

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Fakulta lesnická  
a dřevařská**

**Vliv kombinace chemické a termické  
modifikace na vlastnosti modifikovaného  
dřeva**

Bakalářská práce

Autor: Tomáš Drs

Vedoucí práce: Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, Ph.D.

2023

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tomáš Drs

Dřevařství

Podnikání ve dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu

Název práce

**Vliv kombinace chemické a termické modifikace na vlastnosti modifikovaného dřeva**

Název anglicky

**Influence of a combination of chemical and thermal modification on the properties of modified wood**

---

### Cíle práce

Cílem práce je určení vlivu kombinace chemické a termické modifikace na vybrané fyzikální a mechanické charakteristiky dřeva buku. Sledovaným faktorem bude teplota termické úpravy, zatímco chemická modifikace bude zafixována.

### Metodika

Harmonogram práce:

květen – srpen 2021: literární rešerše

srpen – prosinec 2021: experimentální část

prosinec 2021 – březen 2022: vyhodnocení výsledků a sepsání práce

duben 2022: odevzdání závěrečné práce

Student provede analýzu, syntézu, komparaci a deskripční názorů autorů zabývajících se termickou modifikací dřeva. V praktické části práce se student zaměří na určení vlivu teploty termické úpravy na fyzikální a mechanické charakteristiky termicky upraveného dřeva impregnovaného pryskyřicí. Diskuse obsahuje SWOT analýzu vyvinutého materiálu.

**Doporučený rozsah práce**

60 stran

**Klíčová slova**

termická úprava, barva dřeva, pevnost v tlaku, impregnace

---

**Doporučené zdroje informací**

- H. Millitz, Heat treatment technologies in Europe: scientific background and technological state-of-art, in: Proceedings of Conference on Enhancing the Durability of Lumber and Engineered Wood Products, Kissimmee, Orlando, 2002.
- Kacikova, D., Kacik, F., Cabalova, I., and Durkovic, J. (2013). "Effects of thermal treatment on chemical, mechanical, and colour traits in Norway spruce wood," *Bioresource Technology* 144, 669. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.110
- Martinka, J., Chřebět, T., Král, J., and Balog, K. (2013a). "An examination of the behaviour of thermally treated spruce wood under fire conditions," *Wood Research* 58(4), 599-606.
- Stark, N. (1997). Effect of species and particle size on properties of wood-flour-filled polypropylene composites, *Functional Fillers for Thermoplastics and Thermosets*, Le Meridien at Coronado, San Diego, CA, pp. 2-22.
- S. Yildiz, E.D. Gezer, U.C. Yildiz, Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat, *Build. Environ.* 41 (12) (2006) 1762–1766, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.017>.
- Walker, J. C. F., Butierfield, B. G., Langrish, T. A. G., Harris, J. M., and Uprichard, J. M. (1993). *Primary Wood Processing*. Chapman and Hall, London. 595p

---

**Předběžný termín obhajoby**

2021/22 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

---

Elektronicky schváleno dne 16. 12. 2021

**doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.**

Vedoucí ústavu

---

Elektronicky schváleno dne 4. 2. 2022

**prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2023

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci „Vliv kombinace chemické a termické modifikace na vlastnosti modifikovaného dřeva“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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 Táboře dne 4.4.2023

---



## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. et Ing. Štěpánu Hýskovi, Ph.D. za jeho trpělivost, ochotu a čas. Dále bych také rád poděkoval Ing. Tomáši Holečkovi za pomoc a ochotu během výzkumné části této práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a trpělivost.

## Abstrakt

Hlavním cílem této práce je posouzení vlivu termické modifikace dřeva a impregnace na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva buku. Předpokladem je, že se fyzikální vlastnosti vlivem termické úpravy a impregnacelepší. Teoretická část je zaměřena na komparaci, analýzu a syntézu dané problematiky v literatuře a dalších dostupných zdrojích, praktická část pak slouží ke komparaci s informacemi uvedeným v teoretické části. Na 180 vzorcích rozdělených do šesti sérií bude ověřeno, jaký vliv mají termická úprava a impregnace na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva buku. Tato práce se snaží o celkové zmapování problematiky v teoretické části a následné ověření v části praktické. Z velké části byly potvrzeny předpoklady, které vyplývaly z teoretické části. Předpokladem bylo, že se fyzikální vlastnosti vlivem termické úpravy a impregnacelepší. Výsledné hodnoty říkají, že průměrná hustota pouze impregnovaných vzorků je vyšší než průměrná hustota referenčních vzorků. Pokud se na vzorky po impregnaci aplikuje termická modifikace, průměrné hodnoty hustot klesnou pod průměrnou hodnotu hustoty referenčních vzorků. Ve výsledcích a diskusi proběhla SWOT analýza vyvinutého materiálu.

## Klíčová slova

termická úprava dřeva, impregnace, pevnost v tlaku, bobtnání

## Abstract

The main goal of this work is to assess the influence of thermal wood modification and impregnation on selected physical and mechanical properties of beech wood. It is assumed that the physical properties will improve due to thermal treatment and impregnation. The theoretical part is focused on comparison, analysis and synthesis of the issue in the literature and other available sources, the practical part is used for comparison with the information presented in the theoretical part. The effect of heat treatment and impregnation on the physical and mechanical properties of beech wood will be verified on 180 samples divided into six series. This thesis attempts to map the issue in the theoretical part and then verify it in the practical part. For the most part, the assumptions that resulted from the theoretical

part were confirmed. It was assumed that the physical properties would improve due to thermal treatment and impregnation. The results say that the average density of only the impregnated samples is higher than the average density of the reference samples. If thermal modification is applied to the samples after impregnation, the average density values will drop below the average density value of the reference samples. A SWOT analysis of the developed material took place in the results and discussion.

## **Keywords**

thermal treatment of wood, impregnation, compressive strength, swelling

## Obsah

1 Úvod .....	12
2 Cíle .....	13
3 Teoretická část.....	14
3.1 Buk lesní.....	14
3.1.1 Makroskopický popis .....	14
3.1.2 Mikroskopický popis .....	15
3.1.3 Fyzikální a mechanické vlastnosti.....	15
3.2 Modifikace dřeva .....	16
3.3 Termická modifikace dřeva .....	16
3.4 Vliv termických úprav na vlastnosti dřeva .....	17
3.4.1 Hygroskopicita.....	18
3.4.2 Rozměrová stabilita .....	18
3.5 Typy termodřeva.....	19
3.6 Technologie termické modifikace dřeva .....	19
3.6.1 Termická modifikace dřeva ve vzduchu – ThermoWood.....	20
3.6.2 Termická modifikace dřeva v prostředí vodní páry – PlatoWood... 21	
3.6.3 Úprava dřeva technologií Plato Wood.....	21
3.6.4 Termická modifikace dřeva připravovaného v prostředí inertních plynů-RetificatedWood.....	22
3.6.5 Termická úprava dřeva připravovaného v olejích-OHT-Wood.....	22
3.7 Využití termicky upraveného dřeva .....	23
3.8 Impregnování dřeva.....	23
3.8.1 Typy impregnačních prostředků.....	23
3.8.2 Způsoby ošetření dřeva impregnací.....	24
4 Praktická část.....	26
4.1 Metodika práce .....	26

4.1.1	Označení vzorků a prvotní měření .....	26
4.1.2	Impregnace vzorků .....	27
4.1.3	Termická úprava vzorků .....	29
4.1.4	Měření vzorků po klimatizování .....	31
4.1.5	Měření bobtnání a nasákavosti .....	33
4.1.6	Měření pevnosti v tlaku .....	35
4.2	Výsledky a diskuze .....	37
4.2.1	Hustota .....	38
4.2.2	Bobtnání .....	40
4.2.3	Pevnost v tlaku .....	42
4.2.4	SWOT analýza .....	43
5	Závěr .....	45
6	Použité zdroje .....	47
6.1	Literární zdroje .....	47
6.2	Internetové zdroje .....	49

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Dřevo buku (autor) .....	14
Obrázek 2 - Mikroskopická stavba buku (NIS, 2013) .....	15
Obrázek 3 - Barevná změna vzorků vlivem modifikací (autor) .....	17
Obrázek 4 – ThermoWood (ISPAS) .....	20
Obrázek 5 - Vzorky před označením (autor) .....	26
Obrázek 6 – Autokláv (autor) .....	28
Obrázek 7 - Vzorky po vyjmutí z autoklávu (autor).....	28
Obrázek 8 - Vzorky série 3 a 5 před termickou úpravou (autor) .....	30
Obrázek 9 - Vzorky série 4 a 6 před termickou úpravou (autor) .....	30
Obrázek 10 - Klimatizační komora (autor).....	32
Obrázek 11 - Vzorky po vyjmutí z nádoby s destilovanou vodou (autor) .....	34
Obrázek 12 - Přístroj TIRAtest 2850 (autor).....	35
Obrázek 13 - Detail vzorku v přístroji TIRAtest 2850 (autor) .....	36

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Hodnoty sesychání dřeva buku (Zeidler, Borůvka, 2016) .....	15
Tabulka 2 - Rozměry a hmotnost vzorků série 6 při vlhkosti W0% (autor) .....	27
Tabulka 3 - Hmotnosti vzorků série 6 před impregnací a po impregnaci (autor) .	29
Tabulka 4 - Rozměry a hmotnost vzorků série 6 po termické modifikaci (autor) .	31
Tabulka 5 - Rozměry a hmotnost vzorků série 6 po klimatizování (autor) .....	33
Tabulka 6 - Rozměry a hmotnost vzorků série 6 o vlhkosti W30% (autor) .....	35
Tabulka 7 - Hodnoty FH[N] pro vzorky série 6 (autor) .....	37
Tabulka 8 - Druhy modifikace (autor) .....	37
Tabulka 9 - Hodnoty hustot modifikovaných vzorků po klimatizování [kg/m <sup>3</sup> ] (autor) .....	38
Tabulka 10 - Procentuální změny hustoty (autor) .....	39
Tabulka 11 - Průměrné výsledky bobtnání (autor) .....	40
Tabulka 12 - Průměrné výsledky bobtnání v porovnání se sérií 1 (autor) .....	41
Tabulka 13 - Hodnoty meze pevnosti (autor) .....	42
Tabulka 14 - SWOT analýza (autor) .....	44

## Seznam grafů

Graf 1 - Hodnoty hustot modifikovaných vzorků po klimatizování (autor) .....	39
Graf 2 – Bobtnání (autor) .....	41
Graf 3 - Hodnoty meze pevnosti (autor) .....	43



## 1 Úvod

Hlavním cílem této práce je posouzení vlivu termické modifikace dřeva a impregnace na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva buku.

Teoretická část práce je zaměřena na popis dřeva buku lesního, jeho makroskopickou i mikroskopickou stavbu a také na jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Dále pak je zaměřena na modifikace dřeva. Modifikací dřeva můžeme dosáhnout změny vlastností, jako jsou pevnost a pružnost, či rozměrová nestabilita a odolnost vůči škůdcům a prostředí. Část teoretické práce je věnována vlivu termických úprav na vlastnosti dřeva. Zaměřena je na termické úpravy často používané i na ty méně časté. Dále se věnuje popisu modifikace dřeva, konkrétně termické modifikaci a impregnaci. Na tuto teoretickou část navazuje praktická aplikace poznatků.

Praktická část se zabývá měřením vlivu termické modifikace a impregnace dřeva buku na několika vzorcích. Vzorky dřeva buku budou rozděleny do šesti sérií po 30 vzorcích, celkem tedy 180 vzorků. První série obsahuje referenční vzorky bez modifikací, druhá série pak vzorky, které projdou pouze impregnací. Třetí a čtvrtá série budou tvořit vzorky termicky upravené teplotou 190 °C a 200 °C. Pátá a šestá série obsahuje vzorky upravené termicky i impregnací, a to na teploty 190 °C u páté a 200 °C u šesté série.

Jednotlivé vzorky budou změřeny a zváženy. Následně proběhne impregnace zvolených sérií a termická úprava vybraných sérií. Sedmidenní klimatizace patří k dalšímu postupu práce. Vzorky budou tímto připraveny ke zkouškám fyzikálních a mechanických vlastností. Hlavním krokem je měření a porovnávání jednotlivých vzorků daných sérií. Všechna měřená data se zapíše do tabulek a výsledky budou popsány.

Předpokladem je, že se fyzikální vlastnosti vlivem termické úpravy a impregnace zlepší.

Tato práce se snaží o celkové zmapování problematiky v teoretické části a následné ověření v části praktické. V diskusi proběhne SWOT analýza vyvinutého materiálu.

## 2 Cíle

Cílem práce je určení vlivu kombinace chemické a termické modifikace na vybrané fyzikální a mechanické charakteristiky dřeva buku. Sledovaným faktorem bude teplota termické úpravy, zatímco chemická modifikace bude zafixována.

### 3 Teoretická část

#### 3.1 Buk lesní

Buk lesní (*Fagus sylvatica* L.) viz. obrázek č. 1 nachází své využití ve výrobě nábytku, kde má své jedinečné místo díky vlastnostem, které se uplatní při výrobě ohýbaného nábytku, ale také se využívá na překližky a dýhy či schody a parkety. Buk má široké uplatnění a řadí se mezi nejvíce hospodářsky využívané listnaté dřevo u nás. Bohužel přirozená trvanlivost dřeva buku lesního při napadení houbami není vysoká, a tak se řadí do skupiny 5 - netrvanlivé. (Balabán, 1955)



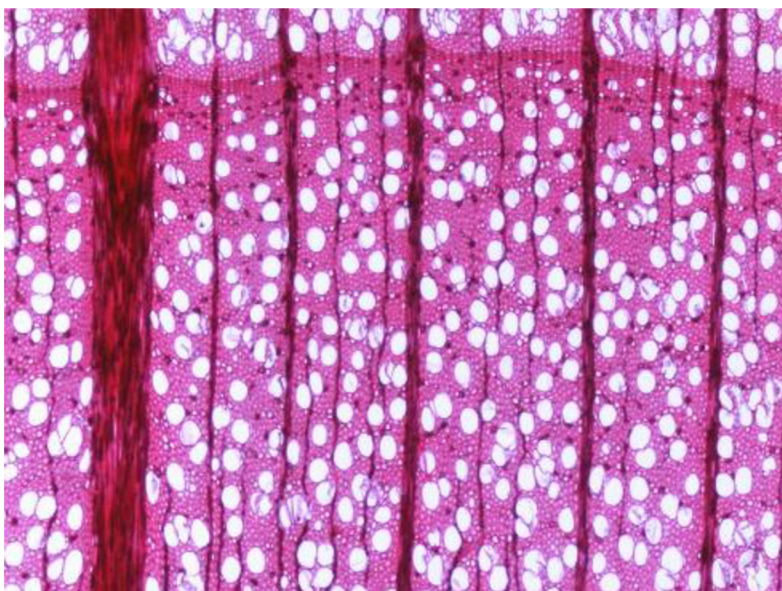
Obrázek 1 - Dřevo buku (autor)

##### 3.1.1 Makroskopický popis

Jedná se o listnatou dřevinu s roztroušeně pórovitou stavbou. Cévy buku lesního nejsou pouhým okem zřejmé. Dřevo má narůžovělou barvu, avšak jádro a běl nejsou barevně odlišeny. Dřeňové paprsky vřetenovitého tvaru jsou zřetelné na všech řezech, jelikož jsou dobře viditelné. Dřevo buku je středně tvrdé a těžké. (Zeidler, Borůvka, 2016)

### 3.1.2 Mikroskopický popis

Jedná se o listnatou dřevinu, roztroušeně, případně polokruhovitě pórovitou. Jednotlivě uspořádané cévy mají perforace jednoduché a žebříčkovité. Dřeňové paprsky jsou jedno až mnohvrstevné a rozšiřují se na hranici letokruhu viz. obrázek 2. (Zeidler, Borůvka, 2016)



Obrázek 2 - Mikroskopická stavba buku (NIS, 2013)

### 3.1.3 Fyzikální a mechanické vlastnosti

Jako charakteristické vlastnosti buku lesního považujeme tvrdost a vysokou hustotou, konkrétně  $\rho$  dosahuje hodnoty 0,712 g/cm<sup>3</sup>.

Hodnoty sesychání v jednotlivých směrech a celkové sesychání dosahují následujících hodnot viz. tabulka č. 1.

Objemové sesychání [%]	17,5
Tangenciální sesychání [%]	11,8
Radiální sesychání [%]	5,8
Axiální sesychání [%]	0,3

Tabulka 1 - Hodnoty sesychání dřeva buku (Zeidler, Borůvka, 2016)

Pevnost v tlaku ve směru vláken se pohybuje kolem hodnoty 56,7 MPa. (Zeidler, Borůvka, 2016)

### 3.2 Modifikace dřeva

Přirozené vlastnosti dřeva jako materiálu mohou být dále upravovány. Z pohledu modifikace dřeva můžeme usilovat o zlepšení pozitivních vlastností dřeva nebo snížení vlastností dřeva, které považujeme za nepříznivé. Modifikací dřeva se můžeme zaměřit na vlastnosti, jako jsou pevnost a pružnost, či rozměrová nestabilita a odolnost vůči škůdcům a prostředí. Historie modifikování dřeva sahá až do pravěku, kdy nálezy potvrdily, že pravěcí lidé používaly principy tepelné úpravy na hroty oštěpů a šípů. Výhody modifikace dřeva taky nalézají upotřebení v designu výrobků ze dřeva, především z pohledu změny barvy či výroby ohybů a náročných tvarů. Z pohledu konstrukčních výhod můžeme zmínit vyšší pevnost a tvrdost. V neposlední řadě odolnost v interiéru i exteriéru, kterou ocení hlavně koncoví uživatelé výrobků. Samozřejmě modifikované dřevo má kvůli úpravám, kterými prošlo, vyšší cenu. Mezi základní způsoby modifikace dřeva řadíme úpravy pomocí teploty, impregnace, chemie, tlaku a mikrovlnného záření. (NIS, 2013)

### 3.3 Termická modifikace dřeva

První zmínky o termicky upraveném dřevě nacházíme ve Finsku a v Německu na konci 19. a počátku 20.století. (ITWA, 2017; Militz, 2002)

Termicky modifikované dřevo nazýváme ThermoWood či termodřevo. Vnitřní chemická struktura se přeměňuje vlivem zvýšené teploty, která se pohybuje mezi 160-240 °C. Vzhledem k této skutečnosti, má materiál větší odolnost a celkově zlepšené vlastnosti vůči biotickému a abiotickému působení. Pokud je dřevo termicky modifikované, pak se zvyšuje jeho odolnost a rozměrová stabilita. Pokud teplota stoupá, pak se termodřevo méně zahřívá vlivem jeho redukované tepelné vodivosti. (Kačíková, Kačík, 2011)

Hlavním cílem termických modifikací dřeva je tedy vytvořit takový materiál, který má lepší vlastnosti než materiál bez termické úpravy. Vlastnosti termicky upraveného dřeva ovlivňují tyto kritéria:

- čas ošetření
- teplota ošetření
- uzavřené či otevřené systémy
- typ dřeviny
- mokré či suché systémy
- velikost a tloušťka vzorku

Termická úprava přináší tyto vlastnosti:

- vyšší rozměrovou stabilitu modifikovaného dřeva
- vyšší odolnost proti dřevokazným houbám a plísním
- nižší hygroskopicitu
- zachování mechanických vlastností, pevnost, tvrdost. (Hill a kol., 2005)

Dále se mění barva dřeva. Viz obrázek č. 3.



Obrázek 3 - Barevná změna vzorků vlivem modifikací (autor)

### 3.4 Vliv termických úprav na vlastnosti dřeva

Fyzikální vlastnosti ThermoWoodu – v průběhu termické modifikace dřeva se v materiálu mění tepelně izolační vlastnosti, akustické vlastnosti, hygroskopicitu, rozměrová stabilita a barva dřeva.

Dřevo je materiál s hygroskopickou vlastností. Je tedy schopné odevzdávat nebo přijímat vodu do okolí ve skupenství plynném i kapalném. Mění svoji vlhkost v závislosti na vlhkosti okolního prostředí. Míra vlhkosti ve dřevě přímo ovlivňuje jeho vlastnosti, které je nutno znát pro kvalitní technologické zpracování. Přestože dřevo může přijímat i jiné kapaliny a plyny, ale z praktického pohledu je voda nejdůležitější kapalina, proto se fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva převážně

vztahují k vodě. Blíže se vzhledem k zaměření praktické části věnujeme v následující kapitole hygroskopicitě a rozměrové stabilitě. (Kabir Kazi, Feroz & Cooper, 2002; Awouemi, 2006)

### 3.4.1 Hygroskopicitá

Dřevo je materiál s hygroskopickou vlastností. Je schopné odevzdávat nebo přijímat vodu do okolí, mění svoji vlhkost v závislosti na vlhkosti okolního prostředí. Míra vlhkosti ve dřevě přímo ovlivňuje jeho vlastnosti. Hygroskopicitá ovlivňuje vlastnosti dřeva, a to hlavně rozměrovou stabilitu a odolnost vůči škůdcům. Dřevo, které je upraveno termicky, má ve srovnání s klasicky rostlým dřevem menší hygroskopicitu. (Kabir Kazi, Feroz & Cooper, 2002; Awouemi, 2006)

Důležitý faktor v procesu termické modifikace je voda obsažená ve dřevě. Dělíme ji na vodu volnou a vodu vázanou. Míra hygroskopicity závisí na druhu dřeva a množství pryskyřice, které konkrétní dřevo obsahuje. U listnatých dřevin je důležité, zda se jedná o dřevinu roztroušeně nebo kruhovitě pórovitou. (Horáček, 1998)

Snížení hygroskopicity zaznamenáváme při použití vyšších teplot během úpravy dřeva. Toto snížení vniká na základě:

- odbourání určitého podílu hemicelulóz,
- odbourání nebo prostorové blokáce hydrofilních-OH funkčních skupin,
- migrace a redistribuce lipoidních a jiných hydrofobních látek. (Hill a kol., 2005)

### 3.4.2 Rozměrová stabilita

Tepelně upravené dřevo, má lepší rozměrovou stálost, tzn., že při změně relativní vlhkosti okolního vzduchu se mění jeho rozměry podstatně méně než u rostlého dřeva. Sušením teplotou 110 °C a dlouhodobým zkoušením se zjistilo, že nejlepších výsledků pro zachování rozměrové stálosti se dosáhne při teplotě 150-300°C. Dřevo při těchto teplotách dosáhne maximální hodnoty rozměrové stálosti při úbytku 15-20 % jeho hmotnosti. U termicky upraveného dřeva dochází ke zlepšení rozměrové stability mírným odbouráváním hemicelulóz. Probíhají zde i jiné procesy, jako je tvorba esterových a éterových vazeb v ligninu. Vzhledem k tomu je struktura silných buněčných stěn u dřeva, které je termicky modifikované, odolnější vůči vniknutí molekul vody. (Hill a kol., 2005)



Pokud bychom porovnali neošetřené dřevo s termicky modifikovaným, tak se rozměrové změny snižují o 80-90 %. Snížení však vychází ze stupně tepelného zpracování. Proto také tepelná modifikace dřeva redukuje tangenciální a radiální bobtnání. Standartně sušené dřevo má prohnutí, kroucení a další deformace dřeva vyšší než dřevo ošetřené tepelnou modifikací. (Prokom, 2020)

### 3.5 Typy termodřeva

Termodřevo je aktuálně dostupné ve dvou variantách: pro použití v exteriéru (Thermo-D) či v interiéru (Thermo-S). U metody Thermo-D je vyžadována vyšší odolnost a stabilita z důvodů podmínek působících na dřevo v exteriéru. U metody Thermo-S má přednost vzhled a stabilita materiálu. Vzhledem k tomu, že se používá ve vnitřních prostorech, je důležitý vzhled, ale dřevo nemění rozměry. (Kačíková, Kačík, 2011)

#### Thermo-S

Označení „S“ znamená „stabilitu“, která je hned za vzhledem stěžejní vlastností u koncového produktu při zpracování tímto způsobem. Thermo-S třída ThermoWood je podle EN 113 normy charakterizována jako relativně trvanlivá. Přirozená odolnost vůči rozkladu tohoto typu úpravy splňuje požadavky třídy 3. Průměrné tangenciální bobtnání a sesychání způsobené vlhkostí se udává 6-8 %. (ITWA, 2017)

#### Thermo-D

„D“ je symbolem biologické trvanlivosti. Ta je zásadní vlastností při finálním provedení produktů ve své kategorii. Průměrné tangenciální bobtnání a sesychání způsobené vlhkostí pro dřevo ošetřené třídou Thermo-D je stanoveno na 5-6 %. Thermo-D ThermoWood je klasifikováno dle normy EN 113 jako trvanlivé. Charakteristické je svojí odolností vůči rozkladu a splňuje třídu 2. (ITWA, 2017)

### 3.6 Technologie termické modifikace dřeva

- úprava v atmosféře vzduchu - ThermoWood
  - úprava v prostředí vodní páry - PlatoWood
  - úprava v prostředí inertních plynů - RetificatedWood
  - úprava v prostředí olejů - OHT-Wood, RoyalWood, Menz Holz
- Veškeré procesy tepelné modifikace dřeva jsou chráněny patentem



### 3.6.1 Termická modifikace dřeva ve vzduchu – ThermoWood

ThermoWood který zobrazuje obrázek č. 4. je vyráběn tepelným zpracováním dřevin jak jehličnatých, tak listnatých. Zpracování je prováděno licenčním ThermoWood procesem - Stora, Finnforest, VTT. Celý proces trvá přibližně 36 hodin. Výrobní proces se skládá z následujících etap. První fází je ohřev a sušení. Teplota se v sušárně rychle zvyšuje na cca 100 °C, za podpory působení vodní páry. Teplota v komoře je dále zvyšována pozvolna na hodnotu 130 °C horkým vzduchem. (Militz, 2002)

Druhá fáze procesu spočívá především v tepelné úpravě. Je rozdíl mezi teplotou pro jehličnaté a pro listnaté dřeviny. V klasifikační třídě Thermo-D u jehličnatého dřeva musí teplota dosahovat 212 °C, u listnatého 200 °C. Ve třídě Thermo-S u jehličnatého dřeva musí teplota dosahovat 190 °C, u listnatého 185 °C. Doba působení teploty na materiál je 2-3 hodiny. (Militz, 2002)

Poslední fáze je chlazení a snižování vlhkosti dřeva. Teplota v komoře klesá a závěrečná vlhkost je 4-7 %. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)



Obrázek 4 – ThermoWood (ISPAS)

### 3.6.2 Termická modifikace dřeva v prostředí vodní páry – PlatoWood

Úprava dřeva v prostředí vodní páry probíhá tak, že se sníží teplota a zvýší tlak. Zkratka PLATO znamená Providing Lasting Advanced Timber Option. Vznikl v Holandsku a má čtyři části:

- Hydrotermolýza trvá 4-5 hodin, nutná je tlaková nádoba, ve které při tlaku 0,6-1 MPa při teplotě 150-190 °C při modifikaci čerstvého dřeva a vysušeného přirozenou cestou je použita rozdílná metoda. V prvním případě je použit horký vzduch, ve druhém je použita vodní pára. Výhodou je zachování celulózy beze změny, chemická stavba materiálu se mění- odbourává se hemicelulóza a aktivuje se lignin.
- Sušení. Trvání této části úpravy dřeva je 3-5 dní, k procesu sušení se používají sušárny dřeva, které jsou nastaveny tak, aby dřevo na konci procesu dosahovalo vlhkosti 8-10 %.
- Vytvrzování. Omezením přístupu vzduchu dojde k vytvrzování při atmosférickém tlaku 0,1 MPa, teplotě 150-190 °C po dobu přibližně 12-16 hodin. Vlhkost dřeva v této části klesá pod 1 %. Úkolem této části procesu je aktivování makromolekul ligninu za použití vzájemného síťování rozložených hemicelulóz.
- Kondenzování je konečnou etapou úpravy dřeva, kterou provádíme opět v sušárně, opětovným zvlhčením dřeva a to tak, aby v konečné fázi byla vlhkost 4-6 %. Tento proces je rozložen přibližně na dobu tří dnů. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### 3.6.3 Úprava dřeva technologií Plato Wood

Metoda Plato Wood vznikla z výzkumu hydrotermální přeměny biomasy na kapalná paliva. (Hill a kol., 2005)

U dřeva upraveného touto metodou můžeme očekávat o 50 % zlepšení rozměrové stability, ohybová pevnost nižší o 5-20 %, hygroskopicitu má možnost snížení o 30-40 %. Důležitým prvkem u takto upraveného dřeva je větší odolnost proti parazitům a prodlužuje se trvanlivost materiálu. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### 3.6.4 Termická modifikace dřeva připravovaného v prostředí inertních plynů-RetificatedWood

Retifikované dřevo se vyrábí v inertním ochranném prostředí dusíku. Princip výroby retifikačního dřeva je založen na postupném zvyšování teploty až do rozmezí 210-260 °C v inertním prostředí dusíku, přičemž podíl kyslíku musí být menší než 2 %. Při tomto procesu dochází k mírné pyrolýze dřeva, ale termooxidační reakce probíhají v menší míře, a proto původní pevnost dřeva je zachována. Než se zahájí retifikační proces je nutné dřevo předsušit na vlhkost 12 %. (Reinprecht, Vidholdová, 2008)

### 3.6.5 Termická úprava dřeva připravovaného v olejích-OHT-Wood

K modifikaci označené OHT-Wood (Oil Heat Treatment) dochází v horkých rostlinných olejích, podle licencovaného OHT procesu. Spotřeba oleje na výrobu 1 m<sup>3</sup> dřeva je cca 20-60 kg. Technologie této metody se uskutečňuje v impregnačních kotlích za pomoci horkých rostlinných olejů o teplotě 200-220 °C. Vzhledem ke skutečnosti, že se po dobu výroby ve dřevě nachází jen malé množství kyslíku, jsou nežádoucí termooxidační procesy ve dřevě omezeny. Postup je založen na tom, že horký olej vniká do dřeva a postupně ho zahřívá. Je nutné udržovat teplotu 180-200 °C po dobu 2-4 hodin ve středu modifikovaného materiálu. Nejvíce používán je lněný olej. Výběr oleje pro úpravu dřeva hraje důležitou roli. (Rosenqvist, 2000) Při úpravě dřeva touto metodou mohou být použity i upravené rostlinné oleje, které mají pozitivní vliv na biodolnost upravovaného dřeva. Jedná se o kombinaci termické a chemické modifikace dřeva. (Tjeerdsma a kol., 2002)

Méně známou technologií je proces Royal (Royale procese, Osmose). Patří také k technologiím výroby termicky modifikovaného dřeva v prostředí olejů. Odlišnost této metody spočívá ve snížení tlaku a poměrně nízké teplotě 60-90 °C. Používaný olej nevniká do buněčných stěn dřeva, ale je po ukončení výrobního procesu odsán pomocí vakua. (Reinprecht, Vidholdová, 2008) Tato metoda se používala v minulosti za účelem sušení dřeva v prostředí olejů. (Hill a kol., 2005)

Metoda Menz Holz používá horký olej jako ohřívací médium. I tato metoda patří k méně používaným. Olej přenese teplo na modifikované dřevo, jeho teplota se pohybuje 180-220 °C po dobu 18 hodin. (Hill a kol., 2005)

### 3.7 Využití termicky upraveného dřeva

Doporučené aplikace pro konečné použití u tepelně ošetřeného dřeva třídy Thermo-S Softwood jsou stavební prvky (nenosné), nábytek, zahradní nábytek, sauna a vybavení koupelen, komponenty dveří a oken.

Doporučené aplikace pro konečné použití u tepelně ošetřeného dřeva třídy Thermo-S Hardwood jsou bytové vybavení, nábytek, podlahy, sauna a vybavení koupelen, zahradní nábytek.

Doporučené aplikace pro konečné použití u tepelně ošetřeného dřeva třídy Thermo-D Softwood jsou obklady, sauna a vybavení koupelen, podlahy, zahradní nábytek.

Doporučené aplikace pro konečné použití u tepelně ošetřeného dřeva třídy Thermo-D Hardwood jsou venkovní obložení budov, exteriérové dveře, sauna a vybavení koupelen, podlahy, zahradní nábytek. (Prokom, 2020)

### 3.8 Impregnování dřeva

Impregnace, nebo také chemická ochrana dřeva, se používá v případech, kdy je potřeba zvýšit trvanlivost proti vlivům, které by dřevo znehodnocovaly. Impregnační prostředky jsou chemické látky anorganického či organického původu nebo kombinace obou typů. Mohou se rozpouštět ve vodě, či v jiném rozpouštědle.

Kvalita impregnace dřeva je ovlivněna:

- způsobem nanášení-postřikem, nátěrem, namáčením, tlakem,
- strukturou dřeva-měkké, řídké, husté,
- vlhkostí dřeva-stupeň vlhkosti dřeva,
- fyzikálně chemickými vlastnostmi ochranného prostředku-vzlínavost, viskozita. (Reinprecht, Pánek, 2016)

#### 3.8.1 Typy impregnačních prostředků

- Biocidy, látky sloužící k ochraně proti biologickým škůdcům. Do této kategorie patří fungicidy, insekticidy a baktericidy,
- antipyreny, látky, které snižují zápalnost a zpomalují hoření,
- inhibitory povětrnostní koroze, látky, které chrání dřevo proti vlivu povětrnostních podmínek,
- inhibitory chemické koroze, látky, které chrání dřevo proti vlivu agresivních chemických látek. (Reinprecht, Pánek, 2016)

### 3.8.2 Způsoby ošetření dřeva impregnací

Mezi nejčastější způsoby impregnace patří kapilární impregnace, difúzní impregnace a tlaková impregnace.

Kapilární impregnace spočívá v penetraci impregnační kapaliny do dřeva, doashuje malé účinnosti, protože poskytuje jen povrchovou úpravu dřeva.

Kapilární impregnace dřeva má dva způsoby provedení:

- Natírání ochranné látky štětcem, nebo nástřikem, hloubka průniku ochranné látky u zdravého dřeva je 1-2 mm u narušeného dřeva až 5 mm pod povrch,
- máčení do impregnační kapaliny, doba ponoru do cca několika minut dle hustoty kapaliny, propustnosti dřeva a stárnutí. Tento způsob je účinnější než nanášení. (Unistroy, 2017)

Při difúzní impregnaci se používají pouze anorganické, ve vodě rozpustné impregnační materiály. Princip difúzní impregnace spočívá v dlouhodobém namočení materiálu do impregnační kapaliny a pronikání látky do dřeva. Kvalita impregnace závisí na délce ponoru materiálu do tekutiny. Tento způsob impregnace je časově náročný, trvá až několik týdnů. (Unistroy, 2017)

Tlaková impregnace je metoda vhodná pro impregnaci dřeva, které bude v dlouhodobém přímém styku se zemí-stavební konstrukce, sloupy, mosty apod.

Doporučený impregnační režim-dle Bethela (podtlak-přetlak-podtlak). Trvání jednotlivých fází se odvíjí od impregnovatelnosti dané dřeviny. Mezi velmi obtížně impregnovatelné dřeviny patří smrk a borovice. Buk a dub je naopak obtížně impregnovatelný. (Unistroy, 2017)

Parametry impregnace závisí na účelu a použití dřeva. Dřevo se umístí do tlakové nádoby pro impregnaci. Nejdříve se vytvoří podtlak a z buněk dřeva se po předepsanou dobu odstraňuje vzduch. Tato fáze je velmi podstatná pro výslednou hloubku průniku impregnační látky do dřeva. Pro impregnaci platí, že čím je nižší tlak v tlakové komoře, tím je výsledná hloubka průniku vyšší. Tato fáze trvá řádově několik hodin. Následně se nádoba zaplní při podtlaku aplikačním roztokem impregnačního přípravku. V nádobě se vytvoří hydraulický tlak (přetlak 8-10 bar), který tlačí přípravek po předepsanou dobu hluboko do struktury dřeva. Tato fáze trvá řádově několik hodin. Závěrečný podtlak odsaje přebytečný roztok z povrchu dřeva, roztok je odčerpán zpět do zásobní nádrže. Impregnované dřevo se vyjme z tlakové nádoby a uloží pro fixaci na větraném místě bez dosahu deště. (Unistroy, 2017)

Mezi tlakové metody patří i impregnace pomocí autoklávu. Protože se jedná o přístrojovou metodu, ulehčí práci a čas, tedy i finanční prostředky vynaložené na impregnaci.

Existuje několik způsobů použití autoklávu:

- VAD - autoklávová impregnace dřeva za atmosférického tlaku s aplikací počátečního a konečného vakua.
- VDV - autoklávová impregnace dřeva pod vyšším než atmosférickým s aplikací počátečního a konečného vakua. (Unistroy, 2017)

## 4 Praktická část

### 4.1 Metodika práce

#### 4.1.1 Označení vzorků a prvotní měření

Dle zadání práce bylo zvoleno dřevo buku k provedení praktické části viz. obrázek č. 5. Zkušební vzorky z dřeva buku měly rozměry 20x20x30 mm. Vzorky se rozdělily do šesti sérií, kdy každá série obsahuje 30 vzorků. Série byly zvoleny následovně:

1. Referenční vzorky bez modifikací
2. Vzorky prošly impregnací
3. Vzorky termované na teplotu 190 °C
4. Vzorky termované na teplotu 200 °C
5. Vzorky impregnované a termované na teplotu 190 °C
6. Vzorky impregnované a termované na teplotu 200 °C

Každý vzorek byl označen nejprve číslem série a poté číslem vzorku v dané sérii. Dalším krokem bylo změření jednotlivých vzorků posuvným měřítkem, na každém vzorku bylo označeno místo měření, aby se zachovala konzistence měření v následujících krocích práce. Poté se vzorky zvážily a všechna data se zapsaly do programu Microsoft Excel 2021 jak můžeme vidět v tabulce č. 2 která obsahuje naměřené hodnoty série 6.



Obrázek 5 - Vzorky před označením (autor)

Číslo série	Číslo vzorku	Ra [mm]	Ta [mm]	Ax [mm]	Hmotnost [g]
6	1	19,64	19,63	29,95	8,443
6	2	19,59	19,54	30,08	7,575
6	3	19,62	19,63	30	7,786
6	4	19,63	19,56	30,05	8,088
6	5	19,46	19,72	30,77	8,509
6	6	19,56	19,7	30,07	6,968
6	7	19,44	19,58	30,18	8,254
6	8	19,52	19,63	30,01	7,714
6	9	19,54	19,63	30,5	7,433
6	10	19,48	19,68	30,24	7,911
6	11	19,58	19,65	30,18	8,043
6	12	19,68	19,67	30,24	7,942
6	13	19,44	19,79	30,07	6,066
6	14	19,61	19,74	30,54	7,739
6	15	19,41	19,75	30,27	8,165
6	16	19,54	19,62	30,42	7,962
6	17	19,29	19,75	30,16	8,009
6	18	19,55	19,63	30,49	7,523
6	19	19,64	19,54	29,81	7,772
6	20	19,43	19,61	30,33	8,249
6	21	19,5	19,73	30,03	7,261
6	22	19,51	19,67	30,14	8,215
6	23	19,49	19,54	30,41	8,322
6	24	19,51	19,77	29,94	7,327
6	25	19,42	19,69	30,29	7,636
6	26	19,72	19,65	30,19	7,872
6	27	19,58	19,44	30,47	8,143
6	28	19,47	19,69	30,26	7,386
6	29	19,5	19,63	29,64	7,136
6	30	19,44	19,84	29,86	6,347

Tabulka 2 - Rozměry a hmotnost vzorků série 6 při vlhkosti W0% (autor)

#### 4.1.2 Impregnace vzorků

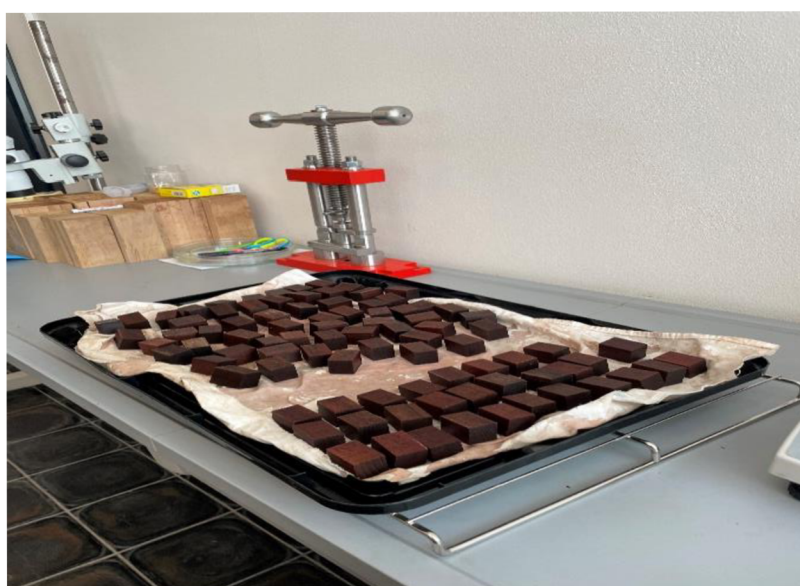
Série vzorků čísla 2,5 a 6 určené na impregnaci se umístily do nádoby a byla k nim přidána fenolformaldehydová impregnace v koncentraci 1:5, to znamená jeden díl impregnace na pět dílů vody. Následně se vzorky v nádobě s impregnací zatížily a vložily do autoklávu, viz obrázek č. 6. První část procesu impregnace začal vytvořením podtlaku 0,72 baru v autoklávu který se udržoval 30 minut. Následně se autokláv natlakoval na hodnotu 6,5 baru a tento tlak se udržoval po dobu 1,5 hodiny. Po této fázi se autokláv odtlakoval a mohl se otevřít poklop a vzorky vyjmout. Následně bylo nutné vzorky otřít od přebytečné impregnace. Vzhled



vzorků po otření můžeme vidět na obrázku č. 7. Naimpregnované vzorky byly po procesu ještě převáženy na váze a hodnoty se zapsaly do programu Microsoft Excel 2021, rozdíl hmotností před a po impregnaci vzorků série 6 znázorňuje tabulka č. 3.



Obrázek 6 – Autokláv (autor)



Obrázek 7 - Vzorky po vyjmutí z autoklávu (autor)

Číslo série	Číslo vzorku	Hmotnost [g]	Hmotnost [g] po impregnaci
6	1	8,443	16,6
6	2	7,575	16,05
6	3	7,78	15,92
6	4	8,088	16,49
6	5	8,509	16,11
6	6	6,968	16,15
6	7	8,254	16,26
6	8	7,714	16,28
6	9	7,433	16,08
6	10	7,911	16,1
6	11	8,043	14,8
6	12	7,942	16,38
6	13	6,066	16,68
6	14	7,739	16,13
6	15	8,165	16,64
6	16	7,962	16,52
6	17	8,009	16,02
6	18	7,523	15,34
6	19	7,77	16,16
6	20	8,249	16,2
6	21	7,261	16,17
6	22	8,215	16,38
6	23	8,322	15,73
6	24	7,32	15,64
6	25	7,636	15,82
6	26	7,872	16,51
6	27	8,143	16,4
6	28	7,386	15,85
6	29	7,136	16,3
6	30	6,347	16,48

*Tabulka 3 - Hmotnosti vzorků série 6 před impregnací a po impregnaci (autor)*

#### 4.1.3 Termická úprava vzorků

Termická úprava vzorků série 3 a 5 probíhala při teplotě 190 °C a to po dobu 3 h. Vzhled vzorků těchto sérií zobrazuje obrázek č. 8. Vzorky ze série 4 a 6 se termicky upravily teplotou 200 °C také po dobu 3 h a jejich vzhled před začátkem procesu vidíme na obrázku č. 9. Po modifikaci následovalo opětovné přeměření rozměrů posuvným měřítkem a také zvážení všech sérií vzorků mimo sérii 1, data

naměřená na sérii 6 prezentuje tabulka č. 4. Po zapsání dat do programu Microsoft Excel 2021 se všechny vzorky umístily do klimatizační komory.



Obrázek 8 - Vzorky série 3 a 5 před termickou úpravou (autor)



Obrázek 9 - Vzorky série 4 a 6 před termickou úpravou (autor)

Číslo série	Číslo vzorku	Ra [mm]	Ta [mm]	Ax [mm]	Hmotnost [g]
6	1	19,36	18,9	30,04	7,206
6	2	19,58	19,28	30,22	6,835
6	3	19,62	19,21	30,1	7,268
6	4	19,54	19,28	30,24	7,59
6	5	19,53	19,57	29,99	6,98
6	6	19,36	19,24	30,33	7,636
6	7	19,3	19,29	30,18	7,341
6	8	20,34	19,62	30,81	8,177
6	9	19,66	19,12	30,5	6,977
6	10	19,75	19,31	30,39	7,429
6	11	18,04	18,53	29,93	4,604
6	12	19,9	19,18	30,01	7,726
6	13	19,4	19,05	30,33	7,411
6	14	19	19,1	30,61	7,061
6	15	19,71	19,6	30,28	7,863
6	16	19,87	19,29	30,57	7,508
6	17	19,12	19,35	30,31	7,399
6	18	19,45	19,18	29,65	6,667
6	19	19,25	19,27	30,05	7,243
6	20	19,26	19,28	30,46	7,661
6	21	19,77	19,38	30,07	7,525
6	22	19,63	19,47	30,41	7,49
6	23	19,3	19,24	30,49	6,847
6	24	18,81	18,98	30,12	6,698
6	25	18,41	19,14	30,28	6,868
6	26	19,5	19,33	30,29	7,694
6	27	19,78	19,23	30,64	7,814
6	28	19,92	19,64	30,16	7,037
6	29	19,87	19,68	31	7,24
6	30	19,43	19,31	30,26	7,83

Tabulka 4 - Rozměry a hmotnost vzorků série 6 po termické modifikaci (autor)

#### 4.1.4 Měření vzorků po klimatizování

Klimatizování vzorků probíhalo po dobu 7 dní v klimatizační komoře viz. obrázek č. 10, dokud nedošlo k jejich ustálení. Po tomto procesu bylo potřeba vzorky přeměřit a převážit. Měření probíhalo na stejném místě označeném při prvotním měření vzorků, tato naměřená data pro sérii 6 prezentuje tabulka č. 5. Získaná data byla zapsána do programu Microsoft Excel 2021. Dále jsem každou sérii vzorků rozdělil na dvě skupiny po 15 vzorcích, a to na skupinu 1, obsahující prvních 15 vzorků každé série, která bude následně podrobena zkoušce na bobtnání a



skupinu 2, obsahující následujících 15 vzorků každé série, která bude podrobena zkoušce pevnosti v tlaku. Takto byly vzorky připraveny na zkoušky fyzikálních a mechanických vlastností.



Obrázek 10 - Klimatizační komora (autor)

Číslo série	Číslo vzorku	Ra [mm]	Ta [mm]	Ax [mm]	Hmotnost [g]
6	1	19,74	19,27	30,26	7,703
6	2	19,85	19,22	30,21	7,305
6	3	20,06	19,41	30,14	7,772
6	4	19,92	19,62	30,35	8,133
6	5	19,86	19,77	30,12	7,489
6	6	19,69	19,59	30,38	8,163
6	7	19,66	19,65	30,4	7,863
6	8	20,63	19,92	30,83	8,752
6	9	20	19,46	30,5	7,468
6	10	20,12	19,71	30,46	7,945
6	11	18,41	18,64	30,17	4,993
6	12	20,29	19,55	30,13	8,264
6	13	19,82	19,35	30,44	7,899
6	14	19,22	19,33	30,93	7,544
6	15	20,14	19,79	30,37	8,412
6	16	20,26	19,6	30,75	8,037
6	17	19,44	19,65	30,32	7,907
6	18	19,85	19,39	29,75	7,136
6	19	19,57	19,58	30,21	7,755
6	20	19,56	19,54	30,58	8,182
6	21	20,11	19,82	30,25	8,049
6	22	19,93	19,66	30,55	8,009
6	23	19,57	19,58	30,48	7,328
6	24	19,18	19,3	30,11	7,176
6	25	18,66	19,35	30,31	7,348
6	26	19,84	19,79	30,24	8,219
6	27	20,18	19,51	30,86	8,361
6	28	20,25	19,82	30,14	7,53
6	29	20,35	19,83	30,99	7,753
6	30	19,81	19,63	30,49	8,362

Tabulka 5 - Rozměry a hmotnost vzorků série 6 po klimatizování (autor)

#### 4.1.5 Měření bobtnání a nasákavosti

Vzorky skupiny 1 ze všech sérií byly vloženy do nádoby a zatíženy, poté se kompletně zalily destilovanou vodou takovým způsobem, aby byly všechny ponořeny. Když hmotnost vzorků po vážení v průběhu několika dní přestala stoupat, tak se vzorky vyjmuly z nádoby, jejich vzhled vidíme na obrázku č. 11. Poté došlo k osušení vzorků a následovalo změření posuvným měřítkem na označeném místě na každém vzorku a následně byly vzorky zváženy na váze. Naměřená data se zapsala do programu Microsoft Excel 2021. Tato naměřená

data pro sérii 6 vidíme v tabulce č. 6. Výpočet bobtnání probíhal podle následujícího vzorce:

$$\alpha_i = \frac{a_{iw2} - a_{iw1}}{a_{iw1}} \times 100$$

a = rozměr, plocha nebo objem tělesa (mm, mm<sup>2</sup>, mm<sup>3</sup>)

i = index udávající směr, plochu či objem

w<sub>1</sub> = vlhkost před bobtnáním (%)

w<sub>2</sub> = vlhkost po ukončení bobtnání (%)

(Horníček, 2016)



Obrázek 11 - Vzorky po vyjmutí z nádoby s destilovanou vodou (autor)

Číslo série	Číslo vzorku	Ra [mm]	Ta [mm]	Ax [mm]	Hmotnost [g]
6	1	19,59	20,6	30,09	11,659
6	2	20,85	19,75	30,23	11,691
6	3	21,32	19,93	30,16	12,27
6	4	21,14	20,35	30,22	12,554
6	5	20,7	20,55	30,11	11,716
6	6	20,47	20,43	30,29	11,704
6	7	20,53	20,3	30,31	11,981
6	8	21,84	20,49	30,85	13,752
6	9	21,08	19,87	30,56	11,969
6	10	20,92	20,36	30,41	12,039
6	11	19,59	19	29,97	9,296
6	12	21,45	20,06	30,3	12,611
6	13	20,85	19,94	30,38	12,578
6	14	20,38	19,79	30,64	11,548
6	15	21,34	20,3	30,26	12,93

Tabulka 6 - Rozměry a hmotnost vzorků série 6 o vlhkosti W30% (autor)

#### 4.1.6 Měření pevnosti v tlaku

Vzorky skupiny 2 ze všech sérií byly podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku za pomoci přístroje TIRAtest 2850 viz obrázek č. 12.



Obrázek 12 - Přístroj TIRAtest 2850 (autor)



Během zkoušky působí přístroj silou ve směru vláken vzorků konstantní rychlostí, detail umístění vzorku do přístroje vidíme na obrázku č. 13.



Obrázek 13 - Detail vzorku v přístroji TIRAtest 2850 (autor)

Délka zkoušky by měla trvat 1,5 min než dojde k porušení vzorku. Po každé zkoušce se vrátila hlava do nulové polohy a mohl se vložit další vzorek a započnout další zkouška. Výsledkem jsou hodnoty FH[N], což je maximální síla působící v horizontálním směru do momentu narušení celistvosti vzorku. Data se během zkoušky zaznamenala do programu přístroje a ty byla poté převedena k ostatním naměřeným hodnotám do programu Microsoft Excel 2021. Naměřené hodnoty pro sérii 6 vidíme v tabulce č. 7. Mez tlakové pevnosti byla vypočítána dle následujícího vzorce:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{a \times b}$$

$\sigma_{max}$  = mez pevnosti (MPa)

F = působící síla (N)

a, b ... = příčné rozměry tělesa (mm)

(Horníček, 2016)

Číslo série	Číslo vzorku	FH[N]
6	16	21678,75
6	17	23868,75
6	18	19567,15
6	19	14899,7
6	20	23507,85
6	21	22801,8
6	22	23510,9
6	23	20554
6	24	22299,95
6	25	17035,3
6	26	20837
6	27	23392,6
6	28	21949,25
6	29	21394,35
6	30	22525,15

Tabulka 7 - Hodnoty FH[N] pro vzorky série 6 (autor)

## 4.2 Výsledky a diskuze

Naměřené hodnoty a výsledky měření se zapisovaly do softwaru tabulkového procesoru Microsoft Excel 2021, který se použil také pro tvorbu tabulek.

K vyhodnocení naměřených dat byl použit software TIBCO Statistica 14.0.1 a také se za jeho pomoci vytvořily grafy. Pro zvýšení přehlednosti prezentovaných výsledků jsou jednotlivé druhy modifikace vzorků označeny pouze číslem série viz. tabulka č. 8.

Druh modifikace	Číslo série	Počet vzorků
Referenční vzorky	1	30
Impregnace	2	30
Termická úprava - 190°C	3	30
Termická úprava - 200°C	4	30
Impregnace + termická úprava - 190°C	5	30
Impregnace + termická úprava - 200°C	6	30

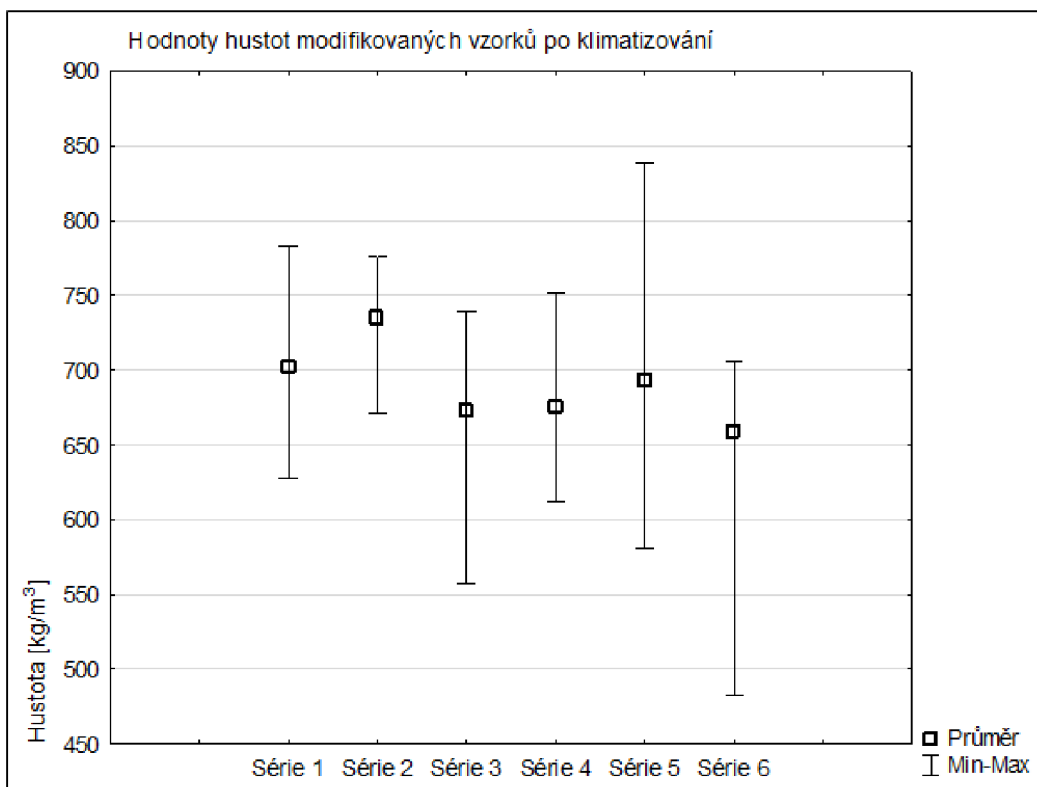
Tabulka 8 - Druhy modifikace (autor)

#### 4.2.1 Hustota

Hodnoty hustot modifikovaných vzorků po klimatizování znázorněné v tabulce č. 9 jsou doplněny grafem č. 1, který znázorňuje změny hustot vzorků po dané modifikaci. Průměrná hustota série 1, tedy referenčních vzorků dosahuje hodnot 702,2 [kg/m<sup>3</sup>], tato hodnota koresponduje s hodnotou 712 [kg/m<sup>3</sup>] kterou uvádí (Zeidler, Borůvka, 2016). Nejnižších průměrných hodnot 659,0 [kg/m<sup>3</sup>] dosáhly vzorky série 6, to jsou vzorky impregnované a termicky upravené teplotou 200 °C. Nejvyšší průměrné hodnoty dosáhly vzorky série 2, tedy vzorky pouze impregnované. Tyto vzorky dosahují hodnot 735,1 [kg/m<sup>3</sup>]. Výsledné hodnoty říkají, že průměrná hustota pouze impregnovaných vzorků je vyšší než průměrná hustota referenčních vzorků, avšak když se na vzorky po impregnaci aplikuje termická modifikace, průměrné hodnoty hustot klesnou pod průměrnou hodnotu hustoty referenčních vzorků. U vzorků série 3 a 4, které jsou modifikovány pouze termicky se průměrná hodnota hustoty dle očekávání snížila oproti vzorkům referenčním ze série 1. (Walker a kol., 1993)

Číslo série	platných N	Průměr	Minimalní hodnota	Maximální hodnota	směrodatná odchylna	variační koeficient[%]
1	30	702,2	627,7	783,1	38,17	5,4
2	30	735,1	671,5	776,3	29,86	4,1
3	30	672,6	557,0	739,2	39,42	5,9
4	30	675,2	611,6	751,2	39,48	5,8
5	30	693,3	580,9	839	43,89	6,3
6	30	659,0	482,3	705,3	42,18	6,4

Tabulka 9 - Hodnoty hustot modifikovaných vzorků po klimatizování [kg/m<sup>3</sup>] (autor)



Graf 1 - Hodnoty hustot modifikovaných vzorků po klimatizování (autor)

Procentuální změny hustoty byly vypočteny ze vzorků v absolutně suchém stavu. Nárůst či pokles hustoty jednotlivých sérií se odvozuje od hustoty referenčních vzorků série 1. Tyto hodnoty prezentuje tabulka č. 10. Nejvyšší změny dosáhly vzorky série 2, které prošly modifikací pouze impregnováním, tato změna 144,62 % je také jediným nárůstem hodnot hustoty, který pozorujeme. U všech zbylých sérií vzorků pozorujeme pokles hodnot hustoty proti referenční sérii 1. Nejnižší hodnoty 95,56 % nabývají vzorky série 6. Dle předpokladů termická modifikace vzorků ovlivňuje tyto hodnoty.

Číslo série	1	2	3	4	5	6
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	682,07	986,43	654,32	659,27	666,38	638,17
Hustotní změna	100%	144,62%	95,93%	96,66%	97,70%	93,56%

Tabulka 10 - Procentuální změny hustoty (autor)

#### 4.2.2 Bobtnání

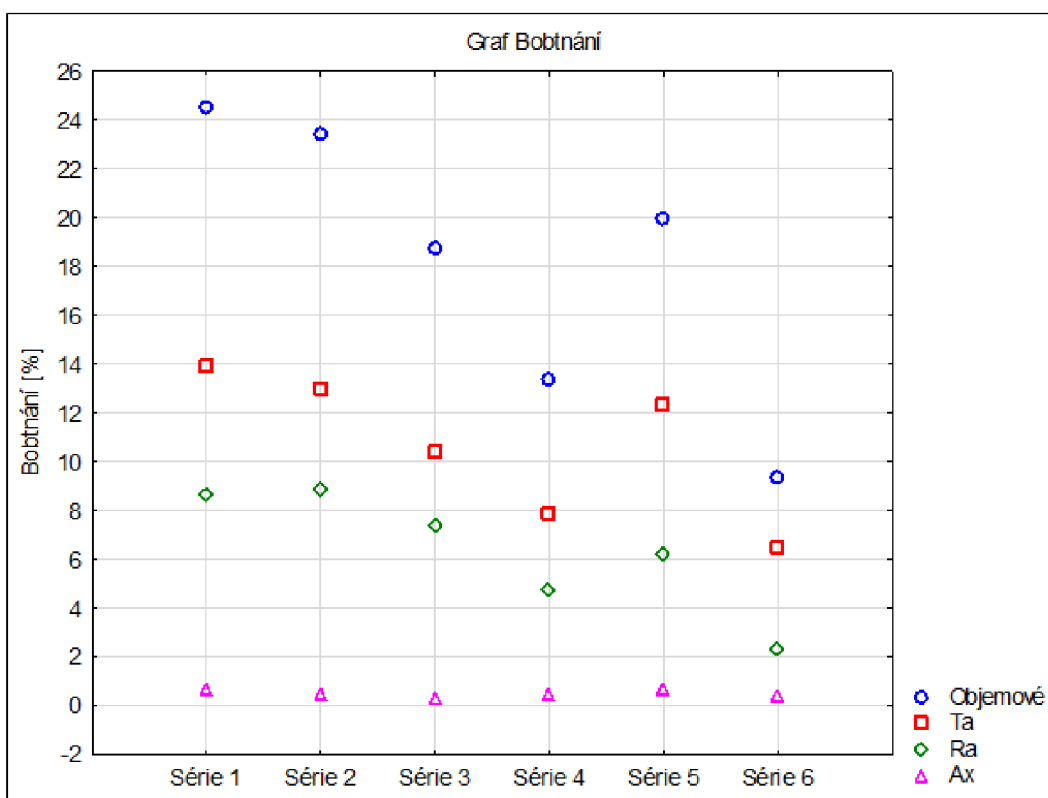
Test byl proveden na vzorcích 1-15 každé série, to znamená celkem na 90 vzorcích. V tabulce č. 11 vidíme průměrné výsledky bobtnání radiálního, tangenciálního, axiálního a objemového. Tato tabulka reprezentuje změny, které nastaly po procesu bobtnání na všech sériích vzorků. Tabulka č. 12 prezentuje průměrné procentuální hodnoty výsledků bobtnání v porovnání se sérií 1, což jsou vzorky referenční. Největší změny v bobtnání objemovém, radiálním a tangenciálním dosahují vzorky série 6. V objemovém bobtnání je to 38,08 %, v bobtnání tangenciálním je to 46,41 % a v bobtnání radiálním dosahují vzorky průměrných hodnot 26,74 %. Nejnižších hodnot v bobtnání axiálním dosahují vzorky série 3 a to konkrétně 39,39 %. Graf č. 2 vizuálně reprezentuje výsledky objemového bobtnání, radiálního bobtnání, tangenciálního bobtnání a axiálního bobtnání. Samotná impregnace měla na objemové bobtnání jen malý vliv. U termické úpravy teplotou 200 °C pomohla impregnace k ještě výraznějšímu snížení bobtnání, avšak u termické úpravy teplotou 190 °C měla impregnace dle výsledků vliv opačný. Což odpovídá předpokládaným vlastnostem popsáným v teoretické části práce.

Číslo série	1	2	3	4	5	6
Objemové bobtnání [%]	24,50	23,44	18,75	13,36	19,94	9,33
Tangenciální bobtnání [%]	13,92	12,98	10,37	7,83	12,28	6,46
Radiální bobtnání [%]	8,64	8,83	7,33	4,69	6,2	2,31
Axiální bobtnání [%]	0,66	0,42	0,26	0,42	0,62	0,36

Tabulka 11 - Průměrné výsledky bobtnání (autor)

Číslo série	1	2	3	4	5	6
Objemové bobtnání [%]	100	95,67	76,53	54,53	81,39	38,08
Tangenciální bobtnání [%]	100	93,25	74,5	56,25	88,22	46,41
Radiální bobtnání [%]	100	102,2	84,84	54,28	71,76	26,74
Axiální bobtnání [%]	100	63,64	39,39	63,64	93,94	54,55

Tabulka 12 - Průměrné výsledky bobtnání v porovnání se sérií 1 (autor)



Graf 2 – Bobtnání (autor)

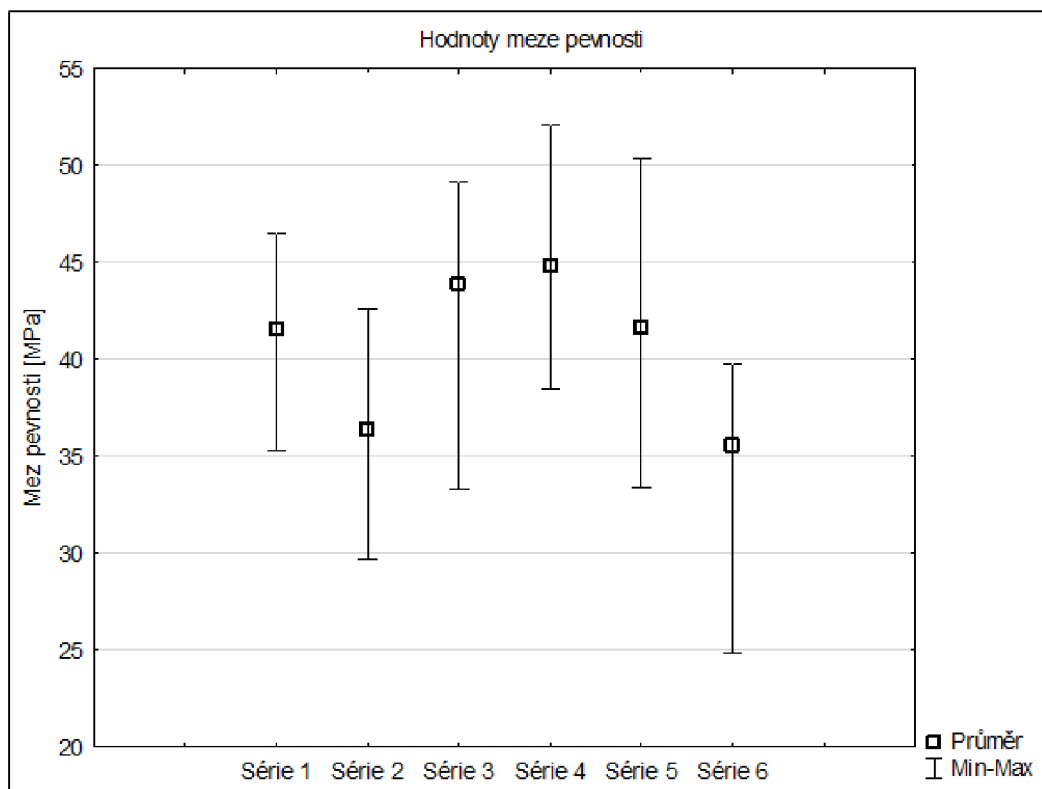
### 4.2.3 Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku podélně na růst vláken byla provedena na vzorcích 16-30 každé série, to znamená na celkem 90 vzorcích. Hodnoty pevnosti v tlaku viz. tabulka č. 13 říkají, že pevnost vzorků série 2 a 6 byla provedenou modifikací snížena proti referenčním vzorkům ze série 1. Lze předpokládat, že tento výsledek koresponduje s předpokladem, že termickou modifikací se hodnoty pevnosti mění, tedy snižují. (Yildiz a kol., 2006) Můžeme spekulovat nad výsledky série 2, kde změny zřejmě hovoří o vlivu materiálových odlišností dřeva. Vzorky sérií 3, 4 a 5 dosahovaly pevností přibližně stejných či mírně větších než referenční vzorky série 1. Což zcela odpovídá předpokladu, který vychází z teoretické části práce.

Číslo série	platných N	Průměr	Minimalní hodnota	Maximální hodnota	směrodatná odchylka	variační koeficient[%]
1	15	41,55	35,25	46,52	3,22	7,7
2	15	36,38	29,70	42,61	4,16	11,4
3	15	43,86	33,30	49,16	4,14	9,4
4	15	44,82	38,43	52,10	3,92	8,7
5	15	41,66	33,40	50,34	4,57	11,0
6	15	35,54	24,83	39,78	4,20	11,8

Tabulka 13 - Hodnoty meze pevnosti (autor)

Graf č. 3 znázorňuje změny pevnosti v tlaku jednotlivých sérií. U série 2 a 6 došlo k poklesu. Jak bylo výše uvedeno, u série 6 byl tento pokles předpokládán, u série 2 lze jen předpokládat, že výsledky byly ovlivněny chybou měření či odlišnými vlastnostmi dřeva.



Graf 3 - Hodnoty meze pevnosti (autor)

#### 4.2.4 SWOT analýza

Cílem této práce bylo posouzení vlivu termické modifikace dřeva a impregnace na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva buku. V rámci diskuse byla provedena SWOT analýza vyvinutého materiálu. Viz tabulka č. 14. Mezi silné stránky termicky a impregnačně upraveného dřeva buku patří biologická odolnost, atraktivní barva, rozměrová stálost a zároveň i obnovitelnost zdroje. Mezi slabé stránky naopak patří cena, horší mechanické vlastnosti, náročnost výroby a nízká konstrukční pevnost materiálu. Jako příležitosti byly identifikovány ekologičnost, domácí produkce, expanze do jiných odvětví a náhrada za exotické dřeviny. Jako hrozby potom ze SWOT analýzy vyplývají nedostatek dřevní suroviny, nahrazení



anorganickým materiálem, nedostatečná informovanost spotřebitelé a jiné způsoby modifikace dřeva.

Silné stránky	Slabé stránky
Biologická odolnost	Cena
Atraktivní barva	Zhoršené mechanické vlastnosti
Rozměrová stálost	Náročnost výroby
Obnovitelný zdroj	Nedosahuje konstrukčních pevností
Příležitosti	Hrozby
Ekologičnost	Nedostatek dřevní suroviny
Domácí produkce	Nahrazení anorganickým materiálem
Expanze do jiných odvětví	Nedostatečná informovanost spotřebitelů
Náhrada exotických dřevin	Jiné způsoby modifikace dřeva

Tabulka 14 - SWOT analýza (autor)

## 5 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo posouzení vlivu termické modifikace dřeva a impregnace na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva buku.

Teoretická část práce se snažila popsat dřevo buku lesního, jeho makroskopickou i mikroskopickou stavbu a také jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Zaměřena byla i na modifikace dřeva. Z pohledu modifikace dřeva můžeme usilovat o zlepšení pozitivních vlastností dřeva nebo snížení vlastností dřeva, které považujeme za nepříznivé. Modifikací dřeva můžeme dosáhnout změny vlastností, jako jsou pevnost a pružnost, či rozměrová nestabilita a odolnost vůči škůdcům a prostředí.

Část teoretické práce byla věnována vlivu termických úprav na vlastnosti dřeva. Zaměřena byla na termické úpravy často používané, jako je úprava v atmosféře vzduchu-ThermoWood, úprava v prostředí vodní páry-PlatoWood, úprava v prostředí inertních plynů-RetificatedWood Dále i na ty méně časté, jako je úprava v prostředí olejů – OHT-Wood, RoyalWood, Menz Holz.

Dále byla popsána modifikace dřeva, konkrétně termická modifikace a impregnace. Tyto kapitoly byly důležité především pro propojení s praktickou částí práce. Termická modifikace byla následně popsána podrobněji, rozlišeny byly typy Thermo S a Thermo D. Také byly přiblíženy jednotlivé způsoby výroby termodřeva. Jedna kapitola teoretické části byla věnována impregnaci. Impregnace, tedy chemická ochrana dřeva, se používá v případech, kdy je potřeba zvýšit trvanlivost proti vlivům, které by dřevo znehodnocovaly. Jak termická úprava dřeva, tak impregnace byly postupy, které byly použity v praktické části a jsou stěžejní pro celou tuto práci.

Praktická část byla zaměřena na měření vlivu termické modifikace a impregnace dřeva buku na několika vzorcích, které byly nejprve připraveny a následně u nich byly měřeny konkrétní vlastnosti. Vzorky dřeva buku se rozdělily do šesti sérií, kdy každá série obsahovala 30 vzorků, celkem se tedy pracovalo se 180 vzorky dřeva. První série obsahovala referenční vzorky bez modifikací, druhá série pak vzorky, které prošly pouze impregnací. Třetí a čtvrtá sérii tvořily vzorky termicky upravené teplotou 190 °C a 200 °C. Pátá a šestá série byla tvořena vzorky upravenými termicky i impregnací, a to na teploty 190 °C u páté a 200 °C u šesté série.

Jednotlivé vzorky byly změřeny a zváženy. Následně probíhala impregnace zvolených sérií, tedy série č. 2, 5 a 6. Po každém kroku modifikace se vzorky znova změřily a zvážily. Následně probíhala termická úprava, ve které se měnila teplota

termického vlivu u jednotlivých sérií. U série 3 a 5 byla zvolena teplota 190 °C, u série 4 a 6 pak teplota 200 °C.

Dalším krokem bylo klimatizování vzorků po dobu sedmi dní. Po této době byly vzorky připraveny ke zkouškám fyzikálních a mechanických vlastností.

Hlavním krokem bylo měření a porovnávání jednotlivých vzorků daných sérií. Všechna měřená data byla zapisována do tabulek a výsledky byly následně popsány.

Ve většině případů byly potvrzeny předpoklady, které vyplývaly z teoretické části. Předpokladem bylo, že se fyzikální vlastnosti vlivem termické úpravy a impregnace zlepší. Výsledné hodnoty říkají, že průměrná hustota pouze impregnovaných vzorků je vyšší než průměrná hustota referenčních vzorků, avšak když se na vzorky po impregnaci aplikuje termická modifikace, průměrné hodnoty hustot klesnou pod průměrnou hodnotu hustoty referenčních vzorků. U vzorků série 3 a 4, které byly modifikovány pouze termicky se průměrná hodnota hustoty dle očekávání snížila oproti vzorkům referenčním ze série 1.

Očekávané změny v bobtnání objemovém, radiálním a tangenciálním byly potvrzeny. Největší změny dosahují série, které byly upraveny impregnací i nejvyšší použitou teplotou termické úpravy. Jediná deviace byla změřena u bobtnání axiálního, což nebylo předpokládané. Lze tedy předpokládat především vliv chyby měření či materiálové nestálosti.

Samotná impregnace měla na objemové bobtnání jen malý vliv. U termické úpravy teplotou 200 °C pomohla impregnace k ještě výraznějšímu snížení bobtnání, avšak u termické úpravy teplotou 190 °C měla impregnace dle výsledků vliv opačný. Což odpovídá předpokládaným vlastnostem popsaným v teoretické části práce.

Tato práce se snaží o celkové zmapování problematiky, je zaměřena jen na určitý úzký okruh tématu. Je nasnadě, že další výzkumy v této oblasti mohou přispět k prohlubování informací o vlastnostech dřeva, ale i k lepšímu využití daného materiálu v dřevozpracujícím průmyslu.

## 6 Použité zdroje

### 6.1 Literární zdroje

**AWOUEMI L.** Heat treatment of less-valuable Nigerian-grown *Cebia Pentadara* wood for improved properties. 2006. IRG/WP/06-40332, 7 s.

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

**HILL, C.A.S., FORSTER, S., FARAHANI, M.R.M., HALE, M.D.C. AND WILLIAMS, G.** An investigation of cell wall micropore blocking as a possible mechanism for the decay resistance of anhydride modified wood. 2005. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 55(1), 69–76.

**HORÁČEK, P.** Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. 2. vyd. 2008. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. ISBN 978-80-7375-169-2.

**Kabir Kazi, Feroz & Cooper, P.** Rapid-extraction oxidation process to recover and reuse copper chromium and arsenic from industrial wood preservative sludge. 2002. *Waste management (New York, N.Y.)*

**KAČÍKOVÁ, D., KAČÍK, F.** Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave, 2011. Zvolen. Technická univerzita vo Zvolene, ISBN 978-80-228-2249-7.

**Martinka, J., Chrebet, T., Král, J., and Balog, K.** An examination of the behaviour of thermally treated spruce wood under fire conditions. 2013. *Wood Research* 58(4), 599-606.

**Militz, H.** Heat treatment technologies in Europe: scientific background and technological state-of-art, in: *Proceedings of Conference on Enhancing the Durability of Lumber and Engineered Wood Products*. 2002, Kissimmee, Orlando.

**POŽGAJ, A., et al.** Structure and wood properties (Štruktúra a vlastnosti dreva). 1997. Priroda, Bratislava.

**REINPRECHT, L.** Ochrana dreva. 2008 Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6

**REINPRECHT, L.; PÁNEK, M.** 2016. Trvanlivost a ochrana dřeva. V Praze: Česká zemědělská univerzita. ISBN 978-80-213-2660-6.

**REINPRECHT, L.; VIDHOLDOVÁ Z.** Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie. 2008 Vyd. Zvolen: TU Zvolen. 89 s. ISBN 978-80-228-1920-6

**ROSENQVIST, M.** The distribution of introduced acetyl groups and a linseed oil model substance in wood examined by microradiography and ESEM. International Research Group on Wood Preservation. 2000. Doc. No. IRG/WP 00-40169.

**Stark, N.** Effect of species and particle size on properties of wood-flour-filled polypropylene composites. 1997. Le Meridien at Coronado, San Diego, CA.

**TJEERDSMA, B.F., STEVENS, M., MILITZ, H. AND VAN ACKER, J.** Effect of process conditions on moisture content and decay resistance of hydro-thermally treated wood. 2002. Holforschung und Holzverwertung, 54(5), 94–96, 98–99.

**Walker, J. C. F., Butierfield, B. G., Langrish, T. A. G., Harris, J. M., and Uprichard, J. M.** Primary Wood Processing. 1993. Chapman and Hall, London. 595p

**Yildiz, S., Gezer, E.D., Yildiz, U.C.** Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. 2006. Build. Environ. 41 (12)1762–1766, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.017>.

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

## 6.2 Internetové zdroje

**ITWA** (International ThermoWood Asociation) [online]. ThermoWood Handbook 2017. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z:

[https://ejulkaisu.grano.fi/grano/thermowood\\_kasikirja\\_eng#p=1](https://ejulkaisu.grano.fi/grano/thermowood_kasikirja_eng#p=1)

**NIS-Nábytkářský informační systém. NIS-Nábytkářský informační systém**

[online]. 2013, [cit. 25.03.2023]. Dostupné z: [https://www.n-i-](https://www.n-i-s.cz/cz/modifikovane-drevo/page/217/)

[s.cz/cz/modifikovane-drevo/page/217/](https://www.n-i-s.cz/cz/modifikovane-drevo/page/217/)

**NIS-Nábytkářský informační systém. NIS-Nábytkářský informační systém**

[online]. 2013, [cit. 24.03.2023]. Dostupné z: [https://www.n-i-](https://www.n-i-s.cz/cz/mikroskopicka-stavba-listnatych-drevin/page/322/)

[s.cz/cz/mikroskopicka-stavba-listnatych-drevin/page/322/](https://www.n-i-s.cz/cz/mikroskopicka-stavba-listnatych-drevin/page/322/)

**ISPAS-Dřevoprodej ISPAS** [online]. [cit. 28.03.2023] Dostupné z:

<https://www.ispas.cz/podlahove-palubky-thermo-borovice-26-x-140-x-5700-mm-ab>

**PROKOM** Povrchová úprava materiálu ThermoWood. [online]. 2020, [cit. 2023-

03-14]. Dostupné z: [http://www.prokom.cz/thermowood-](http://www.prokom.cz/thermowood-tepelneupravenedrevo/nater-owatrol-aquadecks-na-thermowood-tepelne-upravene-drevo.pdf)

[tepelneupravenedrevo/nater-owatrol-aquadecks-na-thermowood-tepelne-upravene-drevo.pdf](http://www.prokom.cz/thermowood-tepelneupravenedrevo/nater-owatrol-aquadecks-na-thermowood-tepelne-upravene-drevo.pdf)

**Stanislav Horníček.** Vliv tepelné modifikace na vybrané vlastnosti dřeva

plantážově pěstovaného topolu. Academia.edu [online]. 2016 [cit. 18.03.2023].

Dostupné z:

[https://www.academia.edu/81867542/Vliv\\_tepeln%C3%A9\\_modifikace\\_na\\_vybra](https://www.academia.edu/81867542/Vliv_tepeln%C3%A9_modifikace_na_vybran%C3%A9_vlastnosti_d%C5%99eva_plant%C3%A1%C5%BEov%C4%9B_p%C4%9Bstovan%C3%A9ho_topolu?f_r=86640)  
[n%C3%A9\\_vlastnosti\\_d%C5%99eva\\_plant%C3%A1%C5%BEov%C4%9B\\_p%C4%9Bstovan%C3%A9ho\\_topolu?f\\_r=86640](https://www.academia.edu/81867542/Vliv_tepeln%C3%A9_modifikace_na_vybran%C3%A9_vlastnosti_d%C5%99eva_plant%C3%A1%C5%BEov%C4%9B_p%C4%9Bstovan%C3%A9ho_topolu?f_r=86640)

**UNISTROY** Technology of wood impregnation by polymeric compositions

[online]. 2017, [cit. 2031-03-11]. Dostupné z:

[https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/7\(58\)/03\\_chernenko\\_58.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/7(58)/03_chernenko_58.pdf)