

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Posouzení vlivu termické úpravy na dynamický modul  
pružnosti dřeva břízy bělokoré**

Bakalářská práce

Autor: Martin Bulušek

Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

2019

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Martin Bulušek

Dřevařství

Název práce

**Posouzení vlivu termické úpravy na dynamický modul pružnosti dřeva břízy bělokoré**

Název anglicky

**Assessment of the effect of heat-treatment on the dynamic modulus of elasticity of European birch wood**

---

### Cíle práce

1. Vyhodnotit dynamický modul pružnosti dřeva břízy, a to jak neupraveného, tak i termicky upraveného při teplotách úpravy 170 a 190 °C.
2. Posoudit faktor termo-úpravy s ohledem na vybranou vlastnost (veličinu).
3. Porovnat zjištěné výsledky s dostupnými údaji v odborné literatuře.

### Metodika

1. Zpracovat literární rešerši o zkoumané dřevině, termické úpravě dřeva, hodnocené vlastnosti a o faktorech ovlivňujících její proměnlivost.
2. Standardizovanými postupy na dodaných na-klimatizovaných upravených i neupravených (referenčních) zkušebních tělesech naměřit rozměry, hmotnost a čas průchodu ultrazvukové vlny (přístrojem Fakopp Ultrasonic Timer). Následně vypočítat hustotu, rychlost šíření zvuku a dynamický modul pružnosti.
3. Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě.

## Doporučený rozsah práce

40-50 stran

## Klíčová slova

dřevo břízy, termická úprava, dynamický modul pružnosti, hustota, rychlost šíření zvuku, variabilita vlastností

---

## Doporučené zdroje informací

Borůvka, V., and Babiak, M. (2016). Vlastnosti dřeva v příkladech, 1. vyd. Praha ČZU, 139 s. ISBN 978-80-213-2618-7

Bucur, V. (2006). Acoustics of Wood, Springer Series in Wood Science, 393 s. ISSN 1431-8563

Dinwoodie, J. M. (2000). Timber: Its nature and behavior, Taylor & Francis New York, USA, pp. 258. ISBN 0-419-25550-8

FAKOPP Ultrasonic Timer user's guide

(<http://fakopp.com/docs/products/ultrasonic/UltrasonicGuide.pdf>).

Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., and Babiak, M. (1997). Štruktúra a Vlastnosti Dřeva [Structure and Properties of Wood], Příroda AS, Bratislava, Slovakia. ISBN 80-07-00600-1

Reinprecht, L., and Vidholdová, Z. (2011). Termodrevo [ThermoWood], ŠMÍRA-PRINT, Czech Republic. ISBN 978-80-87427-05-7

Reinprecht, L. (2016). Wood Deterioration, Protection and Maintenance, John Wiley & Sons, Oxford, United Kingdom. ISBN 978-1-119-10653-1

Wagenführ, R. (2000). Holzatlas, Fachbuchverlag, Leipzig. pp. 707. ISBN 978-3446213906

Zobel, B. J., and Buijtenen, J. P. (1989). Wood Variation: Its Causes and Control, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 363. ISBN 978-3-642-74071-8

---

## Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FLD

## Vedoucí práce

Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

## Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Elektronicky schváleno dne 15. 12. 2017

**doc. Ing. Milan Gaff, PhD.**

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2018

**prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.**

Děkan

V Praze dne 08. 10. 2018

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Posouzení vlivu termické úpravy na dynamický modul pružnosti dřeva břízy bělokoré“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vlastimila Borůvky, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze dne 14.4.2019

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval Ing. Vlastimilu Borůvkovi, PhD. za odborné vedení bakalářské práce a za rady při jejím zpracování. Dále bych rád poděkovat Ing. Tomáši Holečkovi za seznámení s laboratoří a za rady při měření. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu při studiu vysoké školy.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce zkoumá vliv termické úpravy na dynamický modul pružnosti dřeva břízy bělokoré. Jelikož vlivem úpravy dochází i k dalším změnám vlastností, které se termické úpravy týkají, jsou tyto vlastnosti, jako především vlhkost a hustota, v této práci popsány. Ostatní změny nebyly zkoumány a jsou zde pouze zmíněny. Tato práce se skládá z teoretické a praktické části. Teoretická část shrnuje charakteristiku břízy bělokoré, její rozšíření, využití, stavbu (mikroskopickou a makroskopickou) a popisuje zkoumané vlastnosti dřeva. Dále vysvětluje proces termické úpravy ThermoWood®.

Praktická část se zabývá posuzováním dynamického modulu pružnosti dřeva neupraveného a termicky upraveného při teplotě 170 °C a 190 °C. Jelikož během termického procesu dochází ke změnám i dalších fyzikálních a mechanických vlastností, práce porovnává vliv termické úpravy na hustotu a vlhkost, které s dynamickým modulem pružnosti souvisejí. Stanovení vybraných vlastností probíhalo dle norem ČSN. Výjimkou bylo stanovení dynamického modulu pružnosti, na které u nás norma neexistuje a provádí se pomocí manuálu Fakopp (Fakopp ultrasonic timer user's guide). Vzorky byly termicky upraveny finskou metodou ThermoWood při teplotě 170 °C a 190 °C. K posouzení vlivu termické úpravy na zkoumané vlastnosti byla ponechána tepelně neupravená sada vzorků. Výsledky ukázaly, že vlivem termické úpravy při 170 °C došlo k mírnému nárůstu dynamického modulu pružnosti a v případě úpravy při 190°C k poklesu. Z měření vyplývá, že vlivem termické úpravy dochází k poklesu hustoty a ke snížení rovnovážné vlhkosti dřeva. Dále byla zkoumána závislost mezi stupněm termické úpravy a sledovanými vlastnostmi, tj. hustotou, vlhkostí a dynamickým modulem pružnosti.

## **Klíčová slova**

dřevo břízy, dynamický modul pružnosti, hustota, vlhkost, rychlost šíření zvuku

## **Abstract**

This bachelor thesis is dealing with an effect of heat treatment on the dynamic modulus of elasticity of white birch wood. As there are also side effects of the heat treatment, this work is focused on the properties that are related to the heat treatment, too. Those properties are mainly moisture and density. Other changes in wood properties were not explored during the measurement, but they are mentioned in this paper. This work composes of a theoretical part and a practical part. The theoretical part is focused on general characteristics of white birch, its distribution, use, microscopic and macroscopic structure and specific properties that were explored in this work. The process of the ThermoWood® heat treatment is described too.

The aim of the practical part is to assess the dynamic modulus of wood elasticity of unprocessed wood and thermally modified wood treated at 170 °C and 190 °C. As other changes of physical and mechanical properties occur during the heat treatment, this work compares the effect of heat treatment on density and moisture, because these properties are related to the dynamic modulus of elasticity. Determination of selected properties was done according to ČSN regulations. As there is no regulation stated for dynamic modulus of elasticity, determination of this property is made using the Fakopp ultrasonic timer user's guide. Assessed samples were thermally modified at 170 °C and 190 °C using ThermoWood method. The set of unprocessed wood was determined as a reference sample to be able to recognise the effect of heat treatment. Results show that due to the effect of heat treatment at 170 °C, the dynamic modulus of elasticity increases slightly and due to the effect of heat treatment at 190 °C, the dynamic modulus of elasticity decreases. The results of measurements show that due to the heat treatment, the density of the wood decreases and the equilibrium moisture content of wood reduces. Furthermore, the relation between the level of heat treatment and examined properties of white birch wood (density, moisture and dynamic modulus of elasticity) was found.

## **Keywords**

birch wood, dynamic modulus of elasticity, density, moisture, sound propagation speed

# Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Cíl práce .....</b>	<b>12</b>
<b>3. Rozbor problematiky .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1. Bříza bělokorá – Betula pendula .....</b>	<b>13</b>
3.1.1. Stavba dřeva břízy bělokoré.....	15
<b>3.2. Hodnocené fyzikální a mechanické vlastnosti .....</b>	<b>16</b>
3.2.1. Vlhkost.....	16
3.2.2. Hustota .....	19
3.2.3. Pružnost dřeva .....	22
3.2.5. Akustické vlastnosti dřeva .....	24
<b>3.3. Termická úprava dřeva.....</b>	<b>26</b>
3.3.1. ThermoWood.....	28
<b>4. Metodika .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1. Příprava vzorků .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2. Klimatizování a termická úprava vzorků .....</b>	<b>34</b>
<b>4.3. Měření fyzikálních a mechanických vlastností .....</b>	<b>35</b>
4.3.1. Stanovení hustoty .....	35
4.3.2. Stanovení vlhkosti .....	36
4.3.3. Stanovení dynamického modulu pružnosti.....	36
4.3.4. Vyhodnocování výsledků .....	39
<b>5. Výsledky a diskuze .....</b>	<b>40</b>
<b>5.1. Hustota .....</b>	<b>41</b>
<b>5.2. Vlhkost.....</b>	<b>42</b>
<b>5.3. Dynamický modul pružnosti.....</b>	<b>43</b>
<b>6. Závěr.....</b>	<b>47</b>
<b>7. Použité zdroje .....</b>	<b>49</b>
<b>8. Přílohy .....</b>	<b>53</b>



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Mikroskopická stavba břízy (Zeidler, 2007).....	15
Obrázek 2. Závislost vlhkosti dřeva na teplotě vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu (Matovič, 1993).....	17
Obrázek 3. Vliv vlhkosti na hustotu dřeva (Horáček, 1998).....	21
Obrázek 4. Obecný tvar pracovního diagramu (Matovič, 1993).....	22
Obrázek 5. Vliv vlhkosti na rychlost šíření zvuku ve dřevě (Požgaj et alj, 1993).....	26
Obrázek 6. Fáze výroby ThermoWood, T - teplota [°C], t - čas [h] (ThermoWood Handbook, 2003).....	28
Obrázek 7. Vliv teploty tepelné úpravy na hustotu, Treatment temperature - teplota úpravy [°C], Density - hustota [kg.m <sup>-3</sup> ] (ThermoWood Handbook, 2003).....	31
Obrázek 8. Vliv teploty tepelné úpravy na modul pružnosti, Treatment temperature - teplota úpravy [°C], Modulus of elasticity - modul pružnosti [MPa] (ThermoWood Handbook, 2003).....	33
Obrázek 9. Lišta o rozměrech 20x20x1000 mm (autor).....	34
Obrázek 10. Klimatizační komora Memmert (autor).....	35
Obrázek 11. Vysokoteplotní komora Katres (autor).....	35
Obrázek 12. Fakopp ultrasonic timer (autor).....	37
Obrázek 13. Graf pro stanovení korekce, time - čas ( $\mu s$ ), distance - vzdálenost [cm] (Fakopp ultrasonic timer user's guide).....	37

## Seznam grafů

Graf 1. Vliv termické úpravy na hustotu.....	42
Graf 2. Vliv termické úpravy na dynamický modul pružnosti.....	45
Graf 3. Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a hustotou u referenční sady vzorků.....	46

## Seznam tabulek

Tabulka 1. Naměřené základní statistické údaje, REF - referenční sada vzorků, 170 - sada upravena při teplotě 170 °C, 190, sada upravená při teplotě 190 °C .....	40
Tabulka 2. Hustoty břízy uvedené v literatuře.....	41
Tabulka 3. Naměřená hustota .....	41
Tabulka 4. Změna hustoty termicky upravených vzorků oproti referenční sadě [%] .....	42
Tabulka 5. Naměřená vlhkost.....	43
Tabulka 6. Změna vlhkosti termicky upravených vzorků oproti referenční sadě [%] .....	43
Tabulka 7. Statický modul pružnosti ( $MOE_{stat}$ ) břízy uvedený v literatuře.....	44
Tabulka 8. Naměřený dynamický modul pružnosti ( $MOE_{dyn}$ ).....	44
Tabulka 9. Změna dynamického modulu pružnosti termicky upravených vzorků oproti referenční sadě [%].....	45
Tabulka 10. Změny vlastností termicky upraveného dřeva v porovnání s referenční sadou [%].....	46

## Seznam příloh

Příloha 1. Duncanův test pro závislost hustoty na stupni termické úpravy, * statisticky významné $p < 0,05$ .....	53
Příloha 2. Duncanův test pro závislost dynamického modulu pružnosti na stupni termické úpravy, * statisticky významné $p < 0,05$ .....	53
Příloha 3. Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a hustotou u termicky upravené sady vzorků při teplotě 170 °C.....	53
Příloha 4. Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a hustotou u termicky upravené sady vzorků při teplotě 190 °C.....	54

## 1. Úvod

Dřevo je materiál, který člověk využívá od pravěku a díky člověku mělo a má pestrou škálou využití. Ze začátku se využívalo pro výrobu nástrojů a postupem času se začalo využívat jako multifunkční materiál. Dřevo jako materiál má velké množství výhod, ale bohužel i nevýhod. Je to přírodní, obnovitelný materiál, což ho v dnešní době opět dostává do popředí a stává se čím dál více využívanější. Mezi jeho hlavní výhody řadíme nízkou hmotnost při relativně vysoké pevnosti, snadnou opracovatelnost, ekologickou odbouratelnost a recyklovatelnost, dobrou odolnost vůči chemikáliím, výborné akustické vlastnosti, dobré tepelně izolační vlastnosti a mnohé další. Nemůžeme opomenout také jeho estetický vzhled. Jak bylo zmíněno, dřevo má i celou řadu nevýhod, jako je jeho heterogenita, anizotropie, hygroskopicitata a jeho nízká odolnost vůči působení abiotických a biotických činitelů. Neměli bychom opomenout také dobrou zápalnost dřeva a jeho hořlavost. Některé z nevýhod dřeva můžeme omezit vhodnou ochranou. Mezi základní ochrany dřeva řadíme konstrukční ochranu dřeva a nebo jeho modifikaci, která může být buď chemická, termická anebo biologická.

Termická modifikace dřeva omezuje hned několik jeho nevýhod. Hlavní zlepšenou vlastností termicky modifikovaného dřeva je zlepšená rozměrová a tvarová stabilita (snížení hygroskopicity), což přispívá ke zvýšené odolnosti vůči biotickým činitelům. Termicky upravenému dřevu se zvyšuje živostnost a zlepšují se tepelně-izolační vlastnosti. Jelikož se při termické úpravě dřeva mění jeho struktura a chemické složení, ztrácí dřevo svojí velkou výhodu a tou je pevnost. Z toho vyplývá, že se termicky upravené dřevo nesmí používat do nosných konstrukcí. Termicky upravené dřevo nachází hlavní uplatnění, díky své zvýšené odolnosti, jak v interiéru (nábytek), tak v exteriéru, kde je vhodné na fasády, ploty, pergoly, terasy, zahradní nábytek a mnohé jiné.

## **2. Cíl práce**

Hlavním cílem této práce je vyhodnotit dynamický modul pružnosti dřeva břízy bělokoré, a to jak neupravených vzorků (referenční sada), tak i termicky upravených vzorků při teplotách 170 °C a 190 °C. Cílem této práce je také posoudit faktor termo-úpravy s ohledem na vybranou vlastnost dřeva a porovnat zjištěné výsledky s dostupnými údaji v odborné literatuře. Dalším cílem je naměřit a vypočítat hodnoty a zjistit změny, ke kterým došlo ve dřevě během tepelné úpravy.

### **3. Rozbor problematiky**

#### **3.1. Bříza bělokorá – *Betula pendula***

Bříza bělokorá je středně velký opadavý strom s bílým kmenem, který dorůstá výšky 20 až 30 metrů. Průměr kmene se pohybuje kolem 75 centimetrů. Bříza bělokorá se řadí mezi krátkověké dřeviny, které se dožívají maximálně 100 - 150 let. Kmen břízy je v mládí rovný a později zprohýbaný s korunou, která je nepravidelná, vejcovitá a řídká. Její větve bývají nepravidelně zvlňené s tenkými a dlouhými mírně převislými konci. Dolní větve má poměrně krátké a odstávající. Bříza bělokorá má listy oválného nebo trojúhelníkového tvaru a jsou 2 až 6 centimetrů dlouhé. Kořenový systém břízy je mělký a silně rozvětvený, díky čemuž je strom dobře ukotven v půdě. Tento systém se přizpůsobuje rozmanitému terénu a udrží dřevinu i na skalách. (Kremer, 2003; Úředníček & Chmelář, 1998; Úředníček et al., 2001)

Bříza bělokorá patří mezi silně světlomilné dřeviny, které k dobrému vývoji potřebují holou plochu bez stínu. V tomto ohledu patří mezi nejnáročnější listnaté stromy u nás. (Úředníček & Chmelář, 1998)

Z hlediska spotřeby vláhy ji běžně nacházíme na výstředních stanovištích, kde ji jiné dřeviny nemohou ohrozit. Mezi takové místa můžeme zařadit místa s krajním nedostatkem půdní vláhy a naproti tomu místa s nadbytečnou vlhkostí. Změny v hladině spodní vody snáší těžko, z čehož vyplývá, že nesnese záplavy. Vzdušná vlhkost pro břízu není významná a roste i ve velmi suchých oblastech. (Úředníček & Chmelář, 1998)

Bříza je nenáročná na složení půdy a přizpůsobí se nejrůznějším podkladům. Převažuje na kyselých horninách, ale extrémně kyselé stanoviště nesnese (rašeliny). Dále se často vyskytuje na písčitých půdách s vysokým obsahem skeletu a na skalách. Její charakteristickou vlastností je schopnost osídlovat surové a nevyvinuté půdy, což je projevem jejího pionýrského charakteru. (Úředníček & Chmelář, 1998)

#### ***Rozšíření***

Bříza bělokorá se vyskytuje na rozsáhlém euroasijském areálu. Její hranice výskytu je obtížné přesně stanovit. Její areál zabírá podstatnou část evropského kontinentu. Na sever jde ve Skandinávii až k polárním kruhům.

Na jihu se vyskytuje v severní polovině Balkánského poloostrova a můžeme ji najít v celém horském systému Apenin a v horách Sicílie a v Pyrenejích. Velmi hojně se nachází i v západní Evropě včetně Britských ostrovů. Na východě se vyskytuje ve velkém počtu v rozsáhlých oblastech evropské části Ruska, kde postupuje lesnatými oblastmi tajgy od Uralu až na východní Sibiř k povodí Leny. (Úředníček & Chmelář, 1998)

Literatura udává, že existuje okolo 120 druhů břízy, z čehož se pouze 6 druhů vyskytuje na území České republiky. (Musil & Möllerová, 2005; Úředníček & Chmelář, 1998)

V České republice je bříza bělokorá běžnou dřevinou na území celého státu od nížin do hor, kde se většinou vyskytuje na druhotných stanovištích. Hojněji se bříza vyskytuje v severočeské pískovcové oblasti (Český ráj), Děčínských stěnách, Šumavě, Českém středohoří a na skalách vltavského údolí. V nízkých polohách ji můžeme najít na kyselých bažinatých mokřadech. V souvislých lesních oblastech je přirozené zastoupení břízy bělokoré nepatrné. Podle ministerstva zemědělství České republiky a jejich roční zprávy o stavu lesa a lesního hospodářství pro rok 2017 je procentuální zastoupení břízy v našich lesích 2,8 % a zaujímá plochu o 71 783 ha. (Úředníček & Chmelář, 1998; Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky, 2017)

### **Využití**

K uplatnění břízy docházelo už v pravěku, kdy se z čerstvé březové mízy vařením vyrábělo lepidlo. Z březové kůry se vyráběly nádoby k různému využití. Dřevo břízy při hoření nepraská, což vedlo k používání tohoto dřeva jako paliva. Kvalitu dřeva břízy zjistili ve Skandinávii, kde je tato dřevina jednou z hlavních hospodářských dřevin a je oporou dřevařského průmyslu, zejména překližkářského. Středně tvrdé, pevné a houževnaté dřevo bývalo dříve nepostradatelné pro kolářské výrobky (oje, loukotě). Své využití našlo také v řezbářství, při zhotovování náradí a drobných výrobků (násady, cívky, floky, párátka). V dnešní době se nejvíce využívá při výrobě překližek. Sušené březové listí se využívá ve farmaceutickém průmyslu díky značnému obsahu vitamínu A. (Úředníček & Chmelář, 1998; Úředníček et al., 2001)

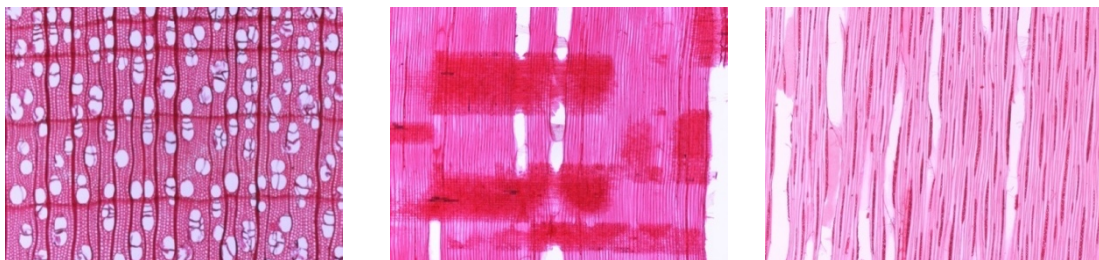
### 3.1.1. Stavba dřeva břízy bělokoré

#### ***Makroskopický popis***

Bříza bělokorá je roztroušeně pórovitá listnatá dřevina. Patří mezi středně tvrdé a středně těžké dřeviny. Má bělavou barvu se žlutým nebo narůžovělým nádechem. Její dřevo nemá rozlišené jádro a běl a její letokruhy se blíží hranici viditelnosti. Cévy se na příčném řezu jeví v podobě drobných světlých teček. Dřeňové paprsky jsou viditelné pouze na radiálním řezu jako drobná zrcátka. Ve dřevě se často vyskytují tmavě hnědé dřeňové skvrny, které jsou patrné na podélných a příčných řezech. U břízy může dojít k výskytu nepravého jádra. (Šlezingerová & Gandelová, 2012; Zeidler, 2012; Zeidler & Borůvka, 2016)

#### ***Mikroskopický popis***

Bříza má cévy uspořádané jednotlivě, případně v krátkých radiálních řadách dvou až čtyř buněk s žebříčkovou perforací. V místě styku cév a dřeňových paprsků jsou patrné drobné ztenčeniny. Dřeňové paprsky jsou jednovrstvé až čtyřvrstvé a to jak homogenní, tak i heterogenní (Obrázek 1). (Zeidler & Borůvka, 2016)



Příčný

Radiální

Tangenciální

*Obrázek 1: Mikroskopická stavba břízy (Zeidler, 2007)*

## 3.2. Hodnocené fyzikální a mechanické vlastnosti

### 3.2.1. Vlhkost

Dřevo je hygroskopický materiál, který je schopen přijímat a odevzdávat vodu. Přijímaná a odevzdávaná voda může být ve skupenstvím tekutém i v plynném. Voda je součástí dřeva od samého počátku existence stromu až po jeho skácení a i dále poté. Z hlediska uložení vody ve dřevě ji můžeme rozdělit na vodu chemicky vázanou, vázanou a volnou.

Vlhkostí dřeva rozumíme množství vody, které se nachází ve dřevě neboli hmotnost vody vztážená k hmotnosti dřeva. Rozeznáváme vlhkost absolutní a relativní. Tyto vlhkosti se nejčastěji vyjadřují v procentech.

Absolutní vlhkost dřeva se vyjadřuje podílem hmotnosti vody k hmotnosti absolutně suchého dřeva. Absolutní vlhkost se využívá pro charakteristiku fyzikálních a mechanických vlastností dřeva a je dána vztahem:

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

kde,

$w_{\text{abs}}$  – absolutní vlhkost [%],

$m_w$  – hmotnost vlhkého dřeva [kg],

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

$m_v$  – hmotnost vody [kg].

Relativní vlhkost dřeva se vyjadřuje podílem hmotnosti vody k hmotnosti vlhkého dřeva. Uplatnění této vlhkosti najdeme v případě, kdy potřebujeme znát procentuální zastoupení vody z celkové hmotnosti mokrého dřeva (prodej a nákup dřeva).

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

kde,

$w_{\text{rel}}$  – relativní vlhkost [%],

$m_w$  – hmotnost vlhkého dřeva [kg],

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

$m_v$  – hmotnost vody [kg].

(Gandelová et al., 2014; Matovič, 1993; Požgaj et al., 1993)



Absolutní a relativní vlhkost mezi sebou lze přepočítat pomocí rovnic nebo pomocí nomogramu (Obrázek 2).

$$w_{rel} = \frac{(100 \cdot w_{abs})}{(100 + w_{abs})} \quad [\%]$$

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

(Matovič, 1993)

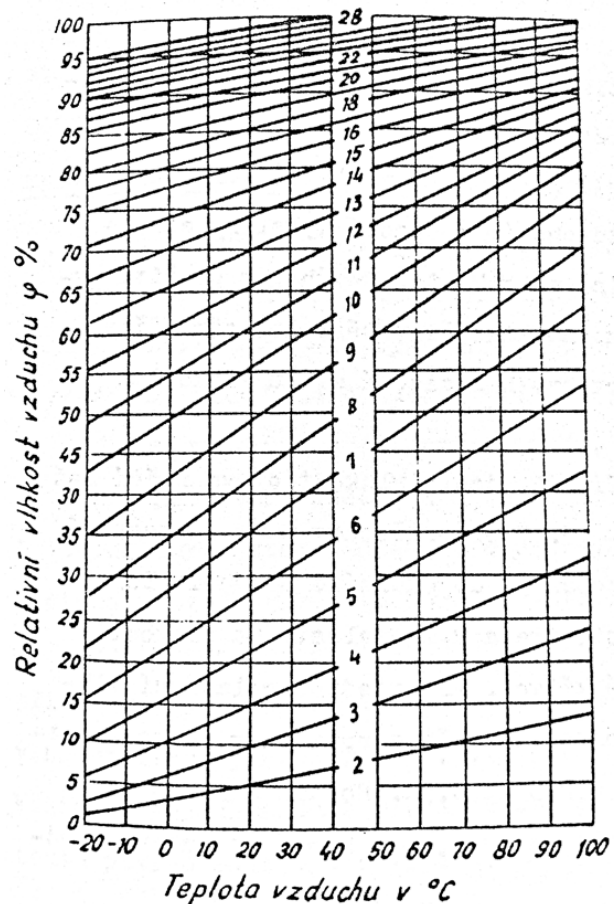
### **Rozdělení vody ve dřevě**

Jak už bylo řečeno, uložení vody ve dřevě můžeme rozdělit na vodu chemicky vázanou, vázanou a volnou. Rozděluje se podle toho, jak je uložena vzhledem k jiným složkám dřeva.

Voda chemicky vázaná je součástí chemických sloučenin a nelze ji ze dřeva odstranit sušením, proto je ve dřevě zastoupena i při nulové absolutní vlhkosti. Představuje 1 – 2 % celkové sušiny dřeva a nemá vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti.

Voda vázaná se nachází v buněčných stěnách dřeva a je vázaná na ostatní chemické složky dřeva chemickými a fyzikálně-mechanickými silami (vodíkovými můstky). Množství vody vázané ve dřevě se může pohybovat v rozmezí od 0 % až do cca 30 % dle meze nasycení buněčných stěn, které se liší dle druhu dřeviny. Má zásadní vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva.

Voda volná se nachází v lumenech buněk a v mezibuněčných prostorech. Nemá tedy zásadní vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva jako voda vázaná. (Horáček, 1998; Matovič, 1993)



Obrázek 2. Závislost vlhkosti dřeva na teplotě vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu (Matovič, 1993).

### ***Metody stanovení vlhkosti***

Stanovením vlhkosti dřeva se zabývá norma ČSN 49 0103, která udává základní metody a postupy pro zjišťování vlhkosti při fyzikálních a mechanických zkouškách. Norma také udává obecný vzorec pro výpočet vlhkosti, který je uveden výše.

Metody stanovení vlhkosti se dělí na metody přímé a nepřímé. Během přímých metod zjišťujeme skutečný obsah vody ve dřevě pomocí metody váhové, destilační nebo pomocí jodometrické titrace. Nevýhodou přímých metod je časová náročnost, ale zato jsou přesné.

Nepřímé metody určují obsah vody ve dřevě nepřímo prostřednictvím měření jiné veličiny, jejichž hodnota závisí na obsahu vody ve dřevě. Mezi nejpoužívanější nepřímé metody patří metody elektrofyzikální, radiometrické, akustické a termofyzikální. Tyto metody nejsou časově náročné, ale nepřinášejí tak přesné hodnoty jako metody přímé. Další nevýhodou nepřímých metod je měření vlhkosti pouze do meze hygroskopicity. (Gandelová et al., 2014; Požgaj et al., 1993)

### ***Faktory ovlivňující vlhkost dřeva***

Vlhkost dřeva nejvíce ovlivňuje jeho stavba, hustota, teplota, mechanické namáhání a okolí, kterému je vystaveno. V rostoucím stromě je vlhkost rozložena nerovnoměrně a mění se s výškou a po průměru kmene. U jehličnatých dřevin se vlhkost s výškou zvyšuje, což neplatí u listnatých dřevin, kde se vlhkost s výškou v podstatě nemění. Listnaté dřeviny mají rozložení vlhkosti po průměru kmene mnohem rovnoměrnější než jehličnaté dřeviny. Rozložení vlhkosti v rostoucím stromě je ovlivněno druhem dřeviny, polohou v kmeni a ročním obdobím, kdy maximální vlhkosti dosahuje strom v zimním období a minimální v letním období. K rozdílné vlhkosti u jehličnatých stromů dochází také mezi jádrem a bělí, kde vlhkost jádra může být třikrát až čtyřikrát menší než vlhkost běle, což neplatí pro listnaté dřeviny, u kterých rozdíl není tak patrný. (Horáček, 1998; Tsoumis, 1991)

### 3.2.2. Hustota

Hustota je charakterizována jako podíl hmotnosti a objemu. Nejčastěji je vyjádřena jednotkou  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Vzorec pro výpočet hustoty:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}],$$

kde,

$\rho$  – hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$m$  – hmotnost [kg],

$V$  – objem [ $\text{m}^3$ ].

Vzhledem k hygroskopicitě dřeva je určení hustoty dřeva velmi obtížné, jelikož hmotnost i objem jsou závislé na vlhkosti dřeva. Hustota dřeva je jedna z nejdůležitějších charakteristik, která ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Hustotu dřeva rozlišujeme na hustotu dřevní substance, hustotu dřeva a redukovanou hustotu dřeva. (Gandelová et al., 2014; Matovič, 1993)

#### ***Hustota dřevní substance***

Dřevní substance je chápána jako hmota buněčných stěn bez mikroskopických dutin (lumenů a mezibuněčných prostorů). Hustota dřevní substance je charakterizována podílem hmotnosti a objemu dřevní substance. Hodnota hustoty dřevní substance je závislá na chemickém složení dřeva a je pro všechny dřeviny prakticky stejná. Pro výpočty se používá hodnota v intervalu 1530 – 1540  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

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

kde,

$\rho_s$  – hustota dřevní substance [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$m_s$  – hmotnost dřevní substance [kg],

$V_s$  – objem dřevní substance [ $\text{m}^3$ ].

(Borůvka & Babiak, 2016; Matovič, 1993; Požgaj et al., 1993;)

## **Hustota dřeva**

Hustota dřeva je charakterizována podílem hmotnosti a objemu dřeva při určité vlhkosti. Hustota dřeva závisí na poměru objemu buněčných stěn a objemu mezibuněčných prostorů a lumenů, jelikož hustota dřevní substance je konstantní. V praxi se nejčastěji používají tři charakteristiky hustoty dřeva a to hustota v suchém stavu (vlhkost je 0 %), hustota při vlhkosti 12 % a hustota vlhkého dřeva, při které je vlhkost větší než 0 %. Nejpoužívanější hustotou je hustota při 12% vlhkosti, kterou se zabývá norma ČSN 49 0108. Při vystavení dřeva běžným podmínkám (teplota 20 °C, relativní vlhkost vzduchu 65 %) dosáhne dřevo právě 12% vlhkosti.

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

kde,

$\rho_w$  – hustota dřeva při vlhkosti  $w$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$m_w$  – hmotnost dřeva při vlhkosti  $w$  [kg],

$V_w$  – objem dřeva při vlhkosti  $w$  [ $\text{m}^3$ ].

Naše domácí dřeviny můžeme rozdělit podle hustoty při 12% vlhkosti do tří hlavních skupin. Dřeviny s nízkou hustotou ( $\rho_{12} < 540 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), do které patří například borovice, smrk, jedle, topol, lípa, vrba a další. Druhou skupinou jsou dřeviny se střední hustotou ( $\rho_{12} = 540 - 750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), ve které nalezneme břízu, buk, dub, modřín a další. Poslední třetí skupinou je skupina dřevin s vysokou hustotou ( $\rho_{12} > 750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), kam řadíme například habr, akát a hrušeň.

Hustota dřeva je závislá na vlhkosti. Se zvyšující se vlhkostí roste hustota, ale hmotnost a objem nerostou stejně. Hmotnost dřeva roste se zvyšující se vlhkostí až do maximálního nasycení, kdežto objem dřeva roste se zvyšující se vlhkostí pouze do meze hygroskopicity. Literatura udává, že hustota se zvýší o 0,5 %, když se vlhkost zvýší o 1 %. Takto hustota roste pouze do meze hygroskopicity. Po překročení této meze je nárůst rychlejší. (Desch & Dinwoodie, 1996; Gandelová et al., 2014; Heräjärvi, 2004; Horáček, 1998; Matovič, 1993)

### **Redukovaná hustota dřeva**

Redukovaná hustota dřeva je charakterizována jako podíl hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu a objemu při určité vlhkosti. Tato hustota slouží pro určení množství sušiny v nabobtnalém objemu dřeva.

$$\rho_{rw} = \frac{m_0}{V_w} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}],$$

kde,

$\rho_{rw}$  – redukovaná hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

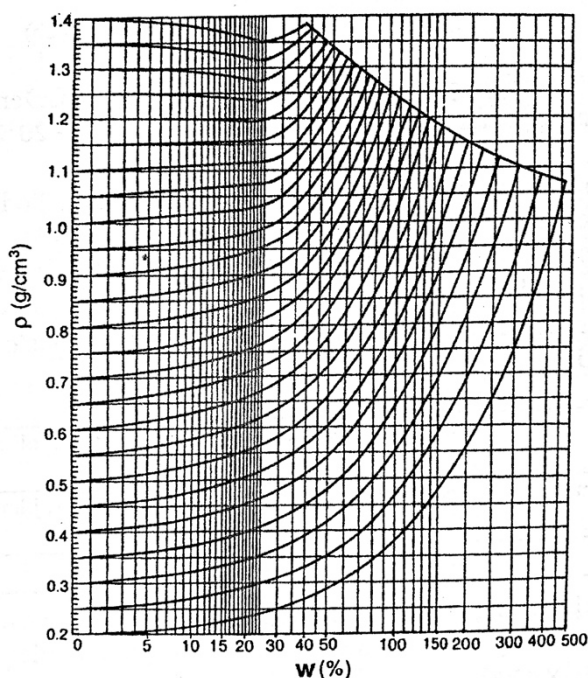
$m_0$  – hmotnost absolutně suchého dřeva [kg],

$V_w$  – objem dřeva při vlhkosti  $w$  [ $\text{m}^3$ ].

(Horáček, 1998)

### **Stanovení hustoty dřeva**

Zjišťování hustoty dřeva se nejčastěji provádí podle normy ČSN 49 0108, která nám udává základní metodu. Tato metoda spočívá v určení hmotnosti a objemu při určité vlhkosti dle vzorce, který je uveden výše. Hmotnost vzorku se zjišťuje pomocí vysušení vzorku při teplotě  $102\pm 3$  °C až do doby, kdy se hmotnost vzorku přestane měnit. V tomto okamžiku je vzorek absolutně suchý. Ze zjištěné hmotnosti suchého a vlhkého vzorku lze zjistit počáteční vlhkost dle vzorce pro výpočet absolutní vlhkosti dřeva. Objem se u pravidelných vzorků určuje pomocí mikrometru nebo posuvného měřítka dle normy. U nepravidelných vzorků je určování objemu složitější a používají se metody jako vytlačování vody, vytlačování



Obrázek 3. Vliv vlhkosti na hustotu dřeva (Horáček, 1998)

rtuti nebo ponořování. Objem lze měřit i rtuťovými objemometry nebo jinými xylometry. V případě, že známe hustotu dřeva v absolutně suchém stavu, můžeme zjistit hustotu o známé absolutní vlhkosti pomocí nomogramů (Obrázek 3). (Matovič, 1993; Požgaj et al., 1993)

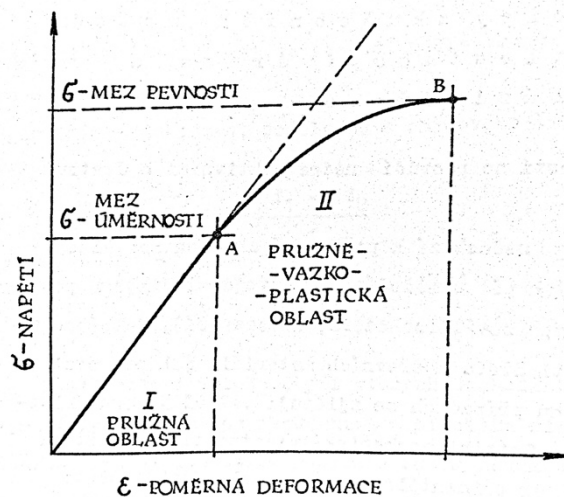
### **Faktory ovlivňující hustotu**

Jak už bylo řečeno, hustota dřeva závisí především na jeho vlhkosti. Mezi další důležité faktory, které ovlivňují hustotu dřeva, patří chemické složení dřeva, stavba dřeva, šířka letokruhů a podíl letního a jarního dřeva, poloha v kmeni, stanovištní podmínky, pěstební opatření a věk stromu. (Horáček, 1998; Požgaj et al., 1993)

### **3.2.3. Pružnost dřeva**

Pružnost dřeva lze definovat jako schopnost materiálu vrátit se po zatížení z pružné deformace okamžitě do svého původního stavu. Pružné deformace dřeva můžeme rozdělit na pružné deformace okamžité, které se vracejí do svého původního stavu okamžitě po uvolnění síly a na pružné deformace s postupem času. Tyto deformace se vracejí do svého původního stavu až po nějakém čase.

Materiál můžeme namáhat vnější silou pouze do meze úměrnosti, jelikož po překročení této meze dochází k trvalé deformaci tělesa. Pružnost lze popsat pomocí veličin modulu pružnosti ( $E$ ), modulu pružnosti ve smyku ( $G$ ) a Poissonovým číslem ( $\nu$ ). Mimo tyto charakteristiky lze pružnost popsat pomocí parametrů z pracovního diagramu. Mezi tyto



Obrázek 4. Obecný tvar pracovního diagramu (Matovič, 1993)

parametry patří mez úměrnosti ( $\sigma_u$ ), pružná deformace ( $\epsilon_p$ ) a energie pružné deformace ( $W_p$ ). (Gandelová et al., 2014; Lexa et al., 1952; Požgaj et al., 1993)

## Modul pružnosti

Modul pružnosti lze definovat jako odpor materiálu proti deformování. Vyjadřuje tedy vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Z toho vyplývá, že čím je modul pružnosti větší, tím větší napětí potřebujeme na vyvolání deformace. V praxi rozlišujeme Youngovy moduly pružnosti ( $E_i$ ) při normálových namáháních (tah, tlak, ohyb) a smykové moduly pružnosti ( $G_i$ ) při tangenciálních namáháních (smyk, krut). V případě víceosých namáháních používáme objemový modul pružnosti ( $E_k$ ). Tyto moduly pružnosti jsou velice důležité materiálové konstanty při statických výpočtech dřevěných konstrukcí.

Youngův modul pružnosti v tlaku a tahu je definován jako podíl napětí a poměrné deformace.

$$E_i = \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} \quad [\text{Pa}],$$

kde,

$E_i$  – Youngův modul pružnosti [Pa],

$\sigma_i$  – napětí [Pa],

$\varepsilon_i$  – poměrná deformace [-].

Z důvodu anizotropie dřeva se Youngovy moduly pružnosti v tahu a tlaku určují ve směru vláken a ve směru kolmo na vlákna v radiálním a tangenciálním směru. V případě ohybu se udává pouze modul pružnosti kolmo na vlákna v tangenciálním směru. Modul pružnosti našich domácích dřevin ve směru vláken se pohybuje v rozmezí 10 000 až 15 000 MPa při vlhkosti dřeva 12 %. Napříč vláken se tato hodnota snižuje v poměru  $E_{II} : E_{\perp r} : E_{\perp t} = 20 : 2 : 1$ . V porovnání s jinými materiály má dřevo nižší modul pružnosti, ale při zohlednění hmotnosti je dřevo srovnatelné s ocelí. (Desch & Dinwoodie, 1996; Gandelová et al., 2014; Matovič, 1993; Požgaj et al., 1993)

## Modul pružnosti ve statickém ohybu

Modul pružnosti ve statickém ohybu je v praxi nejčastěji vypočten ze síly působící kolmo na vlákna v tangenciálním směru. Odvození tohoto modulu pružnosti vychází z normálového namáhání zkušebního tělesa, které je vyvolané ohybovým momentem. (Gandelová et al., 2014)

### ***Dynamický modul pružnosti***

Dynamický modul pružnosti se určuje pomocí nedestruktivní metody zjišťování mechanických vlastností. Celá metoda je založena na rychlosti šíření zvuku materiálem. Ve dřevě se mohou zvukové vlny šířit jak v podélném, tak v příčném směru. Výpočet dynamického modulu pružnosti lze provést z naměřených hodnot rychlosti šíření zvuku v materiálu a jeho hustoty.

$$E_{dyn} = c^2 \cdot \rho \quad [\text{Pa}],$$

kde,

$E_{dyn}$  – dynamický modul pružnosti [Pa],

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

$\rho$  – hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

Z rovnice vyplývá, že dynamický modul pružnosti je závislý na rychlosti šíření zvuku dřevem a na jeho hustotě. Čím je rychlost šíření zvuku anebo hustota větší, tím je větší i dynamický modul pružnosti. (Kloiber, 2006; Matovič, 1993)

### ***Faktory ovlivňující dynamický modul pružnosti***

Dynamický modul pružnosti nejvíce ovlivňuje hustota a vlhkost. Dále existuje celá řada faktorů, které ovlivňují dynamický modul pružnosti. Mezi ty řadíme anatomickou stavbu dřeva, výskyt vad (hniloba, trhliny, suky), odklon vláken a teplotu. Modul pružnosti obecně klesá se snižující se hustotou a se zvyšující se vlhkostí až do meze hygroskopicity. (Desch & Dinwoodie, 1996; Gandelová et al., 2014; Požgaj et al., 1993)

#### **3.2.5. Akustické vlastnosti dřeva**

Dřevo je materiál s velmi dobrými akustickými vlastnostmi. Díky tomu se využívá na výrobu hudebních nástrojů a na místech, kde jsou zapotřebí dobré akustické vlastnosti prostředí, jako jsou kina, divadla a koncertní sítě.

Akustické vlastnosti můžeme charakterizovat jako schopnost materiálu utlumit, vést anebo zesílit zvuk. Zvukem se nazývá mechanické vlnění prostředí, které vnímá sluchový orgán. Ten se šíří pouze v hmotném prostředí



a je charakterizován vlnovou délkou, amplitudou vlnění, frekvencí a rychlostí šíření zvuku. Zvukové vlny se šíří rychlostí, která závisí na frekvenci a vlnové délce.

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

kde,

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

$\lambda$  – vlnová délka [m],

$f$  – frekvence [Hz].

Při určitých frekvencích dosahuje dřevo maximálních amplitud vibrace a tyto frekvence jsou rezonančními nebo vlastními frekvencemi dřeva. U dřeva se vyskytují tři druhy vibrací a to podélné, příčné a torzní. V případě, že dřevo nevibruje periodicky, tak se vrací do klidu a amplitudy se snižují. Rezonanční vlastností dřeva rozumíme vlastnost, která je schopná zesilovat zvuk bez zkreslení tónů. Této vlastnosti se využívá převážně v hudebním průmyslu. (Horáček, 1998; Matovič, 1993)

### **Šíření zvuku ve dřevě**

Rychlost šíření zvuku ve dřevě se rozděluje dle směru na směr podélný a příčný. Rychlost šíření zvuku v podélném směru lze vypočítat podle vzorce:

$$c_{II} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}],$$

kde,

$c_{II}$  – rychlost šíření zvuku v podélném směru [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$E$  – Youngův modul pružnosti [Pa],

$\rho$  – hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

Rychlost šíření zvuku ve dřevě v příčném směru lze vypočítat dle vzorce:

$$c_{\perp} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}],$$

kde,

$c_{\perp}$  – rychlost šíření zvuku v příčném směru [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

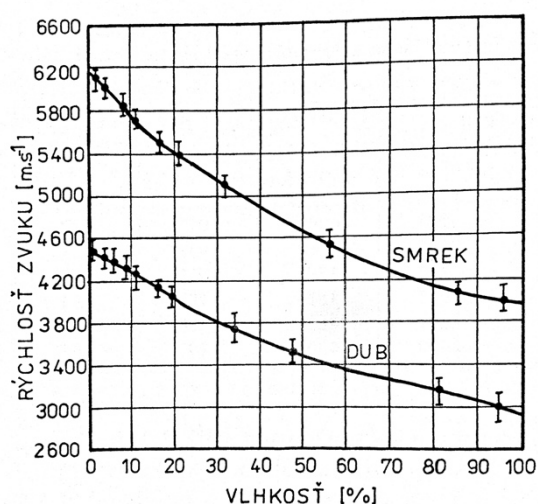
$G$  – modul pružnosti ve smyku [Pa],

$\rho$  – hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

Poměr hodnot rychlosti šíření zvuku podél a napříč vláken v radiálním a tangenciálním směru lze vyjádřit poměrem  $c_{II} : c_{\perp r} : c_{\perp t} = 15 : 5 : 3$ . Literatura udává, že rychlost šíření zvuku ve dřevě v podélném směru je v rozmezí 3500 až 5000  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . V příčném směru je rychlost výrazně nižší z důvodu nižšího modulu pružnosti v tomto směru. (Gandelová et al., 2014; Matovič, 1993; Tsoumis, 1991)

### **Faktory ovlivňující rychlost šíření zvuku ve dřevě**

Rychlost šíření zvuku ve dřevě je závislá na dřevině a její hustotě, vlhkosti, teplotě a má anizotropní charakter. Rychlost šíření zvuku ve dřevě se zvyšuje s rostoucí hustotou dřeva a klesá s rostoucí vlhkostí. Z rovnice uvedené výše je patrné, že rychlost šíření zvuku je větší, čím je větší dynamický modul pružnosti nebo menší hustota dřeva. (Gandelová et al., 2014; Horáček, 1998; Kloiber, 2006; Lexa et al., 1952; Matovič, 1993; Tsoumis, 1991)



Obrázek 5. Vliv vlhkosti na rychlost šíření zvuku ve dřevě (Požgaj et alj, 1993)

### **3.3. Termická úprava dřeva**

Termická úprava dřeva může být definována jako technologický proces, který úpravou struktury dřeva zlepšuje jeho vybrané vlastnosti, ale některé vlastnosti naopak zhoršuje. K termické úpravě dřeva dochází působením zvýšené regulované teploty. S použitím tepelných úprav, za účelem změn vlastností dřeva, pracoval už v roce 1920 Tiemann, který ukázal, že sušení při

vysokých teplotách snižuje rovnovážnou vlhkost dřeva. V posledních dvaceti letech byl, převážně v západní a severní Evropě, zájem o takto modifikované dřevo obnoven a vznikla celá řada termodřev, které se liší technologickými procesy při výrobě. Mezi hlavních pět nejrozšířenějších metod patří ThermoWood vynalezený ve Finsku, PlatoWood z Nizozemska, OHT wood z Německa, Bois Perdure a Rectification wood (Retiwood) z Francie. (Esteves, 2009)

### ***PlatoWood***

PlatoWood proces se skládá ze čtyř etap úpravy. První etapa je hydrotermická úprava dřeva, při které je dřevo ohříváno v autoklávu na teplotu 150 až 190 °C při zvýšeném tlaku 0,6 až 1 MPa. Trvání této etapy je čtyři až pět hodin. Následuje etapa sušení, při které se dřevo suší po dobu tří až pěti dnů na 8% až 10% vlhkost. Třetí etapou je etapa stabilizování dřeva, kde je dřevo vystaveno teplotě 150 až 190 °C při atmosférickém tlaku 0,1 MPa po dobu dvanácti až šestnácti hodin. Vlhkost dřeva klesá k 1 %. Závěrečnou etapou je klimatizování dřeva, při které dochází k opětovnému vlhčení dřeva v sušárně na vlhkost 4% až 6% po dobu tří dnů. Doba celého procesu závisí převážně na dřevině, tloušťce a celkové geometrii. Tento proces výroby se používá převážně na smrk, fraké, borovici, jedli, topol a břízu. (Esteves, 2009; Reinprecht, 2008)

### ***OHT (Oil Heat Treatment)***

OHT proces se uskutečňuje v impregnačním kotli naplněném horkým rostlinným olejem (řepkový, slunečnicový). Teplota oleje bývá 200 až 220 °C. Horký olej vniká do dřeva a pomalu ho ohřívá. Proces ohřívání dřeva trvá dvě až čtyři hodiny a celkový čas procesu je přibližně dvacet hodin. Používá se převážně na smrk a borovici. (Esteves, 2009; Reinprecht, 2008)

### ***RetiWood***

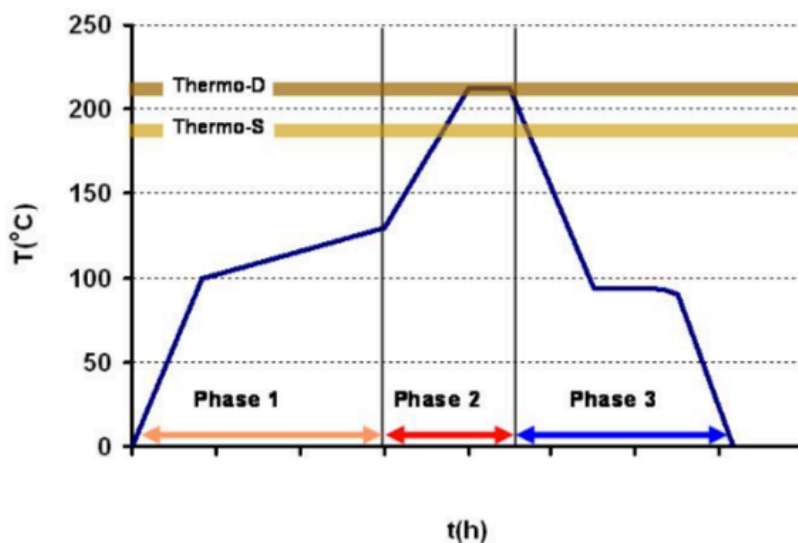
Retifikační proces je založen na postupném zvyšování teploty dřeva na 210 až 260 °C v inertním prostředí dusíku, kde podíl kyslíku musí být menší než 2 %. (Esteves, 2009; Reinprecht, 2008)

Technologie termických úprav dřeva poskytuje možnost připravit termodřevo se speciálními vlastnostmi, tak aby nám co nejvíce vyhovovalo vzhledem k jeho použití. (Esteves, 2009; Reinprecht, 2008)

### 3.3.1. ThermoWood

ThermoWood byl vyvinut technickým výzkumným střediskem VTT ve Finsku. Značku ThermoWood mohou používat pouze členové Mezinárodní ThermoWood Asociace. Tento proces termické úpravy je považován za velice ekologický, jelikož při výrobě nejsou používány žádné chemické látky. Termický proces úpravy dřeva ThermoWood lze rozdělit do tří hlavních fází (Obrázek 6).

- Fáze 1 - Zvýšení teploty a sušení při vysokých teplotách
- Fáze 2 - Tepelná úprava
- Fáze 3 - Chlazení a úprava vlhkosti



Obrázek 6. Fáze výroby ThermoWood,  $T$  - teplota [°C],  $t$  - čas [h] (ThermoWood Handbook, 2003).

Při fázi 1 dochází k rychlému zvyšování teploty v komoře působením tepla a páry na 100 °C. Následuje pozvolné zvyšování teploty na 130 °C, během něhož dochází k sušení dřeva na téměř 0% vlhkost. Časová náročnost této fáze je 24 až 48 hodin. Ta závisí především na dřevině, počáteční vlhkosti dřeva a rozměrech sušeného dřeva.

Ve druhé fázi se teplota zvyšuje na 185 až 215 °C a teplota zůstává konstantní po dobu dvou až tří hodin. Výška teploty a čas působení jsou dány požadavky na klasifikační třídu termodřeva (Thermo-S, Thermo-D).

Vstupní surovinou pro tento proces může být jak surové, tak i sušené dřevo. Avšak od vstupní suroviny se odvíjejí parametry použité při procesu. Tento proces je vhodný pro tvrdé i měkké dřeviny, nicméně proces musí být prováděn pro každý druh zvlášť. Jako vstupní surovina se nejvíce používá borovice, smrk, bříza a osika, ale v zásadě může být tepelně ošetřena jakákoliv dřevina.

ThermoWood má dvě standardní třídy ošetření a nazývá je Thermo-S a Thermo-D. Obě třídy se od sebe liší parametry použitými při jejich tepelné úpravě.

Thermo-S, u kterého písmeno S značí stabilitu (stability), má mírnější parametry modifikace. Teplota zpracování dosahuje maximálně 185 až 190 °C, dle druhu dřeviny. U měkkých dřeviny, jako je borovice a smrk, se zlepšuje převážně rozměrová stabilita, povětrnostní odolnost a dochází k barevné změně dřeva. U tvrdých dřevin, jako je bříza a osika, se zlepšuje rozměrová stabilita a mění se odstín dřeva (hnědne). Využití takto upraveného dřeva najdeme u nábytku, saun, podlah, dveří a oken.

Thermo-D, kde D značí trvanlivost (durability) a podmínky modifikace jsou intenzivnější. Dochází k rozsáhlejší chemickým změnám ve dřevě. Teplota při tepelné úpravě dosahuje 200 až 212 °C. Dochází ke zlepšení tvarové stability, odolnosti proti povětrnostním vlivům, ale na úkor toho se dřevo stává méně pevné v ohybu. Uplatnění se nachází při výrobě zahradního nábytku, obkladů, vnějších dveří, vybavení koupelen a saun, podlah a ekologických staveb. (Reinprecht & Vidholdová, 2008; ThermoWood Handbook, 2003)

### ***Změna struktury a chemické reakce ve dřevě***

Při termické úpravě dřeva se vlivem zvýšené teploty mění struktura dřeva a jeho chemické složení. Tím dochází k trvalým změnám chemických, fyzikálních a mechanických vlastností. Už při teplotě 110 °C dochází ke zlepšení rozměrové stability dřeva, ale významné změny ve struktuře dřeva nastávají při teplotách 180 až 280 °C. Dochází převážně ke změnám v molekulární

strukturu dřeva, které se projevují v jeho vlastnostech, jakými jsou biodegradabilita, hygroskopicitata, rozměrová stabilita, pevnost a další. Typ a rozsah změn ve struktuře je ovlivněn teplotou a celkovými podmínkami prostředí při termické úpravě. Teplota a podmínky termické úpravy jsou ovlivněny druhem dřeviny, vlhkostí vstupní suroviny a tím, zda se tepelná úprava uskutečňuje v prostředí se vzduchem nebo bez přístupu vzduchu (inertní prostředí).

Dřevo je složeno ze tří hlavních složek, a to z celulózy, hemicelulózy a ligninu. Celulóza a lignin se odbourávají za působení tepla pomaleji než hemicelulóza. Při nízkých teplotách (20-150 °C) se dřevo suší a ztrácí vodu (volnou a vázanou) a nedochází k výrazným změnám v chemické struktuře dřeva. K výraznějším chemickým změnám dochází při působení teploty 150 – 170 °C.

Hemicelulóza se rozkládá jako první z důvodu nižšího podílu krystalické části, nižšího polymeračního stupně a rozvětvené struktury. V první řadě dochází k deacetylaci za vzniku kyseliny octové, která působí jako katalyzátor a zvyšuje polysacharidový rozklad. Degradace vede ke tvorbě formaldehydu, furfuralu a dalších aldehydů. Degradaci hemicelulózy se zároveň snižuje počet hydroxylových skupin, což má za následek pokles rovnovážné vlhkosti dřeva.

Celulóza je tepelnou úpravou ovlivněna méně kvůli své krystalické povaze. Z důvodu degradace amorfní části celulózy se krystalinita celulózy zvyšuje, což vede ke snížení dostupnosti hydroxylových skupin a tím pádem ke snížení rovnovážné vlhkosti dřeva. Teplota rozkladu celulózy se udává v rozmezí 240 až 350 °C.

Lignin má ze všech složek dřeva nejlepší schopnost odolávat teple. Při přesáhnutí teploty 200 °C začínají praskat etherové vazby a k jeho rozkladu dochází při teplotách 300 – 400 °C.

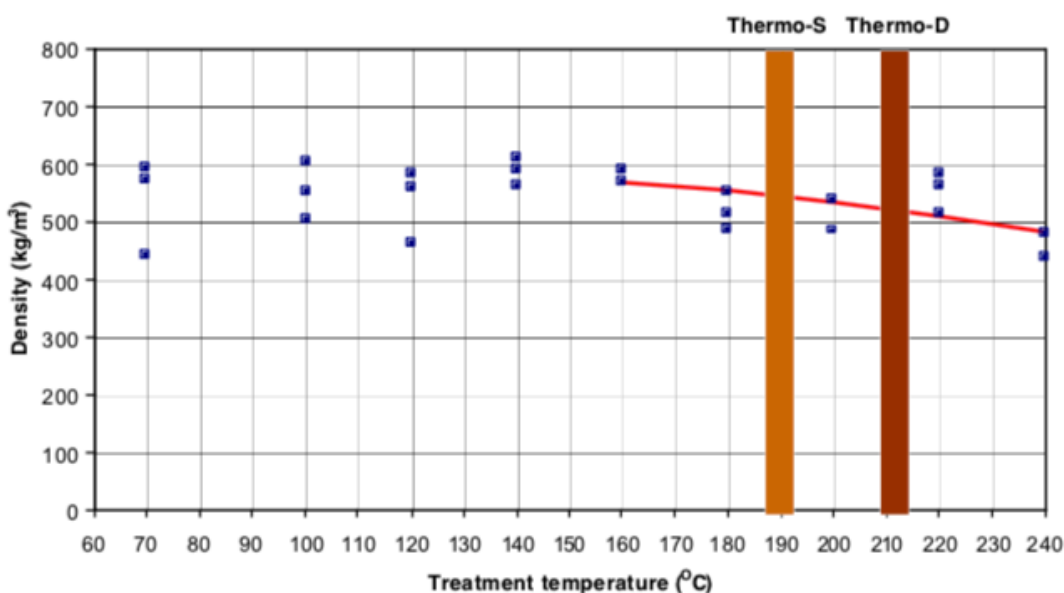
Většina extraktivních látek se během tepelného zpracování vypaří.

Všeobecně platí, že listnaté dřeviny s menším podílem ligninu se termickými reakcemi modifikují intenzivněji už při nižších teplotách. Příčinou snazšího termického narušení listnatých dřevin je snazší narušení pentóz (xylanu) v porovnání s hexózy, které mají jehličnaté dřeviny. Tento fakt je jeden z důvodů, proč se při výrobě termodřeva z jehličnatých dřevin používá vyšší teplota. (Esteves, 2009; Reinprecht & Vidholdová, 2008; Reinprecht, 2016; ThermoWood Handbook, 2003)

## Změna fyzikálních vlastností

### Hustota

ThermoWood má nižší hustotu než dřevo tepelně neupravené. To je dáno především ztrátou hmotnosti vzorku během úpravy. Dřevo ztrácí hmotnost z důvodu odpařování vody a těkavých extrakčních látek. Čím vyšší teplota je použita při termické úpravě, tím je výsledná hustota nižší (Obrázek 7). Při stejných parametrech úpravy vykazují vyšší hmotnostní ztrátu tvrdé dřeviny než dřeviny měkké. (Esteves, 2009; Hill, 2006; ThermoWood Handbook, 2003)



Obrázek 7. Vliv teploty tepelné úpravy na hustotu, Treatment temperature - teplota úpravy [°C], Density - hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] (ThermoWood Handbook, 2003)

### Rovnovážná vlhkost

Snížení rovnovážné vlhkosti je hlavním účinkem tepelného zpracování. Tepelná úprava dřeva zřetelně snižuje rovnovážný obsah vlhkosti dřeva a při vysokých teplotách (220 °C) je rovnovážná vlhkost dřeva snížena přibližně o 50 % oproti neupravenému dřevu. Zlepšení rovnovážné vlhkosti závisí na dřevině, teplotě, délce a typu ošetření. Minimální teplota potřebná ke snížení rovnovážné vlhkosti u borovice je už 100 °C. Minimální teplota se mění podle dřeviny. Například u dubu se udává minimální teplota 130 °C. Důvodem poklesu rovnovážné vlhkosti je snížení hydroxylových skupin v důsledku chemických změn. (Esteves, 2009; ThermoWood Handbook, 2003)

## Rozměrová stabilita

Vlivem termické úpravy dochází ke zvýšení rozměrové stability, což souvisí se snížením rovnovážné vlhkosti. Tepelné zpracování výrazně snižuje tangenciální a radiální bobtnání. Literatura udává, že vlivem termické úpravy se rozměrová stabilita může zvýšit až o 80 %. (Esteves, 2009; ThermoWood Handbook, 2003)

## Další změněné fyzikální vlastnosti

Mezi další vlastnosti zlepšené termickou úpravou dřeva řadíme odolnost vůči biotickým dřevokazným činitelům (houby, plísně, hmyz), což souvisí opět se snížením rovnovážné vlhkosti dřeva. ThermoWood se nedoporučuje dávat do kontaktu se zemí, jelikož proti měkké hnilobě nevykazuje příliš zvýšenou odolnost.

Tepelná úprava dřeva má za následek tmavnutí dřeva do hnědého odstínu. Obecně platí, že čím větší teplota a čas úpravy, tím je dřevo tmavší.

Teplotní vodivost dřeva po termické úpravě je přibližně o 20 až 25 % nižší. Dochází též ke změně akustických vlastností, kde se při nižších teplotách tepelné úpravy akustické vlastnosti podobají akustickým vlastnostem dřeva dlouho skladovaného, což lze využít v hudebním průmyslu. (Esteves, 2009; Reinprecht & Vidholdová, 2008; ThermoWood Handbook, 2003)

## ***Změna mechanických vlastností***

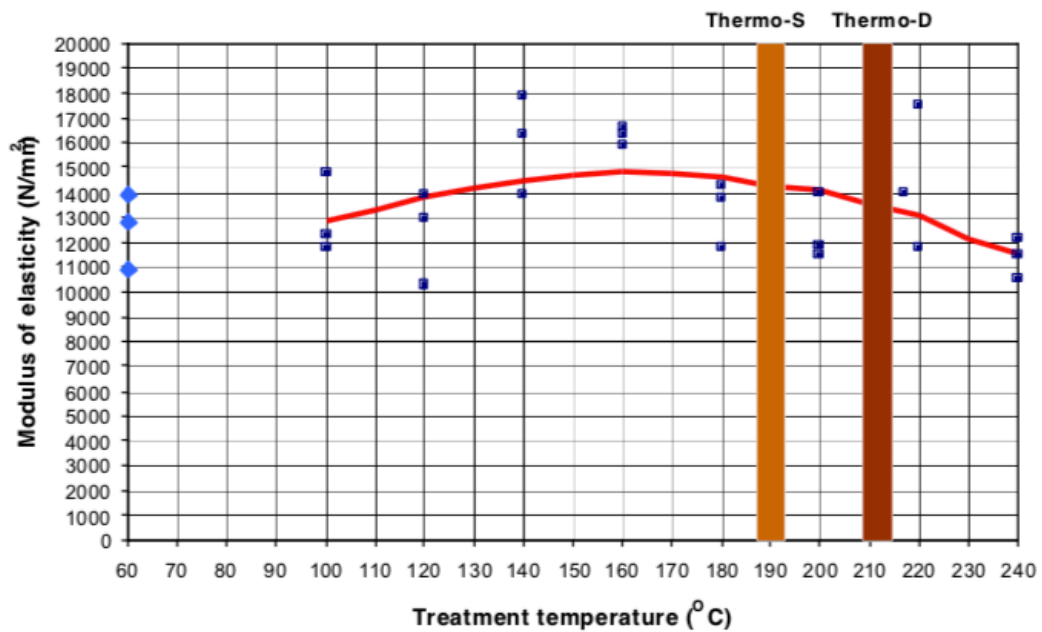
Mechanické vlastnosti materiálu jsou výrazně spjaty s hustotou a vlhkostí. Z tohoto důvodu se některé mechanické vlastnosti zhoršují, ale jiné se naopak zlepšují. Obecně můžeme říci, že zhoršené mechanické vlastnosti převyšují ty zlepšené. Snížení vlastností závisí na druhu dřeviny a podmínkách procesu.

Výzkumy ukázaly, že při jemnějších podmínkách úpravy dochází k mírnému zvýšení modulu pružnosti. Při zvyšování teploty přibližně nad 180 °C modul pružnosti začne klesat (Obrázek 8). Zvýšení modulu pružnosti je zapříčiněno zvýšením krystalinity celulózy a s poklesem vlhkosti dřeva. Při zvýšení podmínek úpravy dochází k výraznější degradaci a modul pružnosti klesá.



Ohybová pevnost tepelně upraveného dřeva klesá i při mírnějších podmínkách. Pevnost v ohybu se může při teplotě 220 °C snížit až o 50 %.

Další vlastností, která se tepelnou úpravou zhoršuje je rázová houževnatost. Při testování smrku, který byl ošetřen po dobu tří hodin při 220 °C, bylo zjištěno, že rázovou houževnatost se u něho snížila o 25 %. (Esteves, 2009; Reinprecht & Vidholdová, 2008; ThermoWood Handbook, 2003)

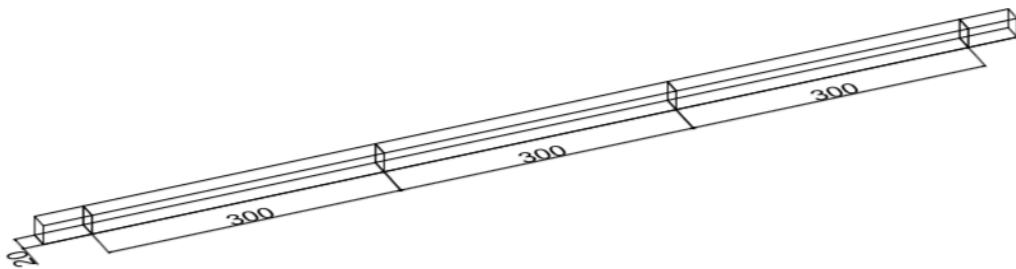


Obrázek 8. Vliv teploty tepelné úpravy na modul pružnosti, Treatment temperature - teplota úpravy [°C], Modulus of elasticity - modul pružnosti [MPa] (ThermoWood Handbook, 2003)

## 4. Metodika

### 4.1. Příprava vzorků

Testovaný materiál dřeva břízy bělokoré (*Betula pendula*) pochází ze Školního lesního podniku České zemědělské univerzity v Praze, který se nachází v Kostelci nad Černými lesy. Bylo vybráno 8 stromů ze 4 různých lokalit, ze kterých vzniklo pro stanovení dynamického modulu pružnosti 237 lišt o rozměrech 20 x 20 x 1000 mm (Obrázek 9). Tyto lišty byly příčně rozděleny na zkušební vzorky o rozměrech 20 x 20 x 300 mm. Takto zvolený systém zaručil zachování podélné paralelnosti vzorků v sadě dle stupně úpravy. Z jedné lišty tedy vznikly 3 vzorky, které byly rozděleny do tří sad podle následné termické úpravy. Třetinu vzorků (237) nebyla tepelně upravena. Zbylé dvě třetiny vzorků prošly termickou úpravou při teplotách 170 °C a 190 °C. Celkový počet zkoumaných vzorků byl 711. Z lišt zbylo 100 mm materiálu, ze kterého se vyrobily vzorky o rozměrech 20 x 20 x 30 mm pro stanovení vlhkosti.



Obrázek 9. Lišta o rozměrech 20x20x1000 mm (autor)

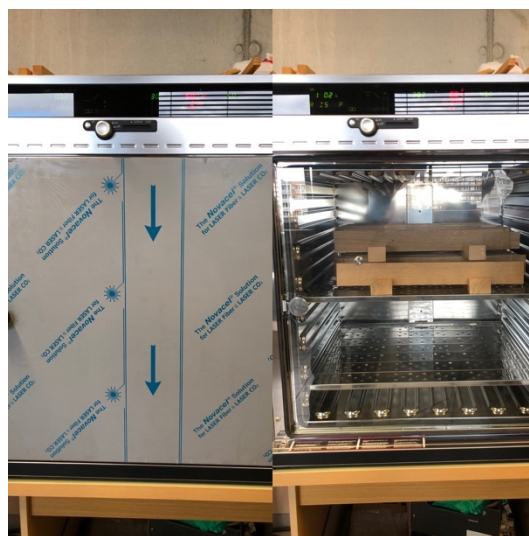
### 4.2. Klimatizování a termická úprava vzorků

Všechny vzorky byly klimatizovány v klimatizační komoře Climacell 707 (GMT Medical Technology s.r.o., Brno, Česká republika) při teplotě  $20 \pm 2$  °C a při relativní vlhkosti vzduchu  $65 \pm 5$  %. Třetina vzorků se termicky neupravovala a vzorky v této sadě byly považovány za referenční. Druhá třetina vzorků se termicky upravila ve vysokoteplotní komoře při teplotě 170 °C a poslední třetina byla vystavena teplotě 190 °C s délkou vrcholové fáze tří hodin. K tepelné úpravě vzorků docházelo ve vysokoteplotní komoře KHT (Katres, Jihlava, Česká republika) ve výzkumném středisku Truba v Kostelci nad Černými lesy podle finské metody termické modifikace dřeva ThermoWood (Obrázek 10). Jako vlhčící médium byl místo páry použit rozprašovač vody. Po

ukončení termických úprav byly všechny vzorky opět klimatizovány při teplotě  $20\pm 2$  °C a při relativní vlhkosti vzduchu  $65\pm 5$  % až do doby, kdy dosáhly rovnovážné vlhkosti (jejich hmotnost se přestala měnit). V těchto podmínkách byly vzorky udržovány v laboratořích, které se nacházejí na Fakultě lesnické a dřevařské České zemědělské univerzity v Praze, pomocí klimatizační komory od firmy Memmert (Obrázek 10).



Obrázek 11. Vysokoteplotní komora Katres (autor)



Obrázek 10. Klimatizační komora Memmert (autor)

### 4.3. Měření fyzikálních a mechanických vlastností

Veškeré měření probíhalo v laboratořích Fakulty lesnické a dřevařské České zemědělské univerzity v Praze a bylo v souladu s českými technickými normami. V případě měření dynamického modulu pružnosti se postupovalo podle manuálu Fakopp. Všechny vlastnosti byly měřeny na klimatizovaných vzorcích.

#### 4.3.1. Stanovení hustoty

Stanovení hustoty probíhalo dle normy ČSN 49 0108. Stanovení hustoty probíhalo na všech vzorcích pro stanovení  $MOE_{dyn}$  (711). Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, hustota je definována jako podíl hmotnosti a objemu dřeva při určité vlhkosti. Pro stanovení hmotnosti vzorků byla použita digitální váha s přesností 0,01 g. Objem kvádrových vzorku byl stanoven vynásobením rozměrů stran ( $h \times \check{s} \times l$ ). Příčné rozměry vzorku byly měřeny digitálním posuvným

měřítkem s přesností 0,01 mm. Podélné rozměry byly stanoveny pomocí pravítka s přesností 1 mm. Vzorec pro stanovení hustoty je:

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

kde,

$\rho_w$  – hustota dřeva při vlhkosti  $w$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$m_w$  – hmotnost dřeva při vlhkosti  $w$  [kg],

$V_w$  – objem dřeva při vlhkosti  $w$  [ $\text{m}^3$ ].

(ČSN 49 0108)

#### 4.3.2. Stanovení vlhkosti

Stanovení vlhkosti bylo provedeno dle normy ČSN 49 0103. Klimatizované vzorky o rozměrech 20 x 20 x 30 mm byly jednotlivě zváženy na digitální váze s přesností 0,01 g a následně vloženy do sušárny, kde byly vysušeny při teplotě  $103\pm 2$  °C do absolutně suchého stavu ( $w = 0$  %). Tento stav se pozná tak, že hmotnost vzorku přestane klesat. Následovalo opětovné zvážení vzorků a dosazení hodnot do vzorce.

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

kde,

$w_{\text{abs}}$  – absolutní vlhkost [%],

$m_w$  – hmotnost vlhkého dřeva [kg],

$m_0$  – hmotnost absolutně suchého dřeva [kg].

(ČSN 49 0103)

#### 4.3.3. Stanovení dynamického modulu pružnosti

Jelikož pro stanovení dynamického modulu pružnosti neexistuje žádná norma, postupuje se dle příručky Fakopp ultrasonic timer. Stanovení dynamického modulu pružnosti probíhalo pomocí přístroje Fakopp ultrasonic timer na vzorcích o rozměrech 20 x 20 x 300 mm (Obrázek 12). Tento přístroj

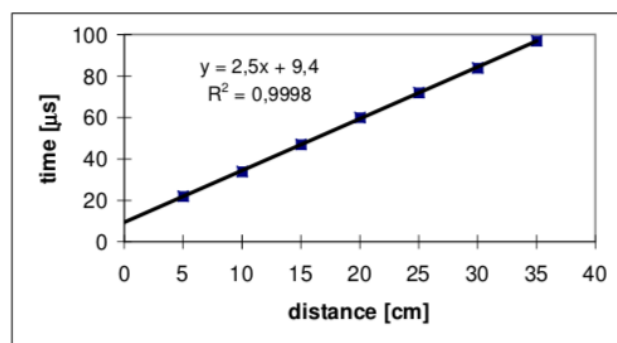
měří rychlost průchodu ultrazvukových vln dřevem, která je potřebná pro výpočet dynamického modulu pružnosti.

Princip měření spočívá v přiložení dvou totožných sond na měřený materiál. V našem případě byly sondy přitisknuty na radiální plochu a díky tomu byla měřena rychlost ultrazvukových vln v podélném směru. První sonda vysílá ultrazvukový impuls a druhá sonda impuls chytá. V okamžiku, kdy druhá sonda přijme impuls, na displeji se ukáže čas průchodu vlny v mikrosekundách. Jelikož naměřený čas zahrnuje i průchod samotným přístrojem a sondami je zapotřebí určit korekci.



Obrázek 12. Fakopp ultrasonic timer (autor)

Metoda zjišťování korekce spočívá v měření rychlosti šíření ultrazvukových vln v pěti vzdálenostech. Měří se čas průchodu vln ve vzdálenosti 60, 100, 140, 180 a 220 mm. Jsou dvě možnosti zjištění korekce z naměřených hodnot. Dle uživatelské příručky Fakopp se naměřené časy v závislosti na vzdálenosti zanesou do grafu a následně je body proložena přímka. Z rovnice přímky se zjistí korekce (Obrázek 13). Jelikož tato metoda je v případě 711 vzorků velice pracná, dá se použít druhá metoda, která spočívá v použití funkce Intercept v programu MS Excel.



Obrázek 13. Graf pro stanovení korekce, time - čas ( $\mu s$ ), distance - vzdálenost [cm] (Fakopp ultrasonic timer user's guide)

Rychlost průchodu ultrazvukových vln vzorkem se vypočítá dle vzorce:

$$c = \frac{d}{t - k} \quad [\text{m.s}^{-1}],$$

kde,

$c$  – rychlost průchodu ultrazvukových vln [ $\text{m.s}^{-1}$ ],

$d$  – vzdálenost sond od sebe [m],

$t$  – čas průchodu ultrazvukových vln [s],

$k$  – korekce [s].

(Fakopp ultrasonic timer user's guide)

Šíření zvuku ve dřevě v podélném směru je definováno vztahem:

$$c_{II} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [\text{m.s}^{-1}],$$

kde,

$c_{II}$  – rychlost šíření zvuku v podélném směru [ $\text{m.s}^{-1}$ ],

$E$  – Youngův modul pružnosti [Pa],

$\rho$  – hustota [ $\text{kg.m}^{-3}$ ].

Tento vztah lze pomocí jednoduchých matematických operací upravit pro výpočet dynamického modulu pružnosti na tvar:

$$E_{dyn} = c^2 \cdot \rho \quad [\text{Pa}],$$

kde,

$E_{dyn}$  – dynamický modul pružnosti [Pa],

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

$\rho$  – hustota [ $\text{kg.m}^{-3}$ ].

(Matovič, 1993)

#### **4.3.4. Vyhodnocování výsledků**

Pro zápis naměřených hodnot a pro výpočet potřebných veličin byl použit program Excel společnosti Microsoft. Grafy byly vytvořeny v programu Statistica společnosti TIBCO. V programu Statistica byla pro statistickou analýzu použita jednofaktorová analýza ANOVA, která umožnila pomocí grafů a výpočtů porovnat vlastnosti různě upravených vzorků a určit významnost jednotlivých faktorů. Všechny analýzy byly hodnoceny na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

## 5. Výsledky a diskuze

Výsledky měření a vypočtené hodnoty jsou v této kapitole uvedeny v textové, tabelární a grafické podobě. Tabelární podoba nabízí přehled naměřených hodnot vyjádřených průměrem, směrodatnou odchylkou a variačním koeficientem (Tabulka 1). Výsledky znázorněné v grafické podobě nabídnou jednoduchý přehled změn měřených vlastností, neboli přehled toho, k jakým změnám během termické úpravy došlo. Všechny uvedené grafy byly vypracované počítačovým programem Statistica (Tibco, USA), kde byla použita jednofaktorová analýza ANOVA. Všechny analýzy byly hodnoceny na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Tabelární vyhodnocení probíhalo též v programu Statistica a v programu Microsoft Excel (Microsoft, USA). K porovnání závislostí zkoumaných vlastností byly použity v programu Statistica grafy lineární regrese. Program zároveň vypočetl rovnici přímky, korelační koeficient, koeficient determinace a statistickou významnost. Naměřené hodnoty byly porovnány s dostupnými hodnotami v literatuře.

Tabulka 1. Naměřené základní statistické údaje, REF - referenční sada vzorků, 170 - sada upravena při teplotě 170 °C, 190, sada upravená při teplotě 190 °C

Vlastnost	Stupeň termické úpravy	Průměr	Směrodatná odchylka	Variační koeficient [%]
Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	REF	663	48	7,3
	170	650	53	8,2
	190	635	56	8,8
Vlhkost [%]	REF	12,6	0,3	2,0
	170	10,9	0,4	3,8
	190	9,6	0,7	7,2
Dynamický modul pružnosti [MPa]	REF	14316	4230	29,5
	170	15339	4968	32,4
	190	14140	3373	23,9



## 5.1. Hustota

V literatuře se hustota břízy bělokoré při vlhkosti 12 % udává v rozmezí 620 až 673 kg.m<sup>-3</sup>. Tsoumis (1991) dokonce udává hodnotu 730 kg.m<sup>-3</sup>, ale zároveň upozorňuje, že uvedené hodnoty jsou v rozmezí 12 - 15% vlhkosti. Vybrané hodnoty z literatury jsou znázorněny v tabulce (Tabulka 2). V této práci byla naměřená průměrná hustota referenční sady vzorků 663 kg.m<sup>-3</sup> (Tabulka 3), což odpovídá údajům v literatuře.

Tabulka 2. Hustoty břízy uvedené v literatuře

	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]
<b>Desch &amp; Dinwoodie (1996)</b>	620
<b>Lexa et al. (1952)</b>	640
<b>Zeidler &amp; Borůvka (2016)</b>	673

Tabulka 3. Naměřená hustota

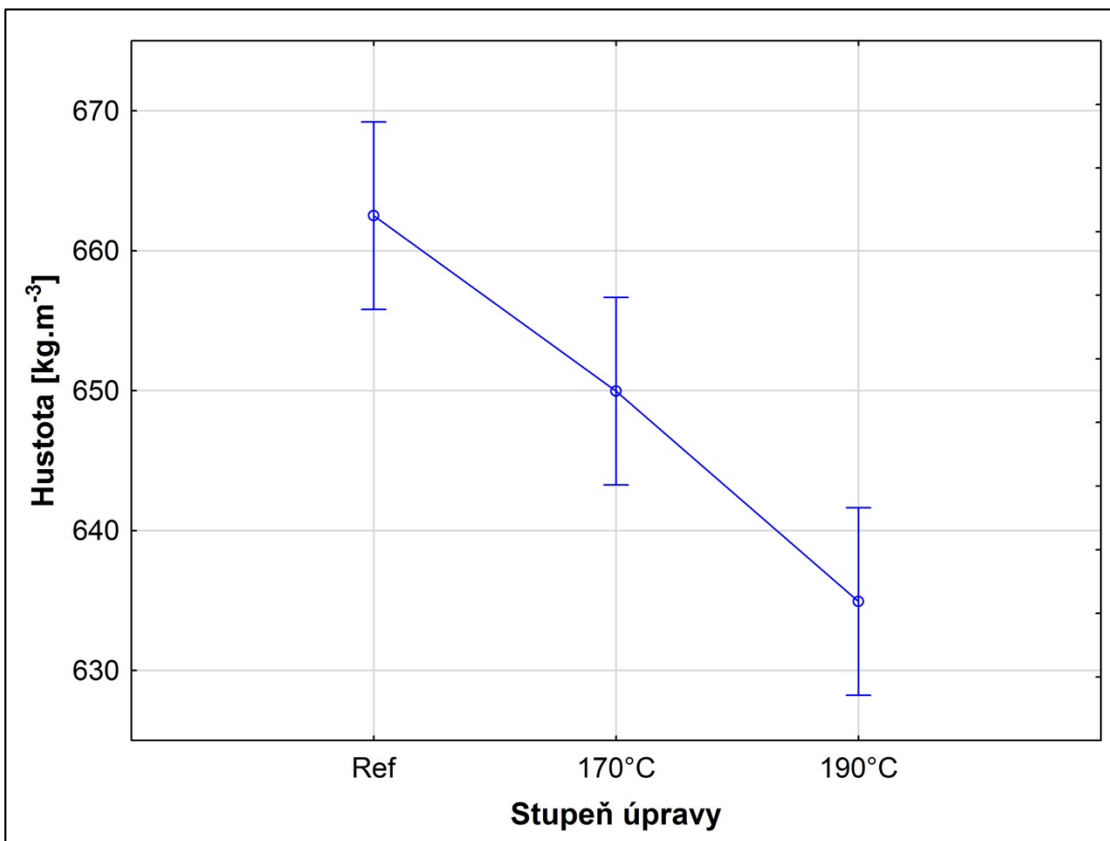
Vlastnost	Stupeň úpravy	Průměr	Směrodatná odchylka	Variační koeficient [%]
<b>Hustota [kg.m<sup>-3</sup>]</b>	REF	663	48	7,3
	170	650	53	8,2
	190	635	56	8,8

Z naměřených hodnot je patrné, že vlivem termické úpravy došlo k poklesu hustoty (Graf 1). Tento fakt potvrzuje i odborná literatura (Reinprecht & Vidholdová, 2008; ThermoWood Handbook, 2003). Pokles hustoty při termické úpravě je zapříčiněn poklesem hmotnosti upravovaného dřeva. Pokles hmotnosti je vyšší než rozměrová změna vzorků, z čehož vyplývá snížení hustoty. Hmotnost se snižuje z důvodu odpařování vázané vody a extrakčních látek ve dřevě a její snižování je závislé na teplotě a časové délce úpravy. (Hill, 2006; LunaWood, 2011; Reinprecht, 2008)

Vlivem termické úpravy vzorků při teplotě 170 °C došlo k poklesu hustoty z referenční hodnoty o 1,9 %. V případě termické úpravy při teplotě 190 °C došlo k poklesu o 4,2 % oproti referenční sadě (Tabulka 4).

Tabulka 4. Změna hustoty termicky upravených vzorků oproti referenční sadě [%]

	170/REF	190/REF
<b>Hustota</b>	- 1,9	- 4,2



Graf 1. Vliv termické úpravy na hustotu

Pomocí Duncanova testu se prokázal statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 0,05 mezi hustotou na vzorcích termicky upravených při teplotě 170 °C (též při teplotě 190 °C) a referenční sadou.

## 5.2. Vlhkost

Z naměřených hodnot vyplývá, že s narůstající teplotou klesá vlhkost dřeva. Literatura udává, že vlivem tepelné úpravy dochází k poklesu hygroskopicity, neboli rovnovážné vlhkosti dřeva, v závislosti na teplotě a časové délce procesu (Hill, 2006). ThermoWood Handbook (2003) udává, že termickou úpravou dřeva při teplotě 220 °C lze snížit jeho rovnovážnou vlhkost až o 50 %. Tento pokles závisí na druhu dřeviny, teplotě a časové délce zpracování (Esteves, 2009). K poklesu rovnovážné vlhkosti dřeva dochází

z důvodu odbourávání hemicelulóz a odbourávání a blokace -OH funkčních skupin (Reinprecht & Vidholdová, 2008).

Během měření došlo vlivem termické úpravy vzorků při teplotě 170 °C k poklesu rovnovážné vlhkosti o 13,5 % oproti referenční sadě vzorků. V případě tepelné úpravy teplotou 190 °C došlo k poklesu o 23,8 % oproti tepelně neupraveným vzorkům. Stejnou problematikou se zabýval i Borůvka et al. (2018), který uvádí procentuální pokles rovnovážné vlhkosti břízy upravené při teplotě 165 °C o 29 % a při teplotě 210 °C o 64 %. Naměřené hodnoty jsou pro lepší přehlednost uvedeny v tabulkách (Tabulka 5, Tabulka 6).

*Tabulka 5. Naměřená vlhkost*

Vlastnost	Stupeň úpravy	Průměr	Směrodatná odchylka	Variační koeficient [%]
Vlhkost [%]	REF	12,6	0,3	2,0
	170	10,9	0,4	3,8
	190	9,6	0,7	7,2

*Tabulka 6. Změna vlhkosti termicky upravených vzorků oproti referenční sadě [%]*

	170/REF	190/REF
Vlhkost	- 13,5	- 23,8

### 5.3. Dynamický modul pružnosti

V literatuře se modul pružnosti břízy pohybuje v rozmezí od 14000 do 16150 MPa (Tabulka 7). Je zapotřebí upozornit, že tyto hodnoty jsou hodnoty statického modulu pružnosti. Několik studií prokázalo významnou lineární korelaci mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti (Bailleres et al., 2012; Divós & Tanaka, 2005; Holeček et al., 2017; Kloiber & Kotlínová, 2006; Liu et al., 2006). Korelační koeficient je mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti udáván v rozmezí od 0,8 do 0,9 (Bailleres et al., 2012; Divós & Tanaka, 2005). Literatura udává, že hodnoty dynamického modulu pružnosti jsou obecně vyšší než hodnoty statického modulu pružnosti. Divos & Tanaka (2005) a Holeček et al. (2017) udávají, že hodnoty dynamického modulu

pružnosti jsou obecně o 10 % vyšší než u statického modulu pružnosti. Podobné údaje uvádí i Tsoumis (1991), který udává hodnoty vyšší o 10 až 15 %.

Tabulka 7. Statický modul pružnosti ( $MOE_{stat}$ ) břízy uvedený v literatuře

	$MOE_{stat}$ [MPa]
<b>Lexa et al. (1952)</b>	16500
<b>Tsoumis (1991)</b>	16170
<b>Zeidler &amp; Borůvka (2016)</b>	14000

Tabulka 8. Naměřený dynamický modul pružnosti ( $MOE_{dyn}$ )

Vlastnost	Stupeň úpravy	Průměr	Směrodatná odchylka	Variační koeficient [%]
$MOE_{dyn}$ [MPa]	REF	14316	4230	29,5
	170	15340	4968	32,4
	190	14140	3373	23,9

Naměřené hodnoty odpovídají hodnotám, které uvádí Zeidler & Borůvka (2016), ale jelikož uvedené hodnoty jsou pro statický modul pružnosti, tak nemohu potvrdit tvrzení, že dynamický modul pružnosti je o 10 až 15 % vyšší než  $MOE_{stat}$ . To může být způsobeno heterogenitou dřeva a výskytem vad na měřených vzorcích (suky, trhliny). Dále může hrát roli i rozdílná hustota (Tabulka 2), jelikož hustota ovlivňuje modul pružnosti (Kloiber & Kotlínová, 2006).

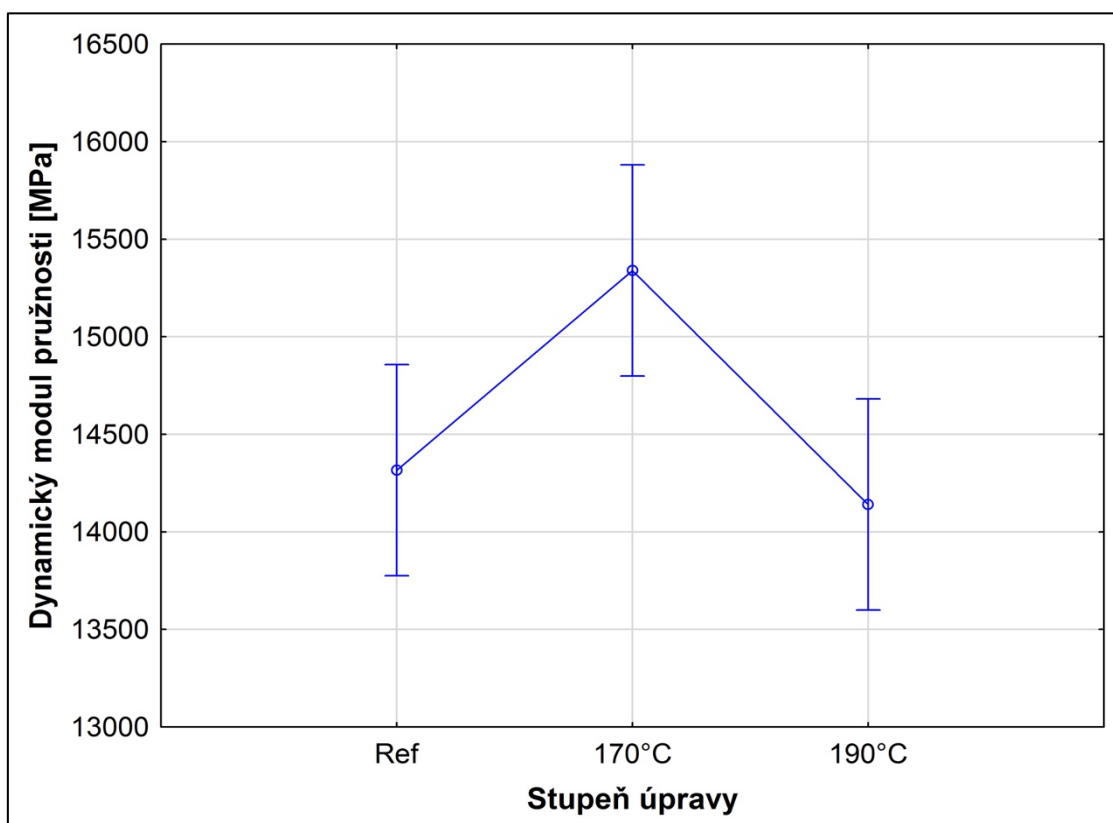
Z naměřených hodnot je patrné, že termickým zpracováním při teplotě 170 °C, došlo k nárůstu dynamického modulu pružnosti (Tabulka 8, Graf 2). Tento nárůst je způsoben snížením vlhkosti dřeva, což má za následek zlepšení mechanických vlastností (Hill, 2006; Holeček et al., 2017; Reinprecht, 2008). Při vyšších teplotách zpracování dochází k výraznému poklesu  $MOE_{dyn}$  (Hill, 2006; ThermoWood Handbook, 2003), což potvrzují i naměřené hodnoty. Tento pokles je způsoben chemickými změnami ve dřevě, které převyšují pozitivní vliv nižší vlhkosti (Borůvka et al., 2018; Holeček et al., 2017). V uskutečněném měření došlo k nárůstu  $MOE_{dyn}$  tepelně zpracovaného dřeva při teplotě 170 °C o 7,2 % oproti tepelně neupraveným vzorkům. V případě tepelné úpravy při

teplotě 190 °C byl zaznamenán pokles  $MOE_{dyn}$  o 1,2 % oproti referenční sadě (Tabulka 9).

Tabulka 9. Změna dynamického modulu pružnosti termicky upravených vzorků oproti referenční sadě [%]

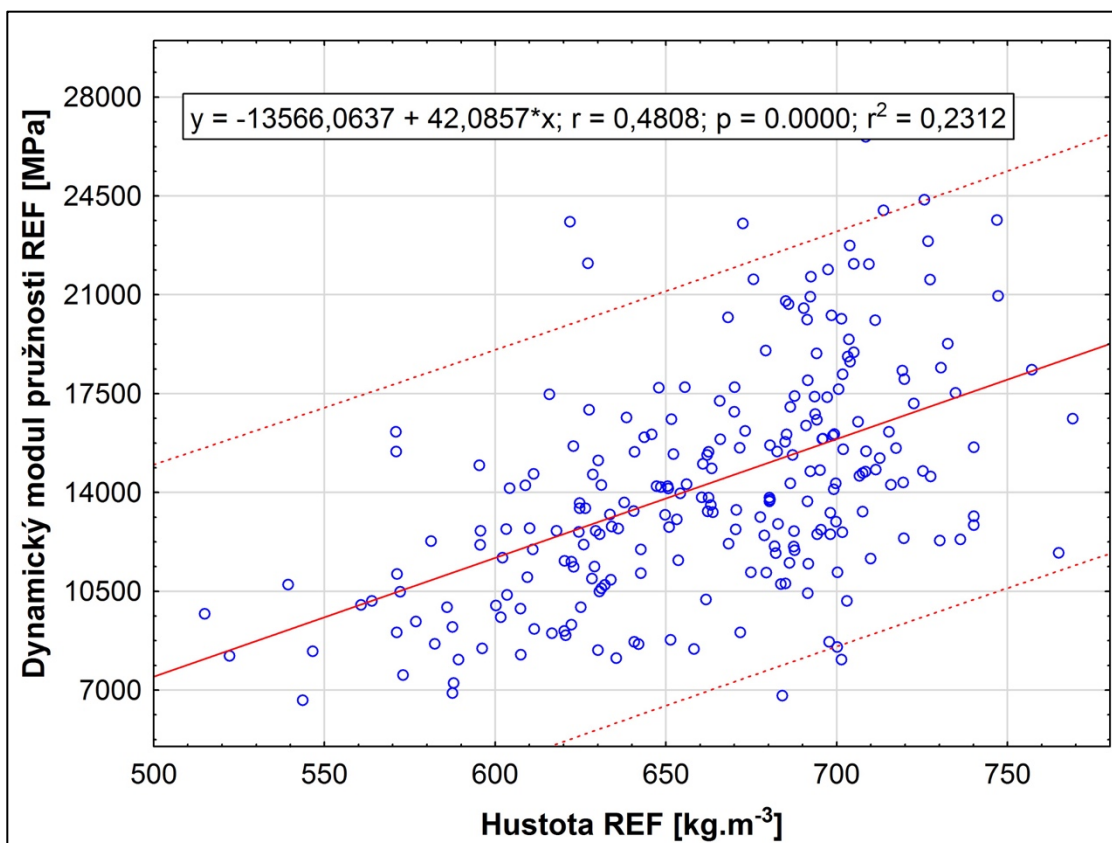
	170/REF	190/REF
$MOE_{dyn}$	+ 7,2	- 1,2

Pomocí Duncanova testu se prokázal statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 0,05 mezi dynamickým modulem pružnosti na vzorcích upravených při teplotě 170 °C a referenční sadou. V případě dynamického modulu pružnosti upravených vzorků při teplotě 190 °C a vzorků referenční sady se statisticky významný rozdíl neprokázal (Příloha 2).



Graf 2. Vliv termické úpravy na dynamický modul pružnosti

Ve vztahu dynamického modulu pružnosti s hustotou byla prokázána mírná závislost. To znamená, že se s narůstající hustotou zvyšuje  $MOE_{dyn}$ . Koeficient korelace v případě  $MOE_{dyn}$  a hustoty referenční sady byl stanoven na hodnotu  $r = 0,48$  (Graf 3).



Graf 3. Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a hustotou u referenční sady vzorků

V případě dynamického modulu pružnosti a hustoty termicky upraveného dřeva při teplotě 170 °C byla též prokázána mírná korelační závislost  $r = 0,49$  (Příloha 3). V případě dřeva upraveného při teplotě 190 °C byla hodnota korelační závislosti  $r = 0,53$  (Příloha 4). Korelační závislost MOE a hustoty potvrzuje i Heräjärvi (2004).

Tabulka 10. Změny vlastností termicky upraveného dřeva v porovnání s referenční sadou [%]

	170/REF	190/REF
<b>Hustota</b>	- 1,9	- 4,2
<b>Vlhkost</b>	- 13,5	- 23,8
<b>MOE<sub>dyn</sub></b>	+ 7,2	- 1,2

## 6. Závěr

V této práci byl prokázán vliv termické úpravy na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Velikost změn závisí na teplotě a časové délce termické úpravy, které je dřevo vystaveno. První zkoumanou vlastností byla hustota, která se vlivem termické modifikace snižovala. Při teplotě 170 °C byl pokles hustoty oproti termicky neupraveným vzorkům 1,9 % a při teplotě 190 °C se hustota snížila o 4,2 %. Rozdíl mezi hustotou na vzorcích upravených při teplotě 170 °C, též při teplotě 190 °C a referenční sadou byl statisticky významný na hladině významnosti 0,05. V případě druhé zkoumané vlastnosti (vlhkosti) došlo v obou případech ke snížení rovnovážné vlhkosti dřeva. Při teplotě 170 °C došlo k poklesu o 13,5 %, při teplotě 190 °C byl pokles 23,8 % oproti referenční sadě. Pokles rovnovážné vlhkosti chrání dřevo proti biotickým činitelům, jako jsou plísně, houby a hmyz. Tohoto vylepšení můžeme využít především při použití dřeva v exteriéru, kde nemodifikované dřevo bez využití ochrany má nižší životnost. Hlavní zkoumanou vlastností v této bakalářské práci je dynamický modul pružnosti. V případě termické úpravy při teplotě 170 °C došlo k nárůstu tohoto modulu pružnosti o 7,2 %. K tomuto nárůstu došlo z důvodu poklesu vlhkosti dřeva, což má za následek zvýšení mechanických vlastností. Při této teplotě nedochází k výrazným chemickým a strukturálním změnám ve dřevě a převažuje zde pozitivní vliv snížené vlhkosti. Ve druhém případě (úprava při teplotě 190 °C) došlo k výraznému poklesu dynamického modulu pružnosti oproti naměřené hodnotě při teplotě 170 °C. Došlo i k poklesu oproti referenční sadě o 1,2 %, ale tato změna se neukázala jako statisticky významná na hladině významnosti 0,05.

Výsledky ukazují, že termicky modifikované dřevo při teplotě 170 °C se stává vhodnějším materiálem pro použití v exteriéru i v interiéru, kde je zapotřebí dřevo se sníženou rovnovážnou vlhkostí bez výrazného snížení mechanických vlastností. Je tedy vhodné na výrobu nábytku, vybavení koupelen, saun, pergol, teras, plotů a mnoho dalšího. V případě úpravy při teplotě 190 °C je dřevu výrazněji snížena relativní vlhkost a dochází i k snížení mechanických vlastností. Takový materiál je vhodný použít do expozic, které nebudou mechanicky namáhány, jako jsou například fasády domů a ploty.

Jelikož zastoupení břízy na našem území je malé, nemůžeme v blízké době očekávat nárůst využívání této dřeviny, i když by to stálo za úvahu. Severské národy si jsou vědomy kvality břízy, a proto tuto dřevinu využívají v mnohem větší míře. Používají ji, díky vysokému modulu pružnosti, především do středové části překližkových desek.

Práce přinesla základní charakteristiku termicky upraveného dřeva, i když byla zaměřena pouze na dynamický modul pružnosti. Jelikož je v současnosti využívání a zkoumání termodřeva velice aktuální, může se má práce zařadit mezi práce, které tuto modifikaci zkoumají a rozšířit tak povědomí o termicky upraveném dřevě a jeho využití.



## 7. Použité zdroje

### Literatura

BORŮVKA, V.; BABIAK, M. Vlastnosti dřeva v příkladech. 1. vydání. Praha : Česká zemědělská univerzita, 2016. 139 s. ISBN 978-80-213-2618-7.

DESCH, H. E.; DINWOODIE, J. M. Timber – Structure, Properties, Conversion and Use. 7. vydání. Londýn : Macmillan Press Ltd, 1996. 306 s. ISBN 0-333-60905-0

GANDELOVÁ, L.; HORÁČEK, P.; ŠLEZINGEROVÁ, J. Nauka o dřevě. 3. nezměněné vydání. Brno : Mendelova univerzita, 2014. 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

HILL, C. Wood modification – chemical, thermal and other processes. 1. vydání. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2006. 239 s. ISBN 0-470-02172-1.

HORÁČEK, P. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I.. 1. vydání. Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998. 124 s. ISBN 80-7157-347-7.

KREMER, B. P. Stromy. Praha : Euromedia Group, 2003. 288 s. ISBN 80-242-1003-7.

LEXA, J.; NEČESANÝ, V.; PACLT, J.; TESAŘOVÁ, M.; ŠTOFKO, J. Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva. Bratislava : ROH, 1952. 432 s.

MATOVIČ, A. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva. 1. vydání. Brno : Vysoká škola zemědělská, 1993. 212 s. ISBN 80-7157-086-9.

MUSIL, I.; MÖLLEROVÁ, J. Lesnická dendrologie. Praha : Česká zemědělská univerzita, 2005. 216 s. ISBN 80-213-1367-6.

POŽGAJ, A.; CHOVANEC, D.; KURJATKO, S.; BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva. 1. vydání. Bratislava : Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.

REINPRECHT, L.; Ochrana dřeva. 1. vydání. Zvolen : Technická univerzita, 2008, 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6.

REINPRECHT, L. Wood deterioration, protection and maintenance. 1. vydání. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd, 2016. 357 s. ISBN 978-1-119-10653-1.

REINPRECHT, L.; VIDHOLDOVÁ, Z. Termodrevo – příprava, vlastnosti a aplikace. 1. vydání. Zvolen : Technická univerzita, 2008. 89 s. ISBN 978-80-228-1920-6.

ŠLEZINGEROVÁ, J.; GANDELOVÁ, L. Stavba dřeva – cvičení. 2. nezměněné vydání. Brno : Mendelova univerzita, 2012. 129 s. ISBN 978-80-7375-168-5.

TSOUMIS, G. Science and technology of wood – Structure, Properties, Utilization. 1. vydání. New York : Chapman & Hall, 1991. 494 s. ISBN 0-412-07851-1.

ÚŘEDNÍČEK, L.; CHMELÁŘ, J. Dendrologie lesnická 2 část – Listnáče 1 (Angiospermae). 1. vydání dotist. Brno : Mendelova univerzita, 1998. 167 s. ISBN 80-7157-169-5.

ÚŘEDNÍČEK, L.; MADĚRA, P. A KOLEKTIV. Dřeviny České republiky. Písek : Matice lesnická, 2001. 333 s. ISBN 80-86271-09-9.

ZEIDLER, A.; BORŮVKA, V. Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin – podklady pro cvičení. 1. vydání. Praha : Česká zemědělská univerzita, 2016. 89 s. ISBN 978-80-213-2674-3

## Elektronické dokumenty

BAILLÈRES, H.; HOPEWELL, G.; BOUGHTON, G.; BRANCHERIAU, L. Strength and stiffness assessment technologies for improving grading effectiveness of radiata pine wood [online]. *BioResources*. 2012. 7(1), 1264-1282. [27. 3. 2019]. Dostupné z www: <https://doaj.org/article/b1417c71dd78426ab14e3b971580fed8>

BORŮVKA, V.; ZEIDLER, A.; HOLEČEK, T.; DUDÍK, R. Elastic and strength properties of heat-treated Beech and Birch wood [online]. *Forests*. 2018. 9(4), 197. [27. 3. 2019]. Dostupné z www: <https://www.mdpi.com/1999-4907/9/4/197>

DIVÓS, F.; TANAKA, T. Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood [online]. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*. 2005. (1), 105-110. [24. 3. 2019]. Dostupné z www: <https://doaj.org/article/d16092f1d31b4acbabaad0284757412a>

ESTEVEZ, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: a review [online]. *BioResources*. 2009, 4(1), 370-404. [15. 3. 2019]. Dostupné z www: [https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes\\_04/BioRes\\_04\\_1\\_0370\\_Estevés\\_P\\_Wood\\_Mod\\_Heat\\_Treatment\\_Rev\\_367.pdf](https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_04/BioRes_04_1_0370_Estevés_P_Wood_Mod_Heat_Treatment_Rev_367.pdf)

FAKOPP Ultrasonic timer user's guide [online]. [20. 3. 2019]. Dostupné z www: <https://fakopp.com/docs/products/ultrasonic/UltrasonicGuide.pdf>

HOLEČEK, T.; GAŠPARÍK, M.; LAGAÑA, R.; BORŮVKA, V.; OBERHOFNEROVÁ, E. Measuring the Modulus of Elasticity of Thermally Treated Spruce Wood using the Ultrasound and Resonance Methods [online]. *BioResources*. 2017, 12(1), 819-838. [18. 3. 2019]. Dostupné z www: <http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/10728>

HERÄJÄRVI, H. Variation of basic density and brinell hardness within mature finnish betula pendula and b. pubescens stems [online]. Researchgate. 2004. [22. 3. 2019]. Dostupné z www: [www.researchgate.net/publication/290762735\\_Variation\\_of\\_basic\\_density\\_and\\_Brinell\\_hardness\\_within\\_mature\\_Finnish\\_Betula\\_pendula\\_and\\_B\\_pubescens\\_stems](http://www.researchgate.net/publication/290762735_Variation_of_basic_density_and_Brinell_hardness_within_mature_Finnish_Betula_pendula_and_B_pubescens_stems)

KLOIBER, M.; KOTLÍNOVÁ, M. Porovnání dynamického a statického modulu pružnosti poškozeného dřeva [online]. Researchgate. 2006. [16. 3. 2019]. Dostupné z www: <https://www.researchgate.net/publication/267712842>

LIU, Z.; LIU, Y.; YU, H.; YUAN, J. Measurement of the dynamic modulus of elasticity of wood panels [online]. *Frontiers of Forestry in China*. 2006. 1(4), 425-430. [22. 3. 2019]. Dostupné z www: <https://search-proquest-com.ezproxy.techlib.cz/docview/214570091?pq-origsite=summon>

LunaWood. ThermoWood – Main Properties [online]. 2011. [13. 3. 2019]. Dostupné z www: <https://www.silvatimber.co.uk/media/pdfs/Thermowood/Thermowood-Main-Properties.pdf>

ThermoWood Handbook. Helsinki : Finnish ThermoWood Association, 2003. [online]. [16. 3. 2019]. Dostupné z www: <https://www.thermowood.fi/esitteet-ja-kirjat>

ZEIDLER, A. Mikroskopický atlas dřevin. Praha : Česká zemědělská univerzita, 2007. [online]. [13. 3. 2019]. Dostupné z www: [http://r.fld.czu.cz/vyzkum/multimedia/atlas\\_drev/index.html](http://r.fld.czu.cz/vyzkum/multimedia/atlas_drev/index.html)

ZEIDLER, A. Lexikon dřeva. Praha : Česká zemědělská univerzita, 2012 [online]. [12. 3. 2019]. Dostupné z www: <https://www.yumpu.com/xx/document/read/21591914/lexikon-dreva-fakulta-lesnicka-a-drevarska-ceska-zemedelska>

Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky 2017. Praha : Ministerstvo zemědělství, 2018. [online]. [10. 3. 2019] ISBN 978-80-7434-477-0. Dostupné z www: [http://eagri.cz/public/web/file/609179/Zprava\\_o\\_stavu\\_lesa\\_2017.pdf](http://eagri.cz/public/web/file/609179/Zprava_o_stavu_lesa_2017.pdf)

## **Technické normy**

ČSN 49 0103 Dřevo. Zisťovanie vlhkosti při fyzikálních a mechanických skúškách. 1979

ČSN 49 0108 Dřevo. Zisťovanie hustoty. 1993

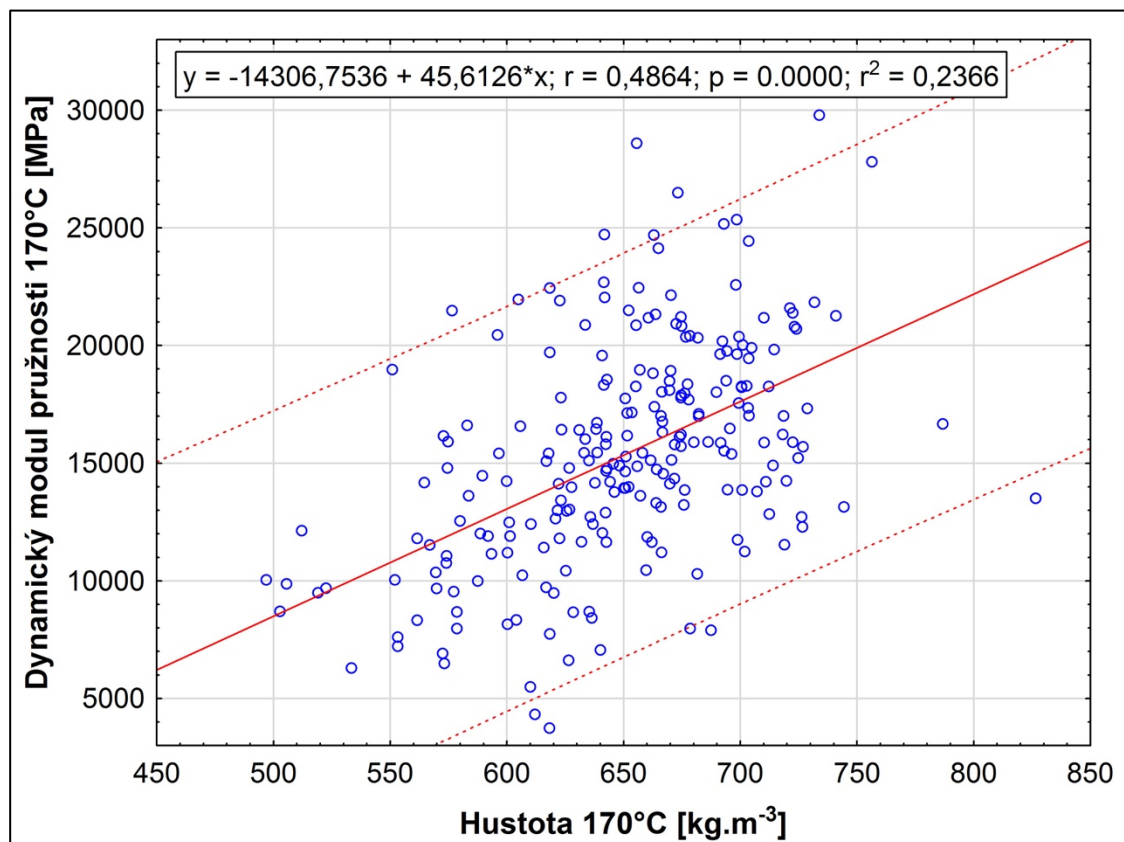
## 8. Přílohy

	REF	170 °C	190 °C
REF			
170 °C	0,009*		
190 °C	0,000*	0,002*	

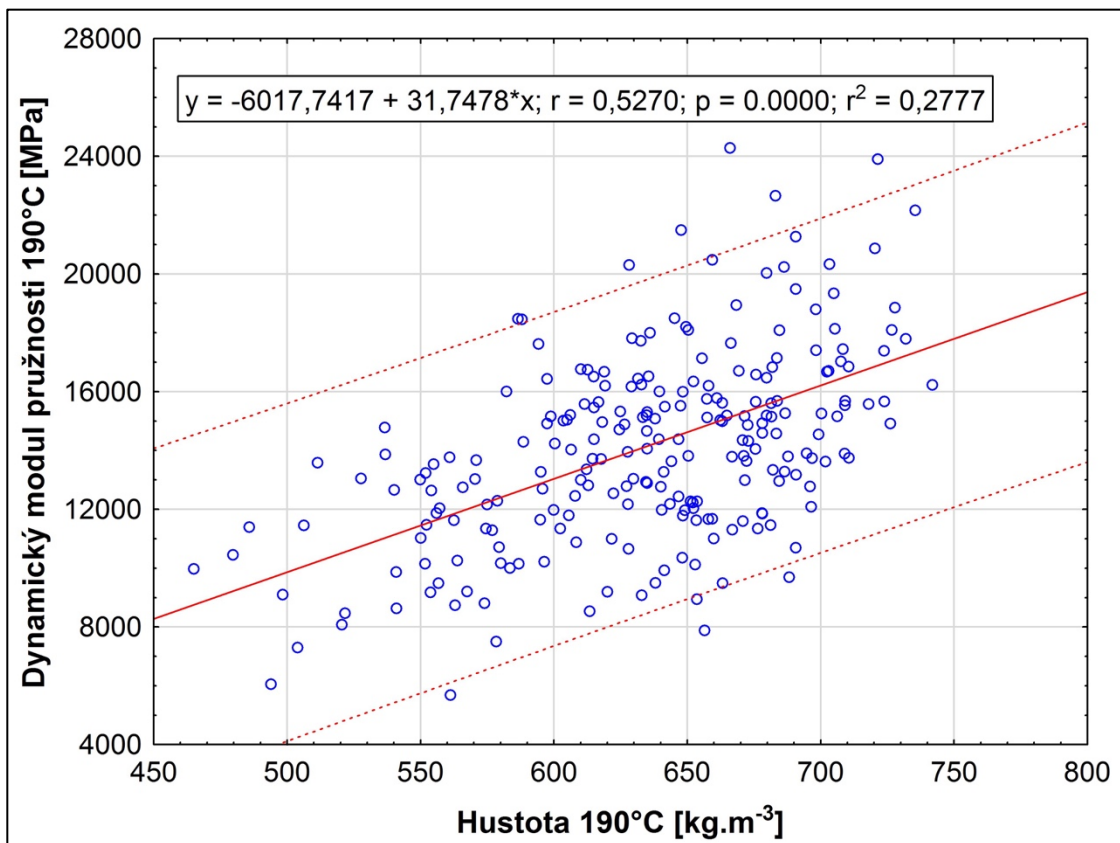
Příloha 1. Duncanův test pro závislost hustoty na stupni termické úpravy, \* statisticky významné  $p < 0,05$

	REF	170 °C	190 °C
REF			
170 °C	0,009*		
190 °C	0,651	0,003*	

Příloha 2. Duncanův test pro závislost dynamického modulu pružnosti na stupni termické úpravy, \* statisticky významné  $p < 0,05$



Příloha 3. Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a hustotou u termicky upravené sady vzorků při teplotě 170 °C.



Příloha 4. Závislost mezi dynamickým modulem pružnosti a hustotou u termicky upravené sady vzorků při teplotě 190 °C.