, Eva Annamaria, Csilla CSIHA, Adam Nandor MAKK, Tamas HOFMANN a Levente CSOKA. Wettability of Wood Surface Layer Examined From Chemical Change Perspective [online]. 2020 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: DOI: 10.3390/coatings10030257

RAPP, Andreas Otto. REVIEW ON HEAT TREATMENTS OF WOOD [online]. Brussels: The European Commission Research Directorate, 2001 [cit. 2024-04-02]. ISBN 3-92630-02-3. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=7508b2311668f0332c9d7b6967b56ff70b8dc0>

*Populus tremula* L. In: WSL Startseite - WSL [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://www.wsl.ch/land/products/dendro/species.php?code=PPTR>

ROWELL, Roger M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites [online]. 2. vydání. 2012, 703 s. [cit. 2024-04-02]. ISBN 9780429109096. Dostupné z: doi:10.1201/b12487

Salix caprea L. In: WSL Startseite - WSL [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://www.wsl.ch/land/products/dendro/species.php?code=SACA>

Sorbus aucuparia L. In: WSL Startseite - WSL [online]. [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: <https://www.wsl.ch/land/products/dendro/species.php?code=SOAU>

TASDEMIR, Cagatay a Salim HIZIROGLU. Measurement of various properties of Southern pine and aspen as function of heat treatment [online]. 2014, 91-98 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: DOI: 10.1016/j.measurement.2013.11.058

Topol osika. In: Lesnická a dřevařská fakulta – Lesnická a dřevařská fakulta [online]. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: [https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba\\_dreva/lexikon/makro/index.html?drevina=os](https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/makro/index.html?drevina=os)

VINEETH, P., Alina PEETHAN a Sajan D. GEORGE. Special wettability for sensing: Drawing inspiration from nature. Chemical Engineering Journal [online]. 2023 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: DOI: 10.1016/j.cej.2023.141615

Vrba bílá. In: Lesnická a dřevařská fakulta – Lesnická a dřevařská fakulta [online]. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: [https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba\\_dreva/lexikon/makro/index.html?drevina=vr](https://fraxinus.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/makro/index.html?drevina=vr)

WEILAND, John J. a René GUYONNET. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. Holz als Roh- und Werkstoff [online]. 2003, 216-220 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: DOI: 10.1007/s00107-003-0364-y

YILDIZ, Sibel. Physical, mechanical, technological and chemical properties of beech and spruce wood treated by heating. 2002. Disertační práce. Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey.

### **Normy:**

ČSN 49 0108 Drevo. Zisťovanie hustoty. 1993

ČSN 49 0126 Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zisťovania napúčavosti. 1989

## 8 Seznam grafů, obrázků a tabulek

Graf 1 – chemické složení buněčné stěny dřeva .....	19
Graf 2 – diagram určující rovnovážnou vlhkost dřeva .....	23
Graf 3- Průběh tepelné úpravy Thermo Woodu .....	29
Graf 4 – Vliv tepelné úpravy na hustotu v absolutně suchém stavu .....	37
Graf 5 – Vliv tepelné úpravy na mez nasycení buněčných stěn .....	39
Graf 6 – Vliv tepelné úpravy na celkové objemové bobtnání .....	40
Graf 7 - Závislost celkového objemového bobtnání topolu na jeho hustotu v absolutně suchém stavu .....	42
Graf 8 - Vliv tepelné úpravy na smáčivost .....	44
Obrázek 1 – Makroskopická stavba topolu osiky: vlevo příčný řez, vpravo podélný řez...	11
Obrázek 2 – Makroskopická stavba olše lepkavé: vlevo příčný řez, vpravo podélný řez ..	12
Obrázek 3 – Makroskopická stavba vrby jívy: vlevo příčný řez, vpravo podélný řez.....	12
Obrázek 4 – Makroskopická stavba jeřábu ptačího: vlevo příčný řez, vpravo podélný řez	13
Obrázek 5 – Buněčné elementy dřeva .....	14
Obrázek 6 – Mikroskopická stavba topolu: A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez .....	15
Obrázek 7 – Mikroskopická stavba olše: A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez .....	15
Obrázek 8 – Mikroskopická stavba vrby: A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez .....	16
Obrázek 9 Mikroskopická stavba jeřábu: A – příčný řez, B – radiální řez, C – tangenciální řez .....	16
Obrázek 10 – Stavba buněčné stěny dřeva .....	17
Obrázek 11 – Kapka kapaliny na povrchu pevné látky .....	25
Obrázek 12 – Aparatura k měření kontaktního úhlu pomocí přisedlé kapky .....	26
Obrázek 13 – Komora typu KHT od firmy KATRES.....	31
Obrázek 14 – Měření smáčivosti.....	32
Obrázek 15 – Laboratorní váha KERN KB3600 – 2N a digitální posuvné měřítko KINEX ABSOLUTE ZERO.....	34

Tabulka 1 – Přehled procentuálních změn zkoumaných vlastností vztažených k referenčním vzorkům.....	36
Tabulka 2 – Základní statistické údaje hustoty v absolutně suchém stavu .....	38
Tabulka 3 – Základních statistické údaje meze nasycení buněčných stěn .....	39
Tabulka 4 - Základní statistické údaje celkového objemového bobtnání.....	41
Tabulka 5 - Základní statistické údaje radiálního bobtnání.....	42
Tabulka 6 - Základní statistické údaje tangenciálního bobtnání.....	43
Tabulka 7 - Základní statistické údaje smáčivosti .....	44

## 9 Samostatné přílohy

	REF Topol	REF Olše	REF Jeřáb	REF Vrba	170°C Topol	170°C Olše	170°C Jeřáb	170°C Vrba	190°C Topol	190°C Olše	190°C Jeřáb	190° Vrba
REF Topol												
REF Olše	0,000005											
REF Jeřáb	0,000001	0,000004										
REF Vrba	0,000004	0,000034	0,020584									
170°C Topol	0,731006	0,000007	0,000001	0,000004								
170°C Olše	0,000269	0,188442	0,000004	0,000003	0,000759							
170°C Jeřáb	0,000001	0,000004	0,856579	0,014673	0,000001	0,000005						
170°C Vrba	0,000001	0,000003	0,724952	0,041418	0,000005	0,000004	0,619606					
190°C Topol	0,438077	0,000004	0,000001	0,000005	0,294411	0,000015	0,000002	0,000001				
190°C Olše	0,016272	0,011725	0,000005	0,000004	0,030227	0,192513	0,000001	0,000004	0,001872			
190°C Jeřáb	0,000005	0,000012	0,089035	0,485227	0,000004	0,000004	0,070097	0,148077	0,000001	0,000004		
190°C Vrba	0,000073	0,302554	0,000004	0,000011	0,000245	0,712823	0,000004	0,000004	0,000006	0,114721	0,000003	

Příloha 1 - Duncanův test – hustota v absolutně suchém stavu

	REF Topol	REF Olše	REF Jeřáb	REF Vrba	170°C Topol	170°C Olše	170°C Jeřáb	170°C Vrba	190°C Topol	190°C Olše	190°C Jeřáb	190° Vrba
REF Topol												
REF Olše	0,007744											
REF Jeřáb	0,002868	0,697528										
REF Vrba	0,372454	0,060179	0,030648									
170°C Topol	0,000006	0,039809	0,081149	0,000098								
170°C Olše	0,000005	0,000365	0,001341	0,000004	0,133087							
170°C Jeřáb	0,000337	0,333667	0,519371	0,006310	0,230661	0,009051						
170°C Vrba	0,000004	0,011464	0,027970	0,000013	0,593566	0,289284	0,101736					
190°C Topol	0,000001	0,000005	0,000004	0,000001	0,000005	0,000636	0,000004	0,000011				
190°C Olše	0,000002	0,000001	0,000001	0,000001	0,000004	0,000005	0,000005	0,000004	0,140682			
190°C Jeřáb	0,000001	0,000001	0,000005	0,000001	0,000004	0,000052	0,000004	0,000005	0,491431	0,381316		
190°C Vrba	0,000001	0,000004	0,000004	0,000005	0,000004	0,000621	0,000004	0,000021	0,925000	0,132140	0,465208	

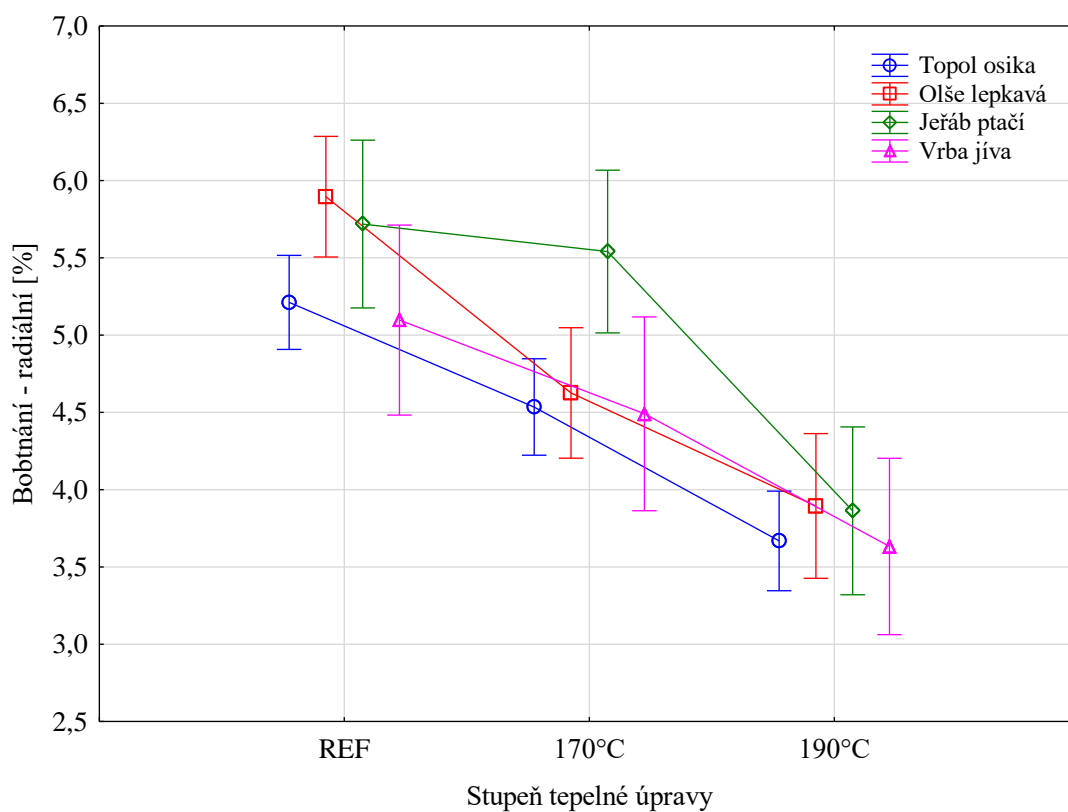
Příloha 2 - Duncanův test – mez nasycení buněčných stěn

	REF Topol	REF Olše	REF Vrba	170°C Topol	170°C Olše	170°C Vrba	190°C Topol	190°C Olše	190° Vrba
REF Topol									
REF Olše	0,000009								
REF Vrba	0,000009	0,000011							
170°C Topol	0,000004	0,000004	0,000004						
170°C Olše	0,000003	0,000011	0,000004	0,330549					
170°C Vrba	0,000011	0,000009	0,000003	0,006286	0,060921				
190°C Topol	0,000004	0,000003	0,000004	0,473836	0,746453	0,036465			
190°C Olše	0,000004	0,000004	0,000005	0,027804	0,002196	0,000005	0,004970		
190°C Vrba	0,000005	0,000004	0,000001	0,002499	0,000077	0,000004	0,000238	0,352795	

Příloha 3 - Duncanův test – smáčivost

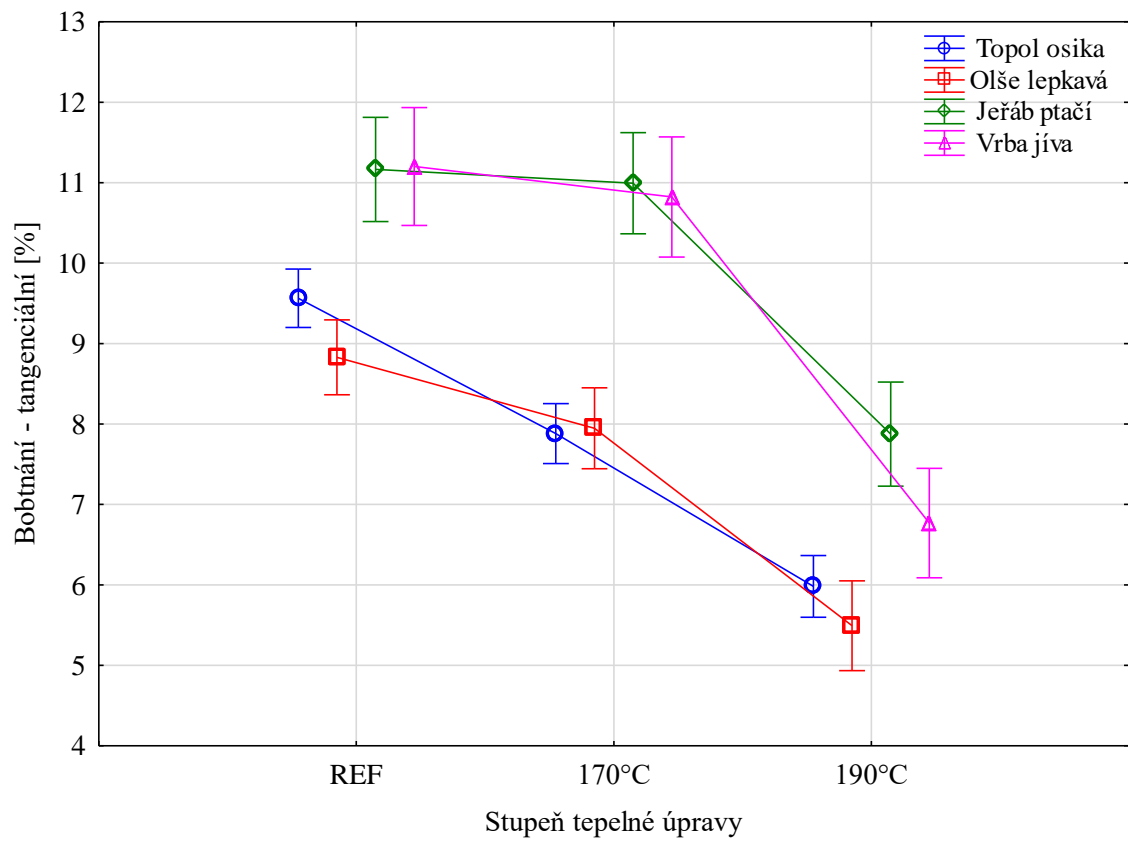
	REF Topol	REF Olše	REF Jeřáb	REF Vrba	170°C Topol	170°C Olše	170°C Jeřáb	170°C Vrba	190°C Topol	190°C Olše	190°C Jeřáb	190°C Vrba
REF Topol												
REF Olše	0,753565											
REF Jeřáb	0,000208	0,000609										
REF Vrba	0,003106	0,006646	0,437873									
170°C Topol	0,000011	0,000003	0,000005	0,000004								
170°C Olše	0,000009	0,000011	0,000004	0,000004	0,893487							
170°C Jeřáb	0,003646	0,008142	0,409641	0,995191	0,000004	0,000004						
170°C Vrba	0,646151	0,858146	0,000966	0,008226	0,000004	0,000003	0,011061					
190°C Topol	0,000004	0,000004	0,000001	0,000001	0,000003	0,000004	0,000001	0,000005				
190°C Olše	0,000004	0,000005	0,000002	0,000001	0,000004	0,000004	0,000001	0,000001	0,780670			
190°C Jeřáb	0,000003	0,000004	0,000001	0,000004	0,027518	0,025690	0,000005	0,000004	0,000129	0,000050		
190°C Vrba	0,000004	0,000004	0,000001	0,000005	0,000106	0,000074	0,000001	0,000004	0,031382	0,020187	0,074182	

Příloha 4 - Duncanův test – celkové objemové bobtnání



Příloha 5 - Vliv tepelné úpravy na radiální bobtnání





Příloha 6 - Vliv tepelné úpravy na tangenciální bobtnání