

# Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská  
Katedra základního zpracování dřeva



## Posouzení vlivu tepelné úpravy na pružnostní a pevnostní vlastnosti dřeva topolu

Bakalářská práce

Autor: Barbora Jelšínová  
Vedoucí práce: doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

2018

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Barbora Jelšínová

Podnikání ve dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu

Název práce

**Posouzení vlivu tepelné úpravy na pružnostní a pevnostní vlastnosti dřeva topolu**

Název anglicky

**Evaluation of Elasticity and Strength Properties of Thermally Modified Poplar Wood**

---

### Cíle práce

- 1) Zhodnotit především rázovou houževnatost, modul pružnosti a pevnost v ohybu tepelně upraveného dřeva topolu.
- 2) Posoudit vliv hustoty na hodnocené vlastnosti.
- 3) Porovnat zjištěné hodnoty s údaji v literatuře.

### Metodika

- Zpracovat literární rešerši o zkoumané dřevině, hodnocených vlastnostech a tepelné modifikaci dřeva.
- Zajistit reprezentativní vzorky dřeva topolu pro provedení zkoušek.
- Tepelně modifikovat dřevo ve dvou rozdílných stupních tepelné úpravy.
- Standardizovanými postupy na zkušebních tělesech stanovit především rázovou houževnatost, statický a dynamický modul pružnosti, pevnost v ohybu a tvrdost. Dále stanovit hustotu a posoudit její vliv na zkoumané charakteristiky.
- Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě.

**Doporučený rozsah práce**

30 – 40 stran textu

**Klíčová slova**

topol, tepelná modifikace, vlastnosti, rázová houževnatost, pevnost v ohybu, modul pružnosti

---

**Doporučené zdroje informací**

ČSN normy

KAČÍKOVÁ, D., KAČÍK, F. Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011. 71 s.

KOLLMANN, F. Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe – Erste Band. Berlin: Springer-Verlag, 1951. 1050 S.

LEXA, J., NEČESANÝ, V., PACLT, J., TESAŘOVÁ, M., ŠTOFKO, J. Technológia dreva I. – Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva. Bratislava: Práca, 1952. 436 s.

NOVÁK, V. Dřevařská technická příručka. Praha: SNTL, 1970. 748 s.

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

REINPRECHT, L. VIDHOLOVÁ, Z. Termodrevo: Thermowood. ŠMÍRA-PRINT, 2011. 89 S.

TSOUMIS G. Science and technology of wood – structure, properties, utilization. New York: Chapman and Hall, 1991. 497 s.

WAGENFÜHR, R. Holzatlas. Leipzig: Fachbuchverlag, 2000. 707 s.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2017/18 LS – FLD

**Vedoucí práce**

doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra základního zpracování dřeva

**Konzultant**

Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 24. 1. 2017

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

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 12. 2. 2018

**prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.**

Děkan

V Praze dne 15. 04. 2018

---

## Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma **Posouzení vlivu tepelné úpravy na pružnostní a pevnostní vlastnosti dřeva topolu** vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Aleše Zeidlera, Ph.D. a použila jsem jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědoma, 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 20. 4. 2018

.....  
Barbora Jelšínová

## **Poděkování**

Mnohokrát děkuji doc. Ing. Aleši Zeidlerovi, Ph.D. za odborné vedení práce. Za rady, které mi dal při psaní mé práce a za ochotu.

Dále děkuji Ing. Tomáši Holečkovi za zajištění zkušebních těles, pomoc, rady a trpělivost při měření a konzultacích. Také bych chtěla poděkovat svým blízkým za velkou emoční podporu.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce je zaměřená na vliv tepelné modifikace na vybrané mechanické vlastnosti dřeva topolu osiky a dále posuzuje vlivu těchto vlastností na jeho hustotu. Zkoušky pevnosti v ohybu, rázové houževnatosti, dynamického a statického modulu pružnosti a bobtnání jsou zkoumány na třech sériích zkušebních těles – na neupravené, tepelně upravené při 165°C a tepelně upravené při 210°C. Zjištěné výsledky jsou zaznamenány, vyhodnoceny a poté graficky a statisticky znázorněny a v diskuzi porovnány s dostupnými informacemi v literatuře.

### **Klíčová slova:**

topol, tepelná modifikace, vlastnosti, rázová houževnatost, pevnost v ohybu, modul pružnosti

## **Abstract**

This bachelor thesis focuses on the influence of thermal modification on the selected mechanical properties of aspen wood, as well as the influence of these properties on density. Strength, bending, dynamic and static modulus of elasticity and swelling were examined on three sets of test specimens - untreated, heat treated at 165°C and heat treated at 210°C. The results obtained were recorded, evaluated and then graphically and are statistically illustrated and compared with available informations.

### **Keywords:**

poplar, thermal modification, properties, toughness, flexural strength, modulus of elasticity

## Obsah

<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>2. CÍL PRÁCE.....</b>	<b>13</b>
<b>3. ROZBOR PROBLEMATIKY.....</b>	<b>14</b>
3.1. POPIS DŘEVINY - TOPOL OSIKA.....	14
3.1.1. Dendrologická charakteristika .....	14
3.1.2. Výskyt, význam .....	16
3.2. VYBRANÉ FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI .....	17
3.2.1. Hustota.....	17
3.2.2. Pórovitost dřeva.....	23
3.2.3. Vlhkost .....	23
3.2.4. Akustické vlastnosti.....	28
3.2.5. Moduly pružnosti .....	29
3.2.6. Pevnost dřeva v ohybu .....	30
3.2.7. Rázová houževnatost dřeva.....	31
3.2.8. Bobtnání a sesychání .....	32
3.3. TEPelnÉ ZPRACOVÁNÍ DŘEVA .....	35
3.3.1. ThermoWood.....	37
3.3.2. PlatoWood .....	38
3.3.3. OHT-Wood.....	39
3.3.4. Retificated-Wood .....	39
<b>4. METODIKA.....</b>	<b>40</b>
4.1. PŘÍPRAVA A ZNAČENÍ VZORKŮ .....	40
4.2. TEPelnÉ OŠETŘENÍ VZORKŮ.....	40
4.3. MĚŘENÍ .....	41
4.3.1. Hustota.....	41
4.3.2. Dynamický modul pružnosti.....	42
4.3.3. Pevnost v ohybu a statický modul pružnosti .....	43
4.3.4. Rázová houževnatost.....	44
4.3.5. Vlhkost .....	45
4.3.6. Bobtnání a sesychání .....	46
<b>5. DISKUSE A VÝSLEDKY .....</b>	<b>47</b>

5.1.	HUSTOTA.....	47
5.2.	STATICKÝ A DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI.....	48
5.3.	PEVNOST V OHYBU.....	50
5.4.	RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST.....	52
5.5.	VLHKOST.....	53
5.6.	BOBTNÁNÍ A SESYCHÁNÍ.....	54
5.7.	KORELACE VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ.....	56
5.6.1.	<i>Hustota – pevnost v ohybu.....</i>	<i>56</i>
5.6.3.	<i>Hustota – rázová houževnatost.....</i>	<i>57</i>
5.6.4.	<i>Hustota – statický modul pružnosti.....</i>	<i>58</i>
5.6.5.	<i>Hustota – objemové bobtnání.....</i>	<i>59</i>
<b>6.</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>61</b>
<b>7.</b>	<b>CITOVANÁ LITERATURA.....</b>	<b>62</b>



## *Seznam grafů*

Graf 1: Fáze tepelné modifikace (Thermowood handbook, 2003).....	38
Graf 2: Graf průběhu tepelné modifikace dřeva .....	41
Graf 3: Krabicový graf vlhkosti podle tepelné úpravy .....	53
Graf 4: Krabicový graf hustoty podle tepelné úpravy .....	47
Graf 5: Vliv tepelné úpravy na hustotu borovice (Thermowood handbook, 2003).....	48
Graf 6: Krabicový graf statického modulu pružnosti podle tepelné úpravy.....	49
Graf 7: Krabicový graf dynamického modulu pružnosti podle tepelné úpravy .....	49
Graf 8: Vliv teploty na modul pružnosti.....	50
Graf 9: Krabicový graf pevnosti v ohybu podle tepelné úpravy.....	51
Graf 10: Vliv teploty na pevnost v ohybu borovice (Thermowood handbook, 2003)....	51
Graf 11: Krabicový graf rázové houževnatosti podle stupně tepelné úpravy.....	52
Graf 12: Graf objemového, radiálního, tangenciálního a podélného sesychání podle tepelné úpravy.....	55
Graf 13: Korelace hustoty a pevnosti v ohybu tepelně upraveného dřeva při 165 °C....	56
Graf 14: Korelace hustoty a rázové houževnatosti tepelně upraveného dřeva při 165 °C .....	57
Graf 15: Korelace hustoty a statického modulu pružnosti tepelně upraveného dřeva při 165 °C .....	58
Graf 16: Korelace hustoty a bobtnání tepelně upraveného dřeva při 210 °C .....	59
Graf 17: Korelace dynamického a statického modulu pružnosti tepelně upraveného dřeva při 165 °C.....	60

## *Seznam obrázků*

Obrázek 1: Topol osika; Populus tremula (stromy.sk, 1997-1999).....	14
Obrázek 4: Jehnědy (Úředníček, Maděra, & kolektiv, 2001).....	15
Obrázek 2: Listy topolu osika na výmladcích (Úředníček, Maděra, & kolektiv, 2001). 15	
Obrázek 3: Listy topolu osika na prýtech (Úředníček, Maděra, & kolektiv, 2001) .....	15
Obrázek 5: Lokalita výskytu topolu osiky (Úředníček, Maděra, & kolektiv, 2001) .....	16
Obrázek 6: Způsob zatížení zkušebního tělesa při ohybové zkoušce (Požgaj, Chovanec, Kurjatko, & Babiak, 1993) .....	30
Obrázek 7: (Požgaj, Chovanec, Kurjatko, & Babiak, 1993).....	35

Obrázek 8: Fakopp Ultrasonic timer (FAKOPP Ultrasonic timer's guide, 2017) ..... 42

Obrázek 9: Charpyho kladivo (noze-nuz, 2018)..... 45

### *Seznam rovnic*

$\rho_s = mV \text{ kg.m}^3$ (1).....	18
$\rho_w = mwV_w \text{ [kg.m}^3]$ (2).....	18
$\rho_0 = m_0V_0 \text{ [kg.m}^3]$ (3).....	18
$\rho_{rw} = m_0V_w \text{ [kg.m}^3]$ (4).....	19
$\rho_{r\check{c}} = m_0V_{max} \text{ kg.m}^3,$ (5).....	19
$\alpha_v = V_{max} - V_0V_{max},$ (6).....	19
$V_0 = V_{max}(1 - \alpha_v)$ (7).....	19
$\rho_0 = \rho_{r\check{c}}(1 - \alpha_v),$ (8).....	20
$\beta_v = V_{max} - V_0V_0,$ (9).....	20
$V_{max} = V_0(1 + \beta_v)$ (10).....	20
$\rho_{r\check{c}} = \rho_0(1 + \beta_v)$ (11).....	20
$m_w = m_0(1 + w),$ (12).....	20
$\rho_w = \rho_{rw}(1 + w)$ (13).....	20
$\rho_w = \rho_{r\check{c}}(1 + w)$ (14).....	21
$m_w = m_0(1 + w)$ (15).....	21
$V_{max} = V_0(1 + \beta_v),$ (16).....	21
$\rho_w = mwV_w \text{ [kg.m}^3]$ (17).....	22
$\rho_w = \rho_0(1 + w) + \beta_w$ (18).....	22
$\rho_w = \rho_0(1 + w) + \beta_v w_{BNV}.w$ (19).....	22
$\beta_v = 0,28.\rho_0,$ (20).....	22
$\rho_w = \rho_0(1 + w) + 0,933\rho_0.w$ (21).....	22
$p = V_pV_0$ (22).....	23
$p = 1 - \rho_0\rho_s.100 \text{ [%]}$ (23).....	23
$w_a = mv_0m_0.100 = mw - m_0m_0.100 \text{ [%]}$ (24).....	24
$w_r = mv_0mw.100 = mw - m_0mw.100 \text{ [%]}$ (25).....	24
$w_a = 100.w_r/100 - w_r$ (26).....	24
$w_r = 100.w_a/100 + w_a$ (27).....	24
$k = \varepsilon.tg\sigma,$ (28).....	27
$c = \lambda.f \text{ [m.s}^{-1}]$ (29).....	28

$c = E\rho[m.s - 1]$ (30)	29
$E_{dyn} = \rho w.v^2 1000 [MPa]$ (31)	29
$\sigma_{max} = 3.F.l02.b.h2 [MPa]$ (32)	31
$E_p = E_{p0} - E_{pa} [J]$ (33)	32
$A_w = Wb.h [J.cm - 2]$ (34)	32
$ar_{max} = lr_{max} - lr_{min} / lr_{min} * 100 [\%]$ (35)	33
$at_{max} = lt_{max} - lt_{min} / lt_{min} * 100 [\%]$ (36)	33
$aa_{max} = la_{max} - la_{min} / la_{min} * 100 [\%]$ (37)	33
$aV_{max} = V_{max} - V_{min} / V_{min} * 100 [\%]$ (38)	33
$a_i = 100. \beta_i / 100 - \beta_i$ , (39)	34
$\beta_i = 100. \beta_i / 100 + \beta_i$ (40)	34
$\beta_r = wBNV. \rho_0 \rho_{H2O}$ (41)	34

### Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní statistika vlhkosti podle tepelné úpravy	53
Tabulka 2: Základní statistika hustoty podle tepelné úpravy	48
Tabulka 3: Základní statistika statického modulu pružnosti podle tepelné úpravy	49
Tabulka 4: základní statistika dynamického modulu pružnosti podle tepelné úpravy	50
Tabulka 5: Základní statistika pevnosti v ohybu podle tepelné úpravy	51
Tabulka 6: Základní statistika rázové houževnatosti podle pevnosti v ohybu	52
Tabulka 7: Základní statistika objemového sesychání podle tepelné úpravy	55

## 1. ÚVOD

Dřevo, jakožto přírodní materiál, má hojně využití v různých odvětvích lidské činnosti od použití na nábytek přes výrobu energie až po konstrukce domů. Má mnoho pozitivních, neopomenutelných vlastností, jako například jeho recyklovatelnost, nenahraditelné estetické vlastnosti atd. Tyto a mnoho dalších vlastností ho řadí mezi nejpoužívanější materiál. Avšak má i své značné nevýhody jako jsou jeho chemické složení, anizotropie, rozměrová nestabilita a v neposlední řadě i hygroskopicitu a s ní spojené sesychání a bobtnání. Vyšší obsah vlhkosti ve dřevě totiž vytváří pozitivní prostředí pro plísně, houby a hmyz. Za účelem zdokonalit dřevní materiál, tedy odstranit nebo alespoň co nejvíce omezit jeho negativní vlastnosti, se začalo dřevo různými způsoby modifikovat.

V dnešní době jsou pro zdokonalení dřevního materiálu nejvíce používány nátěrové hmoty, popřípadě impregnace. Jinými způsoby pro vylepšení vlastností dřeva je například jeho chemická, či fyzikální modifikace. Jedním ze způsobů úpravy dřeva fyzikální cestou je i jeho tepelná úprava, kdy se dřevo kontrolovaně modifikuje za použití vysokých teplot a tím dochází ke změnám v jeho chemické struktuře. Tyto změny se pak promítanou do jeho vlastností, jako jsou například rozměrová stabilita, hygroskopicitu, trvanlivost a odolnost vůči povětrnostním vlivům. Zároveň se však musí postupovat tak, aby byly co nejméně ovlivněny jeho dosavadní pozitivní vlastnosti jako například mechanická odolnost. Právě hlavně kvůli negativnímu ovlivňování mechanických vlastností je využití tepelně modifikovaného dřeva do jisté míry omezeno v různých oblastech například v navrhování nosných konstrukcí. Změny ve dřevě jsou při využití termické modifikace ovlivněny hlavně zvolenou teplotou při tomto procesu. Předmětem této práce je posouzení míry změn ve dřevě v závislosti na jeho tepelné úpravě.

## *2. CÍL PRÁCE*

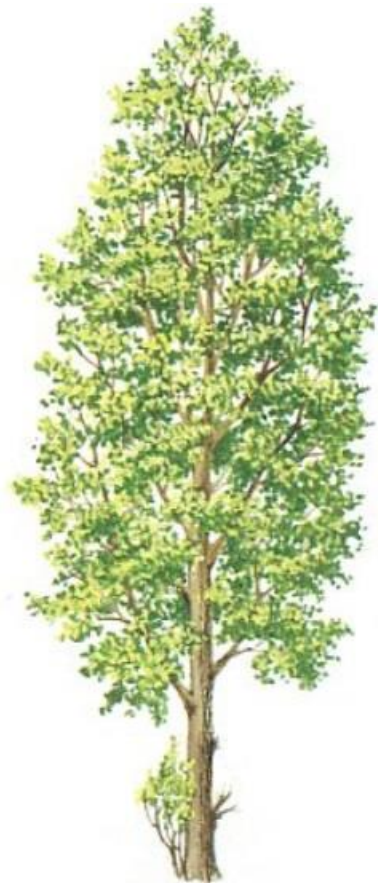
Cílem této bakalářské práce je zhodnotit především rázovou houževnatost, modul pružnosti a pevnost v ohybu dřeva topolu, a to jak tepelně neupraveného, tak tepelně modifikovaného při 165 °C a tepelně modifikovaného při 210 °C. Dále je předmětem této práce posouzení vlivu hustoty na hodnocené vlastnosti a také porovnání zjištěných hodnot s údaji v odborné literatuře.

### 3. ROZBOR PROBLEMATIKY

#### 3.1. POPIS DŘEVINY - Topol osika (*Populus tremula*), čeled': vrbovité (*Salicaceae*)

##### 3.1.1. Dendrologická charakteristika

Topol osika je opadavá, krátkověká rostlina, může se dožít až 160 let. V ČR jsou topoly (včetně jejich kříženců) nejrychleji rostoucími dřevinami, ročně přirůstají průměrně 1 m do výšky, některé druhy dokonce až 2 m. Dorůstá do výšky 15-25 m, výjimečně až 35 m a dosahuje průměru kmene asi 75 cm. Má četné kořenové výmladky, kterými se přirozeně vegetativně rozmnožuje. Kořenový systém je tedy plošně rozvinutý, od kmene sahají kořeny až do vzdálenosti 20-30 m. Kmen je buď křivolaký s plochou korunou nebo přímý s korunou štíhlou. (Kocián, 2003-2017)



Obrázek 1: Topol osika; *Populus tremula* (1997-1999)

Listy topolu osika jsou dvojího tvaru. Na krátkých prýtech jsou listy 3-12 cm dlouhé i široké, vejčité okrouhlé, na okrajích hrubě zubaté a řapíky jsou zploštělé, proto se listy snadno chvějí. Na výmladcích mají listy spíše srdčité tvar. Lze rozlišit dva typy topolu osika, a to osiku s ochlupacenými listy tzv. nížinný typ a osiku lysou tzv. horský typ. (Kocián, 2003-2017)



Obrázek 2: Listy topolu osika na výmladcích (Úřadníček, a další, 2001)



Obrázek 3: Listy topolu osika na prýtech (Úřadníček, a další, 2001; Reinprecht, a další, 2011)

Osika semení téměř každoročně a hojně. Plodem jsou tobolky v 10-12 cm dlouhých jehnědách, pukají 2 chlopněmi, semínko je lehké a ochmýřené, díky tomu snadno přelétá i na velké vzdálenosti. Klíčí krátce, někdy jen během několika dní.



Obrázek 4: Jehnědy (Úřadníček, a další, 2001)

Květy má tmavohnědé, dvoudomé, samčí a to v 6-10 cm dlouhých jehnědách, s červenými prašníky a šedě brvitými listenci, samičí mají červené blizny. (Kocián, 2003-2017)

Je to velmi světlomilná dřevina, vyhovuje mu tedy slunečná poloha. Aby vyklíčil a přirozeně se uchytil, potřebuje holou plochu. Nutnost přítomnosti vody se pohybuje v širokých mezích, nejlépe se mu daří na místech s proudícími spodními vodami, při dostatku živin snáší však i stagnující vodu, záplavy působí negativně. Na půdu je nenáročný, roste na různých podkladech od rašelinišť přes sutě i písky až po černozem. Je odolný vůči mrazům a je i vápnomilný, nevadí mu ani znečištěné městské prostředí nebo průmyslové zóny. Trpí na okusování zvěří, pro kterou jeho listy i kůra představují chutnou potravu, ranami pak do stromu snadno vnikne hniloba, obvykle již při dosažení stáří 60-80 let. (Kocián, 2003-2017)

### 3.1.2. *Výskyt, význam*

Celkově je topol osika rozšířený v Eurasii, izolovaně i severozápadní Africe, v téměř celé Evropě a severní a jihovýchodní části Asie. To naznačuje velkou klimatypickou variabilitu druhu. (Úřadníček, a další, 2001)



Obrázek 5: Lokalita výskytu topolu osiky (Úřadníček, a další, 2001)

U nás se topol osika vyskytuje především v nížinách, roste i na pahorkatinách, v hercynské oblasti můžeme osiku nalézt nejčastěji v rozmezí 300-700 m. n. m., v Krušných horách bývá nejčastěji v poloze okolo 900 m. n. m., v Krkonoších a na Šumavě vystupuje až na 1300 m. n. m.



Jak již bylo zmíněno, topol osika je slunným typem, takže ho můžeme najít na okrajích lesa, světlinách, křovinách, loukách, pasekách, podél cest od nížin do horského stupně. Je to tzv. pionýrský druh, což znamená, že osídluje nově vzniklá stanoviště, kde je často jen neživá příroda.

Z domácích topolů poskytuje osika nejkvalitnější dřevo, a to dřevo bez jádra, měkké, roztroušeně pórovité, dost pevné a pružné. Dřevo bez jádra se snadno opracovává a je pro něj typická pravidelná struktura, hodí se tedy jak na dýhy, tak i na výrobu dřevěných předmětů nebo například k výrobě sirek, papíru, či překližek. Dříve se z jeho kůry vyráběl dehet. Používá se také v léčitelství, pro obsah silic a glykosidů-salicin a populin, které zvyšují vylučování moči.

## 3.2. VYBRANÉ FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI

### 3.2.1. *Hustota*

Hustota dřeva udává hmotnost jeho objemové jednotky, přičemž se nejčastěji vyjadřuje v  $\text{kg.m}^3$ , popřípadě v  $\text{g.cm}^3$ .

Hustota dřeva je významnou veličinou, protože ve velké míře ovlivňuje jeho mechanické i fyzikální vlastnosti. Například dřevo s vyšší hustotou je pevnější a odolnější v porovnání se dřevem s nižší hustotou.

Hustota dřeva je významná při jeho mechanickém a chemickém zpracování, kde se klade důraz na jeho hmotnost, jinými slovy, kde je potřebné vědět, kolik dřevní hmoty obsahuje konkrétní objemová jednotka. Dále je hustota ukazatelem vhodnosti použití dřeva na takové účely, kde se vyžaduje například nízká hmotnost při vysoké pevnosti anebo pružnosti (stavebnictví), při použití dřeva na výrobu hudebních nástrojů a jinde. Z uvedeného vyplývá, že poznatky o hustotě dřeva mají nejen teoretický, ale i praktický význam.

Dále budeme uvažovat s hustotou dřevní substance, hustotou dřeva a redukovanou hustotou dřeva. (Požgaj, a další, 1993)

### *Hustota dřevní substance*

Dřevní substancí rozumíme hmotu buněčných stěn bez pórů (lumenů a mezibuněčných prostorů). Hustota dřevní substance  $\rho_s$  je vyjádřena poměrem hmotnosti dřevní substance  $m$  a jejího příslušného objemu  $V$ .

$$\rho_s = \frac{m}{V} \text{ [kg.m}^3\text{]} \quad (1)$$

Hustota dřevní substance je téměř stálá hodnota, která se mění podle chemického složení dřeva.

Topol osika má hustotu dřevní substance 1560 [kg.m<sup>3</sup>].

### *Hustota dřeva*

Hustota dřeva udává hmotnost jednotkového objemu dřeva při určité vlhkosti. Vypočítá se z podílu hmotnosti  $m_w$  a objemu dřeva  $V_w$ .

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \text{ [kg.m}^3\text{]} \quad (2)$$

Při různých teoretických výpočtech a pro možnost porovnávání výsledků se uvažuje s hustotou dřeva v absolutně suchém stavu  $\rho_0$ , kde je hmotnost a hustota dřeva při nulové vlhkosti.

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

Podle doposud platné normy ČSN 490108 se hustota dřeva udává při vlhkosti 12%. Hustota topolu osiky v absolutně suchém stavu se přibližně pohybuje mezi 400-450 [kg.m<sup>3</sup>].

### *Redukovaná hustota dřeva*

Redukovaná hustota dřeva je definována podílem hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu  $m_0$  a jeho objemu při určité vlhkosti  $V_w$

$$\rho_{rw} = \frac{m_0}{V_w} [\text{kg} \cdot \text{m}^3] \quad (4)$$

Při pěstování, těžbě a v odběratelsko-dodavatelských vztazích se uvažuje s objemem dřeva v čerstvém stavu. Na významu nabývá redukovaná hustota dřeva v čerstvém stavu. Tato hustota udává, kolik suché dřevní hmoty se nachází v maximálně nabobtnalém objemu dřeva.

$$\rho_{r\check{c}} = \frac{m_0}{V_{max}} [\text{kg} \cdot \text{m}^3], \quad (5)$$

kde  $V_{max}$  značí maximálně nabobtnalý objem dřeva.

Redukovaná hustota v čerstvém stavu u topolu osiky je 370 [kg.m<sup>3</sup>].

### *Vztah mezi hustotou a redukovanou hustotou*

Při odvození vztahu budeme nejprve vycházet z hustoty  $\rho_0$ , když je objem dřeva minimální  $V_0$  a z redukované hustoty dřeva v čerstvém stavu, když je objem dřeva maximální  $V_{max}$ . hustota  $\rho_0$  a redukovaná hustota  $\rho_{r\check{c}}$  se navzájem liší v závislosti od vycházejících předpokladů, a to buď o míru objemového sesychání anebo bobtnání.

Při určení jejich vzájemného stavu budeme nejdříve vycházet z objemového sesychání  $\alpha_v$ , pro který platí výpočet

$$\alpha_v = \frac{V_{max} - V_0}{V_{max}}, \quad (6)$$

kde  $V_{max}$  a  $V_0$  značí maximální a minimální objem ( $\text{m}^3$  anebo  $\text{cm}^3$ ). Z uvedené rovnice vyjádříme minimální objem

$$V_0 = V_{max}(1 - \alpha_v) \quad (7)$$

Po dosazení této rovnice do výše uvedené rovnice pro výpočet hustoty dřeva při nulové vlhkosti dostaneme rovnici pro vztah mezi  $\rho_0$  a  $\rho_r$

$$\rho_0 = \frac{\rho_{r\check{c}}}{1-\alpha_v}, \quad (8)$$

Z této rovnice vyplývá, že při známé hodnotě objemového seschnutí a redukované hustoty v čerstvém stavu je možné vypočítat hustotu v absolutně suchém stavu.

Jak jsme už viděli, při určení vztahu mezi hustotou  $\rho_0$  a redukovanou hustotou dřeva v čerstvém stavu  $\rho_{r\check{c}}$  můžeme vycházet taktéž z objemového bobtnání  $\beta_v$ , které vypočítáme podle vztahu

$$\beta_v = \frac{V_{max}-V_0}{V_0}, \quad (9)$$

z této rovnice vyjádříme maximální objem

$$V_{max} = V_0(1 + \beta_v) \quad (10)$$

Dosazením za  $V_{max}$  do rovnice pro výpočet redukované hustoty dřeva v suchém stavu, která je uvedena výše, můžeme vztah mezi  $\rho_0$  a  $\rho_{r\check{c}}$  vyjádřit takto

$$\rho_{r\check{c}} = \frac{\rho_0}{1+\beta_v} \quad (11)$$

Touto rovnicí lze vyjádřit redukovanou hustotu v čerstvém stavu  $\rho_{r\check{c}}$  při známé hustotě  $\rho_0$  a objemovém bobtnání.

Dále odvodíme vztah mezi hustotou  $\rho_w$  a redukovanou hustotou  $\rho_{rw}$ . Vztahy pro výpočet hustoty a redukované hustoty při vlhkosti  $w$  se liší jen jejich hmotností za předpokladu stejného objemu.

$$m_w = m_0(1 + w), \quad (12)$$

dosazením za  $m_w$  do vztahu pro výpočet hustoty při vlhkosti  $w$  bude

$$\rho_w = \rho_{rw}(1 + w) \quad (13)$$

Jestliže je vlhkost dřeva větší anebo rovná vlhkosti při BNV (bodu nasycení vláken), objem dřeva je maximální. Hustota dřeva při takovéto vlhkosti bude

$$\rho_w = \rho_{r\check{c}}(1 + w) \quad (14)$$

rovnice vyjadřuje vztah mezi hustotou dřeva při vlhkosti  $w \geq BNV$  a jeho redukovanou hustotou v čerstvém stavu.

### 3.2.1.1. *Vliv různých faktorů na hustotu dřeva*

#### *Vliv vlhkosti na hustotu dřeva*

Hustota dřeva se zvyšuje s vlhkostí, přičemž hmotnost a objem dřeva se nemění rovnoměrně. Zatím co hmotnost dřeva se zvyšuje se vzrůstající vlhkostí až do jeho úplného nasycení, objem dřeva se zvětšuje jen do BNV. Při dalším nabírání vlhkosti nad tuto hranici se objem dřeva nemění.

Hmotnost dřeva při vlhkosti  $w$  je vyjádřena rovnicí

$$m_w = m_0(1 + w) \quad (15)$$

Zvyšování hmotnosti dřeva v rozsahu vázané vody je spojené s jeho bobtnáním. Objem dřeva při vlhkosti  $w$  je vyjádřený vztahem

$$V_{max} = V_0(1 + \beta_v), \quad (16)$$

kde:

$V_{max}$  značí maximální objem,

$V_0$  minimální objem a

$\beta_v$  objemové bobtnání.

Dosazením vztahů těchto dvou rovnic do rovnice

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} [kg \cdot m^3] \quad (17)$$

můžeme vypočítat hustotu dřeva při vlhkosti  $w \geq BNV$  podle vzorce

$$\rho_w = \rho_0 \frac{1+w}{1+\beta_w} \quad (18)$$

Použití uvedeného vzorce umožňuje poznat hustotu v absolutně suchém stavu a objemové bobtnání při dané vlhkosti. Pro  $w \geq BNV$  můžeme za předpokladu lineární závislosti objemu  $V_w$  od vlhkosti  $w$  napsat uvedený vzorec ve tvaru

$$\rho_w = \rho_0 \frac{1+w}{1+\frac{\beta_v}{w_{BNV}} \cdot w} \quad (19)$$

Objemové bobtnání závisí od hustoty dřeva podle vzorce

$$\beta_v = 0,28 \cdot \rho_0, \quad (20)$$

kde  $\rho_0$  je v  $g \cdot cm^3$ .

Dosazením tohoto vztahu do rovnice předešlé dostaneme

$$\rho_w = \rho_0 \frac{1+w}{1+0,933\rho_0 \cdot w} \quad (21)$$

v této rovnici je důležité dosazovat  $\rho_s$  v  $g \cdot m^3$  a vlhkost v  $g/g$ , přičemž vlhkost ve jmenovateli nesmí překročit BNV. (Požgaj, a další, 1993)

### *Vliv šířky ročních kruhů a podílu letního dřeva na jeho hustotu*

Vliv šířky letokruhů na hustotu dřeva listnatých a jehličnatých dřevin je rozdílný. Hustota dřeva např. borovice stoupá s poklesem šířky letokruhů v důsledku vyššího podílu letního dřeva až po rozměr v rozpětí 2-0,4 mm, kde nastává náhlý pokles šířky letního dřeva i hustoty. U listnatých dřevin s výjimkou některých roztroušeně pórovitých dřevin převládá opačná tendence. (Požgaj, a další, 1993)

#### *3.2.2. Pórovitost dřeva*

Pórovitostí dřeva rozumíme objem pórů v jednotkovém objemu dřeva. Póry myslíme dutiny vytvořené lumeny, případně mezibuněčnými prostory s poloměrem kapilár nad 100 nm, a dutiny, které se nacházejí v buněčných stěnách jednotlivých elementů dřeva s poloměrem kapilár do 100 nm.

Celková pórovitost se vyjadřuje objemem pórů v jednotkovém objemu suchého dřeva

$$p = \frac{V_p}{V_0} \quad (22)$$

Při známých hodnotách hustoty dřeva v absolutně suchém stavu a hustoty dřevní substance se vypočítá podle vzorce

$$p = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_s}\right) \cdot 100 [\%] \quad (23)$$

Z uvedeného vzorce vyplývá, že pórovitost dřeva je závislá na jeho hustotě. Se stoupající hustotou pórovitost dřeva klesá.

#### *3.2.3. Vlhkost*

Vlhkostí dřeva myslíme množství vody, které se nachází ve dřevě. Pokud hovoříme o absolutní vlhkosti, vyjadřujeme jí poměrem hmotnosti vody k hmotnosti absolutně suchého dřeva. Jakmile vlhkost dřeva vyjadřujeme poměrem hmotnosti vody a hmotnosti

mokrého dřeva, hovoříme o relativní vlhkosti. Nejčastěji se vyjadřuje v procentech. Vzorec pro absolutní vlhkost

$$w_a = \frac{m_v}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 [\%] \quad (24)$$

kde

$w_a$  je absolutní vlhkost

$m_0$  – hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu (rozumíme hmotnost dřeva po vysušení při teplotě  $103 \pm 2$  °C),

$m_w$  – hmotnost dřeva při vlhkosti  $w$ .

Vzorec pro relativní vlhkost

$$w_r = \frac{m_v}{m_w} \cdot 100 = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 [\%] \quad (25)$$

kde

$w_r$  je relativní vlhkost

Přepočítání relativní vlhkosti dřeva na absolutní je možné provést na základě těchto rovnic:

$$w_a = \frac{100 \cdot w_r}{100 - w_r} \quad (26)$$

$$w_r = \frac{100 \cdot w_a}{100 + w_a} \quad (27)$$

Při růstu stromu má voda kladnou úlohu, jelikož je nevyhnutelnou součástí každého rostlinného organismu. Po pokácení je přítomnost vody nežádoucí, protože vyvolává nežádoucí efekty, jako například změnu rozměrů, větší pravděpodobnost napadení houbami atd.

Ve dřevě rozlišujeme vodu volnou a vázanou. Voda volná neboli kapilární vyplňuje mezibuněčné prostory, v rostoucím stromě slouží jako dopravník důležitých látek. Ve dřevě ji nalezneme jen tehdy, pokud jsou buněčné stěny zaplněné vodou vázanou. Její



množství se tedy pohybuje od MNBV (meze nasycení buněčných vláken) až po úplné nasycení dřeva vodou.

Voda vázaná, jinak také hygrokopická, se nachází v buněčných stěnách a ve dřevě je vázaná vodíkovými můstky. Její zastoupení ve dřevě se pohybuje od 0 % do BNV (bodu nasycení vláken), kterého průměrná hodnota se pro naše dřeviny udává v rozmezí od 22 do 35 %. Pro technické účely byla zavedena střední hodnota 30 %. Po pokácení stromu se její zastoupení ve dřevě začne snižovat.

Bod nasycení vláken se tedy udává jako stav, kdy jsou buněčné stěny plně nasyceny vodou, zatímco v mezibuněčných prostorech se voda nenachází.

V praxi se nejčastěji vyjadřují tyto stupně vlhkosti dřeva (Škára, 1996):

- 1) Mokré dřevo, které je dlouho uležené ve vodě (nad 100 %)
- 2) Syrové dřevo čerstvě poraženého stromu (50 až 100 %), některé dřeviny, jako například topol až 180 %
- 3) Dřevo sušené dlouhodobě vzduchem v obyčejných podmínkách (15-20 %)
- 4) Dřevo sušené ve vytápěných místnostech (8-10 %)
- 5) Dřevo absolutně suché, vysušené při teplotě  $103 \pm 2^\circ \text{C}$

Pojem absolutně suché dřevo neznamena, že se v něm žádná voda nenachází.

Pro praktické účely byla zavedena tzv. technická vlhkost neboli vlhkost výrobní a užitková vlhkost. Výrobní vlhkostí se označuje vlhkost právě zhotoveného výrobku. Je zapotřebí, aby vlhkost výrobní a užitková byly sobě rovné, popřípadě aby voda užitková byla asi o 2 % nižší. Jinak by mohlo docházet k nepříznivým vlivům.

### 3.2.3.1. *Metody měření vlhkosti*

Vlhkost dřeva můžeme určit různými metodami, a to přímo nebo nepřímo.

#### Přímé metody

Mezi nejčastěji používané přímé metody měření vlhkosti dřeva patří:

- a) Gravimetrická neboli váhová metoda

Při zjišťování vlhkosti touto metodou nejprve zkušební vzorek zvážíme a poté jej vysušíme v sušárně při teplotě  $103^\circ \text{C}$  nejméně 8 h. Pak dřevo zvážíme a opět dáme sušit. Když se hmotnost nemění, máme vzorek zcela suchý. Poté můžeme vlhkost vypočítat pomocí vzorců uvedených výše.

Dřevo můžeme vysoušet i v prostředí s nulovou vlhkostí. Toto prostředí můžeme vytvořit a pomocí použití kyseliny sírové, silikagelu, chloridu vápenatého a dalších látek. Voda ve dřevě má vyšší tlak pár než okolní prostředí, proto její molekuly unikají do okolního prostředí až do úplného vysušení. Tento proces má delší dobu trvání, ale je šetrnější než sušení v sušárnách.

#### b) Destilační metoda

Principem této metody je zjištění hmotnosti vody ve dřevě na základě jejího objemového množství. Tato metoda se například používá při zjišťování vlhkosti dřeva impregnovaného olejovými látkami, kde je problémové použít metodu gravimetrickou, popřípadě i jiné metody. Principem této metody je, že se zkušební vzorky (nejčastěji piliny nebo štěpky) uloží do speciální baňky, ve které je kapalina, která se nemísí s vodou například xylen nebo benzen. Baňka se zahřeje a ze vzorků se vypaří voda, která kondenzuje v chladiči a stéká do druhé nádoby. Poté se zváží voda i vzorky a podle výše uvedených vzorců na výpočet vlhkosti lze vyjádřit absolutní vlhkost.

#### Nepřímé metody

Z nepřímých metod je u dřeva nejčastěji využíváno měření elektrickými metodami, tedy vlhkoměry. Jsou založeny na principu měření určité elektrické vlastnosti, nejčastěji se s jejich pomocí měří elektrický odpor, vodivost, kapacita anebo ztrátový činitel. Máme různé druhy vlhkoměrů:

#### a) Odporové elektrické vlhkoměry

V rozmezí vlhkosti dřeva od 0 % do BNV klesá elektrický odpor vůči předcházejícímu elektrickému proudu. V uvedeném rozpětí vlhkosti je tento pokles přibližně  $10^6$  v porovnání s jeho hodnotou v absolutně suchém stavu. Známé zákonitosti mezi vlhkostí dřeva a elektrickým odporem umožňují konstruovat elektrické odporové vlhkoměry na dřevo, které se můžou použít i na měření vlhkosti některých dřevních kompozitních materiálů. Odporové elektrické vlhkoměry jsou použitelné přibližně pro 5 až 26 % vlhkosti dřeva při možné

přesnosti měření  $\pm 1 \%$ . Elektrické odporové vlhkoměry je možné použít na měření vlhkosti dřeva i nad BNV.

b) Kapacitní vlhkoměry

I měření kapacity a ztrátového činitele elektrického proudu umožňuje zjišťovat vlhkost dřeva v rozsahu hygroskopicity vázané vody. Platí  $C=K.\varepsilon$ , kde  $K$  je koeficient, který závisí od geometrického uspořádání elektrod a  $\varepsilon$  permitivity.

Základem pro měření je kalibrační křivka závislosti permitivity od vlhkosti.

c) Absorpční a mikrovlnné vlhkoměry

Absorpční vlhkoměry měří absorbovanou energii, která je úměrná ztrátovému činiteli. Tyto vlhkoměry mají podobné vlastnosti jako kapacitní. Ty absorpční vlhkoměry, které pracují při frekvencích v rozsahu + až 100 GHz se nazývají mikrovlnné vlhkoměry. Mají tu výhodu, že mohou pracovat při jedné z charakteristických frekvencí, při které se vyskytuje maximum absorpce elektrické energie molekulami vody. Tím je možné dosáhnout vysokou citlivost měřicího přístroje. Na tomto principu zkonstruované vlhkoměry měří vlhkost v celém rozsahu, v jakém se ve dřevě vyskytuje.

Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny s frekvencí 1 až 100 GHz v rozsahu délek 1000 až 1 nm. Tyto vlny se mohou šířit jen dielektricky. Dielektrické vlastnosti dřeva závisí od jeho vlhkosti. Stanovujeme je prostřednictvím velikosti tlumení energie mikrovln, které závisí od ztrátového činitele a permitivity podle vztahu

$$k = \varepsilon \cdot tg\sigma, \quad (28)$$

kde  $k$  je velikost tlumení energie mikrovln,

$\varepsilon$  - permitivity

$tg\sigma$  - elektrický ztrátový činitel

Princip je podobný jako při kapacitních vlhkoměrech, mění se však v jiném vlnovém rozsahu. Vlhkost dřeva je možno stanovit i ze závislosti tlumení jeho vlhkosti.

Z dalších nepřímých metod je třeba uvést metodu zjišťování vlhkosti dřeva pomocí optických vlastností, pomocí nukleární magnetické rezonance, pomocí zpomalování neutronů a pomocí značkových atomů.

Vzhledem k náročnosti těchto metod se jejich použití váže na laboratorní podmínky.  
(MENDELU)

#### 3.2.4. Akustické vlastnosti

Dřevo jako materiál má velmi dobré akustické vlastnosti, proto se také používá na výrobu hudebních nástrojů, jako jsou kytary, housle, violy, violoncella, klavíry atd.

Zvukem nazýváme mechanické vlnění prostředí, které vnímáme sluchovým orgánem jako zvukový vjem. Jeho vnější příčinou je uspořádaný kmitavý pohyb molekul přenášený působením sil, kterými molekuly na sebe vzájemně působí. Zvuk se nemůže šířit ve vakuu, vždy jen ve hmotném prostředí. Zvukové vlny se dají zachytit s frekvencí 16 až 20 000 Hz.

Zvuk můžeme charakterizovat jeho frekvencí, rychlostí šíření, amplitudou vlnění nebo vlnovou délkou.

Zvukové vlny se šíří rychlostí, která závisí od frekvence a vlnové délky podle následující rovnice

$$c = \lambda \cdot f \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (29)$$

kde  $c$  je rychlost šíření zvuku,

$\lambda$  - vlnová délka

$f$  – frekvence

Rychlost šíření zvuku ve dřevě

V daném prostředí se zvukové vlny šíří rychlostí, která závisí od prostředí a od okamžitých podmínek, a to od tlaku, teploty a vlhkosti prostředí. Jejich intenzita ubývá

šířením se na větší a větší vlnoplochy, a to částečným pohlcováním v prostředí (absorpcí) a odrazem na tělesech. Rychlost šíření zvukových vln ve dřevě se může vypočítat ze vztahu:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} [m \cdot s^{-1}] \quad (30)$$

kde E je Youngův modul pružnosti

$\rho$  - hustota dřeva.

Z uvedeného vzorce vyplývá, že rychlost šíření zvukových vln (částice se vlní ve směru šíření vlny) je tím větší, čím je modul pružnosti větší a hustota dřeva menší.

Rychlost šíření zvuku ve dřevě záleží od dřeviny a má anizotropní charakter.

### 3.2.5. *Moduly pružnosti*

Pomocí modulu pružnosti lze vyjádřit vnitřní odpor materiálu vůči pružné deformaci. Čím větší napětí je potřebné na vyvolání deformací, tím větší je modul pružnosti. Můžeme je rozdělit do dvou kategorií, a to do kategorie Youngových modulů pružnosti při normálových namáháních (v tahu, tlaku, ohybu) a do kategorie smykových modulů v tangenciálních namáháních (smyk a krut). Tyto moduly mají velké využití při statických výpočtech v souvislosti s navrhováním dřevěných konstrukcí.

#### Dynamický modul pružnosti

Dynamickým modulem pružnosti můžeme vyjádřit vztah napětí a deformací. Nejčastějším způsobem určení dynamického modulu pružnosti je využití zvuku. Zvuk se totiž v daném prostředí šíří rychlostí závislou na vlhkosti prostředí, teplotě, modulu pružnosti materiálu a na hustotě. Pokud změříme hustotu a rychlost šíření zvuku ve dřevě, máme možnost modul pružnosti dopočítat. Jednotkou pro modul pružnosti je Pascal. (Tsoumis, 1991; Požgaj, a další, 1993; Gandelová, a další, 2009; 2003; 2003)

$$E_{dyn} = \frac{\rho_w \cdot v^2}{1000} [MPa] \quad (31)$$

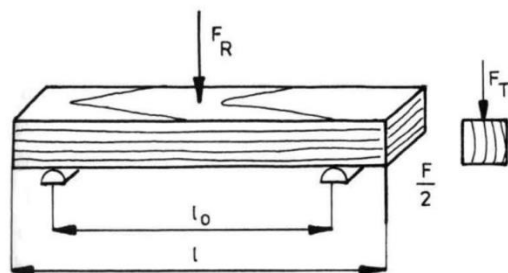
## Statický modul pružnosti

Statický modul pružnosti se měří výhradně v tangenciálním směru. Ohybový moment je prvkem způsobujícím normálové namáhání. Jeho výpočet vyplývá z deformace, a právě z ohybového momentu.

### 3.2.6. Pevnost dřeva v ohybu

Pevnost dřeva v ohybu je jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností. U dřeva rozlišujeme dva způsoby pevnosti v ohybu s ohledem na průběh vláken a to:

1. Pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají rovnoběžně s podélnou osou tělesa a síla působí kolmo na vlákna v radiálním nebo tangenciálním směru (a) viz obrázek 6.



Obrázek 6: Způsob zatížení zkušebního tělesa při ohybové zkoušce (Požgaj, a další, 1993)

2. Pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa, kdy příčný řez je orientován ve směru působící síly (b) nebo kolmo k působící síle (c).

Pevnost v ohybu při aplikování varianty (b) nebo (c) je velmi malá, jen asi 5 až 10 % z meze pevnosti kolmo na vlákna. Zpravidla se tedy sleduje a používá pevnost dřeva v ohybu kolmo na vlákna (a). Při zkoušení dřeva se orientují zkušební tělesa obvykle tak, aby zatížení působilo napříč vláknům v tangenciálním směru (tangenciální ohyb). Větší rozdíly mezi pevností dřeva v ohybu v radiálním a tangenciálním směru byly zjištěny jen u dřeva jehličnatých dřevin (mez pevnosti v tangenciálním směru je o 10-12 % větší než ve směru radiálním). U listnatých dřevin jsou hodnoty meze pevnosti dřeva při statickém ohybu v obou směrech prakticky stejné (rozdíly maximálně 2-4 %).

Při zatížení tělesa vzniká v jeho horní části napětí v tlaku a ve spodní části v tahu. Nedeformovatelná část v tělese bez normálového napětí se označuje jako neutrální osa.

Mezi tahovým a tlakovým napětím je smykové napětí. Vzhledem k tomu, že tlaková pevnost dřeva podél vláken je mnohem menší než tahová pevnost, začíná porušení tělesa při ohybu v tlakové zóně vybočováním vláken, což je málokdy pozorovatelné pouhým okem. Konečné porušení tělesa probíhá v tahové zóně, kdy po překročení meze pevnosti dojde nejdříve k odštěpení krajních vláken a potom k úplnému zlomení tělesa. Dřevo křehké, málo pevné má zlom téměř hladký. Houževnaté, pevné dřevo má zlom vláknitý nebo třískovitý. Mez pevnosti v statickém ohybu (napříč vláken) je průměrně 100 MPa. Variační koeficient je 16 %. Hodnoty ohybové pevnosti dřeva leží mezi hodnotami tahové a tlakové pevnosti dřeva ve směru vláken. Mez úměrnosti při statickém ohybu je průměrně 70 % meze pevnosti. Pevnost v ohybu závisí mimo jiné i na rozměrech zatěžovaného tělesa. Podíl vzdálenosti podpěr k výšce tělesa (štíhlostní poměr) musí odpovídat. (MENDELU)

Pro výpočet pevnosti v ohybu byl použit následující vzorec

$$\sigma_{max} = \frac{3.F.l_0}{2.b.h^2} [MPa] \quad (32)$$

kde

F – působící síla [N],

$l_0$  – vzdálenost mezi podpěrami [m],

h – výška [m],

b – šířka nosníku [m].

### 3.2.7. *Rázová houževnatost dřeva*

Dřevo má schopnost absorbovat práci vykonanou rázovým ohybem, tuto vlastnost nazýváme rázovou houževnatostí dřeva v ohybu, někdy také přerážecí práce nebo ohyb dřeva a materiálů na bázi dřeva rázem. Tuto vlastnost charakterizuje schopnost materiálu absorbovat práci při rázovém (dynamickém) zatížení. A je vyjádřena spotřebovanou energií na přerážení dřeva definovaných rozměrů. Na zjištění této vlastnosti používáme běžná přerážecí kladiva, například Charphyho kladivo.

V případě, že kladivo nemá na své trajektorii žádnou překážku, dosáhne výkyv určité výšky  $h_0$ . Z důvodu odporu třením platí, že  $h_0 < h_i$ . Pokud kladivo narazí na zkušební těleso, výška výkyvu se zákonitě sníží na  $h_a$ . Rozdíl polohové energie před ( $E_{p0}$ ) a po přerážení tělesa ( $E_{pa}$ ) představuje energii spotřebovanou na jeho porušení ( $E_p$ ):

$$E_p = E_{p0} - E_{pa} [J] \quad (33)$$

Platí, že potenciální energie je mírou schopnosti tělesa konat práci, to znamená, že energie  $E_p$  se spotřebovala ve formě vynaložené práce  $W$  na porušení tělesa.

Při tomto způsobu stanovení rázové houževnatosti vycházíme ze vztahu:

$$A_w = \frac{W}{b.h} [J \cdot cm^{-2}] \quad (34)$$

$W$  – práce spotřebovaná na přerážení tělesa [J],

$b, h$  – rozměry tělesa v radiálním a tangenciálním směru [cm].

Toto měření udává relativní hodnoty, které nelze použít pro výpočty konstrukcí. Výsledky této charakteristiky se používají při porovnávání kvality dřeva a materiálů na bázi dřeva.

Většinou se rázová houževnatost stanovuje ve směru kolmo na vlákna v tangenciálním směru. Pokud dřevo obsahuje značně rozdílný podíl jarního a letního dřeva (listnaté kruhovitě pórovité dřeviny nebo dřeviny jehličnaté), stanovuje se tato vlastnost i ve směru radiálním. U těchto dřevin je totiž velký rozdíl ve výsledcích práce spotřebované při radiální a tangenciální rázové houževnatosti. Listnaté dřeviny mají přibližně 2x větší hodnotu rázové houževnatosti než dřeviny jehličnaté.

Dřevo houževnaté a křehké má také charakteristický zlom dřeva. Dřevo houževnaté, které více odporuje přerážecí práci má zlom nepravidelný, dlouze třískový, kdežto zlom křehkého dřeva vypadá relativně hladce, rovně, případně schodovitě.

Na rázovou houževnatost má vliv vlhkost. Podle některých literárních pramenů se u většiny dřev hodnoty rázové houževnatosti v rozmezí od 5 do cca 25 % se stoupající vlhkostí mírně snižují. Nad 25 % se již nemění. (MENDELU, 1965-1993; Matovič, 1993)

### 3.2.8. *Bobtnání a sesychání*

#### Bobtnání

Zákonitosti bobtnání dřeva byly jak z praktického, tak teoretického hlediska prozkoumány již v mnoha odborných pracích. Díky přesnějším údajům a poznatkům o



bobtnání můžeme dřevo před tímto nepříznivým vlivem náležitě chránit a mohou se uplatnit efektivnější postupy při jeho zpracování, jako například hydrotermická úprava dřeva, jeho impregnace, dýchování, lepení atd.

Bobtnání je schopnost dřeva přijímat vodu vázanou v rozmezí od 0 % do BNV a přitom zvětšovat svoje lineární rozměry, plochu a objem. Vysvětluje se tak, že se voda vázaná dostává do amorfních oblastí celulózových fibril, které roztlačuje, což vyvolává zvětšení buněčných stěn jednotlivých elementů dřeva jako celku.

Jak již víme, bobtnání dřeva se zastavuje, pokud se naplní buněčná vlákna, po dosažení BNV své rozměry už nemění, následně voda vyplňuje lumeny a mezibuněčné prostory.

Vzorec pro výpočet bobtnání v radiálním směru:

$$a_{r \max} = \frac{l_{r \max} - l_{r \min}}{l_{r \min}} * 100 [\%] \quad (35)$$

Vzorec pro výpočet bobtnání v tangenciálním směru:

$$a_{t \max} = \frac{l_{t \max} - l_{t \min}}{l_{t \min}} * 100 [\%] \quad (36)$$

Vzorec pro výpočet bobtnání v podélném směru:

$$a_{a \max} = \frac{l_{a \max} - l_{a \min}}{l_{a \min}} * 100 [\%] \quad (37)$$

Vzorec pro výpočet objemového bobtnání:

$$a_{V \max} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\min}} * 100 [\%] \quad (38)$$

$l_{r \max}$ ,  $l_{t \max}$ ,  $l_{a \max}$ ,  $V_{\max}$  – rozměry zkušebního tělesa ve směru radiálním, tangenciálním, podélném a objemu při vlhkosti vyšší anebo rovné mezi hygroskopicity

$l_{r \min}$ ,  $l_{t \min}$ ,  $l_{a \min}$ ,  $V_{\min}$  – rozměry zkušebního tělesa ve směru radiálním, tangenciálním, podélném a objemu v absolutně suchém stavu

## Sesychání

Z hodnot bobtnání dřeva lze následujícím vzorcem vypočítat hodnotu jeho sesychání na základě následujících vztahů

$$\alpha_i = \frac{100 \cdot \beta_i}{100 - \beta_i} \quad (39)$$

$$\beta_i = \frac{100 \cdot \beta_i}{100 + \beta_i} \quad (40)$$

kde

$\alpha_i$  – celkové sesychání dřeva a

$\beta_i$  – celkové nabobtnání dřeva

### 3.2.8.1. *Vliv různých vlastností na bobtnání dřeva*

Vliv hustoty

Se stoupající hustotou bobtnání dřeva vzrůstá. Platí zde vztah:

$$\beta_r = \frac{w_{BNV} \cdot \rho_0}{\rho_{H_2O}} \quad (41)$$

kde  $w_{BNV}$  je vlhkost při nasycení vláken

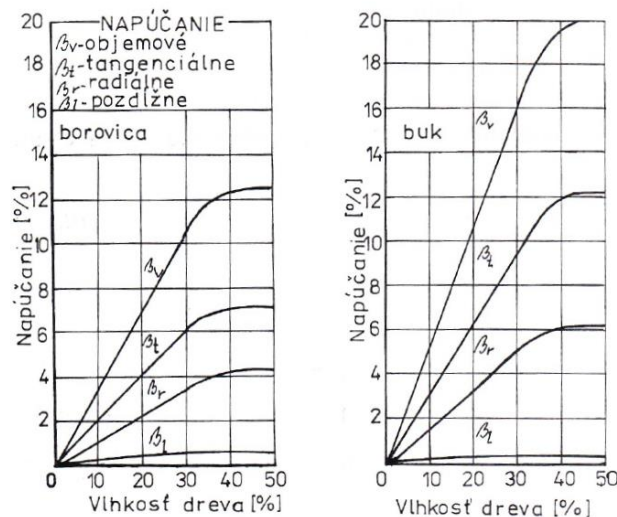
$\rho_0$  – hustota v absolutně suchém stavu

$\rho_{H_2O}$  - hustota vody

Objem nabobtnalého dřeva je o něco menší než součet objemu dřeva před bobtnáním a objemu vodu, které dřevo pohltil. Toto zmenšení objemu systému dřevo-voda se ve starší literatuře popisuje jako kontrakce vody ve dřevě. Voda je v buněčných stěnách pod určitým tlakem, tím pádem má menší objem.

*Vliv vlhkosti*

Vlhkost významně ovlivňuje jeho bobtnání, s rostoucí vlhkostí vzrůstá i jeho bobtnání.



Obr. 10.27 Závislosť napúčania borovicového a bukového dreva od jeho vlhkosti (podľa Kollmanna; KOLLMANN—CÔTÉ 1968).

Obrázek 7: (Požgaj, a další, 1993)

### Vliv struktury dřeva

Dřevo má anizotropní charakter, tudíž přijímá vodu rozdílně podél a napříč vlákny.

Podél vláken je bobtnání velmi malé do 1 %. Pro naše dřeviny se hodnota celkového bobtnání udává 0,1 až 0,4 %. Molekuly vody totiž nemohou pronikat mezi fibrily v jejich podélném spojení do valenčního řetězce.

Rozdíly bobtnání mezi radiálním a podélným směrem lze vysvětlit vlivem dřeňových paprsků, které svůj objem zvětšují spíše do šířky, tudíž více ve směru tangenciálním než po délce.

## 3.3. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ DŘEVA

Po staletí je známo, že pokud se dřevo opaluje ohněm, zvyšuje se jeho odolnost při venkovním použití.

Dřevo složené z celulózy, hemicelulózy, ligninu a extrakčních látek se běžně používá jako technický a konstrukční materiál. Nechráněné dřevo vystavené venkovním podmínkám podléhá řadě degradačních reakcí vyvolaných různými faktory, jako je světlo, vlhkost, teplo, kyslík a znečišťující látky. Proces zvětrávání dřeva je především povrchový jev, ačkoli praskliny a trhliny, které se vyvíjejí během zvětrávání, mohou být citlivé na napadení houbami a vedou k vážnějšímu poškození dřeva. Tepelné zpracování dřeva je tedy jedním z procesů, které se používají k úpravě vlastností dřeva. Tepelně

zpracované dřevo je považováno za ekologickou alternativu k chemicky upravovaným dřevěným materiálům. (2003; Thermowood, 1997-2017)

Nejdůležitější byla tato problematika řešena a zkoumána a rozvinuta hlavně v devadesátých letech 20. století ve Finsku a již několik let se používá hlavně v západní Evropě. Termickou úpravou dřeva zvyšujeme především jeho trvanlivost, je tedy vhodné pro exteriérové použití bez kontaktu s terénem. Obsah vlhkosti ve dřevě se na rozdíl od neupraveného dřeva nemění například ani při skladování, což lze také považovat za výhodu. (2003) (Reinprecht, 2008)

Tepelná modifikace dřeva probíhá působením vysokých teplot. Díky teplotním změnám se mění jak mechanické, tak i fyzikální vlastnosti dřeva. Mění se rovnovážná vlhkost, v závislosti na stupni tepelného zpracování se obsah rovnovážné vlhkosti snižuje u měkkého a tvrdého dřeva o 40-50 % v porovnání s neupraveným dřevem. Dochází také k výraznému snížení koeficientu sesychání a bobtnání.

Díky tepelné úpravě dochází ke změně chemických složek ve dřevě – ligninu, celulózy, hemicelulózy a doprovodných složek. To vede ke zvýšení rozměrové stability. Snižuje se navlhavost dřeva a je také odolnější vůči biotickým škůdcům. Avšak jiné vlastnosti jako například pevnost v ohybu se naopak zhoršují.

Dřevo upravujeme pomocí působení vysokých teplot v rozsahu 180-280 °C. V tomto rozmezí dochází k výraznějším změnám v jeho struktuře. Při nižších teplotách, hlavně do 140 °C, dochází prakticky jen ke změnám nepatrným. Když však překročíme hranici 300 °C, pevnostní vlastnosti dřeva se dramaticky sníží a nastává tzv. teplotní degradace. Z tohoto důvodu jsou moderní procesy tepelné úpravy dřeva většinou omezeny 260 °C. (Polák, 2018)

Na dřevo nemusíme kromě vysoké teploty působit jinými látkami, což je značnou výhodou, protože by mohly mít vliv na ekologickou kvalitu konečného produktu a na prostředí. Dřevo má po termické úpravě tmavší barvu. (Kačíková, a další, 2011)

Technologie výroby termicky modifikovaného dřeva

Mezi nejpoužívanější metody patří:

- 1) ThermoWood
- 2) PlatoWood
- 3) OHT-Wood
- 4) Retificated-Wood

### 3.3.1. *ThermoWood*

Tato metoda je ze všech nejznámější. Proces thermowood je založen na zahřátí dřevěného materiálu při vysokých teplotách (nad 180°) za normálního tlaku při ochraně vodní párou. Vodní pára chrání dřevo před spálením a praskáním a také ovlivňuje chemické změny, ke kterým dochází ve dřevě. (2003)

V tomto procesu se přesahují teploty jeho samovolného vznícení, a to pomocí vodní páry, která má při tomto procesu zároveň funkci ochrannou. Díky odlišné době zpracování, odlišným technikám a odlišným teplotám sušení má dřevo variabilní/rozlišné výsledné vlastnosti, které jsou tepelnou modifikací pozitivně měněny. Proces je naprosto ekologický, využívá pouze vysokých teplot a páry, bez přidávání jakýchkoliv chemických látek. (Thermowood, 1997-2017)

Celý proces tepelné modifikace je uzpůsoben tak, aby tvořil jeden souvislý řetězec. V některých případech představuje výrobní zařízení šest oddělených komor spojených do jednoho dlouhého tunelu, do kterého je přiváděno již vybrané syrové řezivo. Proces tepelného zpracování můžeme rozdělit do tří hlavních fází:

#### První fáze

V první fázi dochází k vysokoteplotnímu sušení, kdy se dřevo intenzivně zahřeje na 100 °C a poté se pozvolna zahřívá až na 130 °C. Těmito kroky je vlhkost ve dřevě přeměněna téměř na nulovou. Doba této fáze závisí na počáteční vlhkosti řeziva, na jeho tloušťce a na druhu dřeviny. V důsledku tlaku páry a povrchového napětí se během tohoto procesu ze dřeva uvolňuje voda volná. Toto sušení ve zmíněném šestikomorovém schématu probíhá v prvních třech komorách. (Thermowood, 1997-2017)

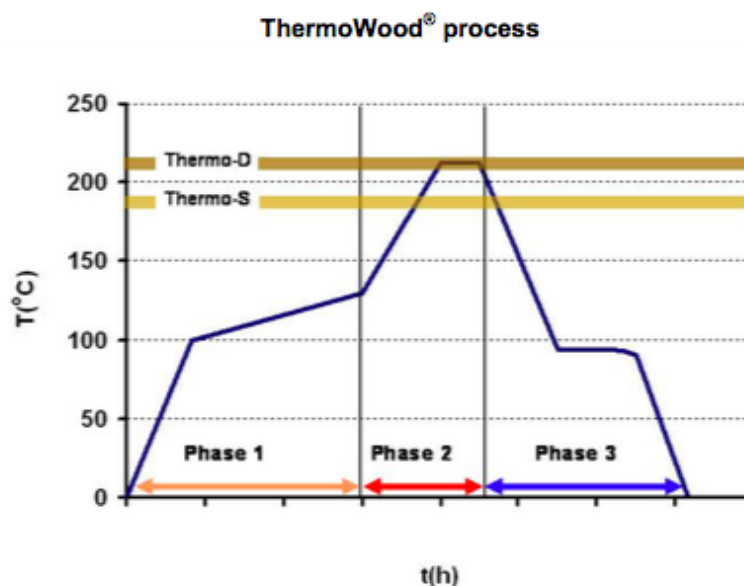
#### Druhá fáze

Ve druhé fázi dochází k samotné tepelné modifikaci, teplota je zvyšována na 185-215 °C, dle stupně tepelné úpravy, provádí se ve čtvrté komoře. Po dosažení požadované teploty se tato teplota udržuje po dobu 2-3 hodin.

#### Třetí fáze (Thermowood, 1997-2017)

V této konečné fázi dochází ke kontrolovanému ochlazení dřeva, musí zde být kladen důraz na opatrnost hlavně kvůli vysokému teplotnímu rozdílu mezi dřevem a venkovním vzduchem, prudké ochlazení by mohlo vést ke tvorbě trhlin. Dřevo je při ochlazení znovu vlhčeno, aby mělo příhodnou vlhkost pro jeho konečné použití. Jelikož je obtížné pracovat se dřevem, které je příliš suché, má jeho vlhkost

poměrně výrazný vliv na jeho konečné zpracování, po konečné úpravě by se měla vlhkost pohybovat mezi 5-7 %. Po tepelném zpracování přichází na řadu stabilizace, která probíhá pod tlakem v zastřešených a teplých prostorech po dobu 24-48 h, před konečnou úpravou produktu opracováním na vyžádaný tvar. Po finálním opracování se výrobky roztrídí podle tříd jakosti a poté se zabalí pro transport. (Thermowood, 1997-2017)



Graf 1: Fáze tepelné modifikace (2003)

### 3.3.2. PlatoWood

Tato tepelná úprava dřeva probíhá v prostředí vodní páry. Tento výrobní proces je nejčastěji využíván v Holandsku pro smrkové dřevo, ale i borovici, douglasku, topol a břízu. Jeho hlavní uplatnění je v oblasti zahradního nábytku, plotů, obkladů, venkovních dveří a oken. Jeho rozměrová stabilita je asi o 50 % lepší než dřeva neupraveného a hygroskopicita je přibližně o 30-40 % nižší. Tato termická úprava také částečně vylepšuje trvanlivost dřeva vůči biologickým škůdcům. (Reinprecht, a další, 2011)

Za tohoto procesu se postupuje ve čtyřech základních krocích:

Jako první na řadu přijde hydrotermolýza, což je tepelná úprava surového nebo vysušeného dřeva při teplotě 150–190 °C, a to za působení zvýšeného tlaku 0,6 až 1 MPa po dobu 4–5 h a také vodní páry (pokud se upravuje vysušené dřevo) anebo horké vody (pokud se upravuje surové). První krok probíhá v tlakové nádobě. Vlhkost vysušeného dřeva se nijak výrazně nemění a zůstává kolem 14–20 %. Ke

změnám však dochází v chemické struktuře dřeva, a to k částečnému odbourání hemicelulóz za tvorby organických kyselin, aldehydů a aktivace ligninu. Obsah celulóz ve dřevě zůstává více méně stejný. (Reinprecht, a další, 2011)

Druhým krokem tohoto procesu je sušení. Dřevo se v této fázi suší na přibližně 8-10 % vlhkost, a to po dobu 3-5 dní, někdy však i déle, a to například po dobu 3 týdnů. (Reinprecht, a další, 2011)

Poté přichází třetí fáze - vytvrzování neboli stabilizace dřeva. To trvá 12–16 h za působení tlaku 0,1 MPa, teploty 150–190 °C a omezeného přístupu vzduchu. Při této fázi se tzv. síťují makromolekuly ligninu, a to za pomoci vedlejších rozkladných produktů hemicelulóz. Vlhkost dřeva v této fázi klesá pod 1 %. (Reinprecht, a další, 2011)

Posledním krokem tohoto procesu je tzv. kondicionování neboli zvlhčování dřeva v sušárnách na hodnotu 4-6 %. To trvá přibližně 3 dny. (Reinprecht, a další, 2011)

### 3.3.3. *OHT-Wood*

Tento proces tepelné modifikace dřeva je prováděn v přítomnosti hořících rostlinných olejů v impregnačních kotlích. Olej má většinou teplotu mezi 200–220 °C. V průběhu tohoto procesu se ve dřevě vyskytuje menší množství kyslíku, což má za účinek omezení nežádoucích účinků termooxidačních procesů. Horký olej postupně vniká do dřeva a ohřívá ho. Důležité je, aby ve středu materiálu byla udržována po dobu 2-4 h teplota kolem 180-200 °C. Pro tuto tepelnou úpravu se nejčastěji používá lněný olej díky tomu, že umožňuje rovnoměrný přenos tepla k buňkám dřeva a omezuje v nich přítomnost kyslíku. (Reinprecht, a další, 2011)

### 3.3.4. *Retificated-Wood*

Retificated-Wood neboli dřevo připravené v prostředí interních plynů se vyrábí v prostředí obsahujícím dusík a za působení vysokých teplot, a to až do 260 °C. Tento proces začíná vysušením zkušebních těles na 12 % vlhkosti a je založen na principu postupného zvyšování teploty až do oblasti 210-260 °C za přítomnosti dusíku, podíl kyslíku nesmí překročit 2 %. Dřevu se více méně zachovává jeho pevnost díky tomu, že termooxidační reakce ve dřevě probíhají jen v menší míře. (Reinprecht, a další, 2011)

## 4. METODIKA

### 4.1. PŘÍPRAVA A ZNAČENÍ VZORKŮ

Zhotovování zkušebních těles podléhalo normě ČSN 49 0101. Zkušební těleso bylo získáno z latí, každá z latí byla rozřezána na tři díly o rozměrech 20x20x300 mm. Jeden z nich zůstal bez tepelné úpravy, druhý byl tepelně upraven při 165 °C a třetí byl také tepelně modifikován, avšak při 210 °C. Takto bylo získáno celkem 258 vzorků, tedy 86 zkušebních vzorků pro každou tepelnou úpravu.

Zkušební tělesa byla dále rozdělena do dvou hlavních skupin, a to podle destruktivních mechanických zkoušek, které se na nich vykonávaly. Na jedné ze skupin byla vykonávána zkouška rázové houževnatosti a na druhé zkouška pevnosti v ohybu.

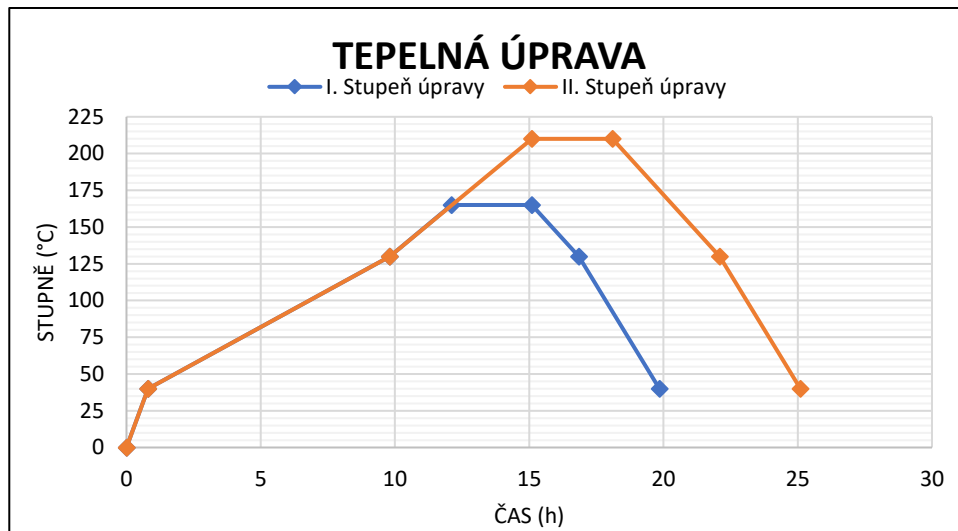
Zkušební tělesa byla zhotovena tak, aby v rámci jedné série byla v původním rostlém dřevě vedle sebe, přitom v závislosti na stupni tepelné úpravy byla zkušební tělesa zhotovena tak, aby byla v rostlém dřevě situována za sebou ve směru vláken.

Konce vzorků byly označeny – levý písmenem X a pravý písmenem Y a po vykonání destruktivních zkoušek byly konce odřezány na rozměr 20x20x30 mm a u varianty vzorků označených písmenem X byla ještě provedena zkouška bobtnání.

### 4.2. TEPELNÉ OŠETŘENÍ VZORKŮ

Po úpravě zkušebních těles na požadovaný rozměr přišla na řadu tepelná modifikace viz graf 2. Jedna ze tří skupin zkušebních vzorků zůstala bez tepelné úpravy, druhá byla tepelně upravena při 165 °C a třetí při teplotě 210 °C. Zkušební tělesa byla tepelně ošetřena v termokomoře, která byla zhotovena firmou Katres Jihlava a která je součástí laboratoře ČZU.





Graf 2: Graf průběhu tepelné modifikace dřeva

### 4.3. MĚŘENÍ

Po úspěšné tepelné modifikaci byla zkušební tělesa opět klimatizována v klimatizační skříni na absolutní vlhkost přibližně 12 %, tzn. při teplotě 20 °C a 65 % relativní vlhkosti vzduchu do doby ustálení vlhkosti.

Všechny zkoušky byly provedeny v laboratořích ve dřevařském pavilonu areálu České zemědělské univerzity v Praze.

#### 4.3.1. Hustota

Hustota byla zjištěna u všech zkušebních těles, tedy na celkem 258 vzorcích, které byly rozděleny do dvou základních skupin podle dvou destruktivních mechanických zkoušek na nich prováděných.

Pro výpočet hustoty je nutná znalost rozměrů zkušebního tělesa a jeho váha. Proto byl vzorek zvážen a přeměřen posuvným měřítkem. Poté byla hustota vypočtena dle následujícího vzorce

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} [kg \cdot m^3] \quad (2)$$

kde  $m_w$  je hmotnost vzorku při určité vlhkosti,

$V_w$  je objem dřeva při určité vlhkosti.

#### 4.3.2. Dynamický modul pružnosti

Při zjišťování dynamického modulu pružnosti bylo postupováno tak, že se vzorek opět zvážil a přeměřil ve středu posuvným měřítkem. Pro tuto zkoušku byl použit přístroj FAKOPP ULTRASONIC TIMER.



Obrázek 8: Fakopp Ultrasonic timer (2017)

Z tohoto přístroje vedou dva kabely, na jejichž koncích jsou umístěny dvě stejné přitlačné 45 kHz piezo-elektrické sondy. Materiál musí být na obou koncích podložen, aby nedocházelo k nepřesnostem při měření. Sondy se současně a stejnou silou přitlačí na oba konce materiálu. Z jedné ze sond vychází krátký ultrazvukový impulz a ve stejné chvíli se spouští měření. Zvuk prochází materiálem až k sondě druhé, kde po dosažení úrovně napětí 0,12 V je měření zastaveno. Doba průchodu zvuku materiálem se zobrazí v  $\mu\text{s}$  na displeji přístroje (2017).

##### Korekce času

Korekce pro přitlačné sondy je výrobcem přístroje stanovena pro jedli, a to ve vzdálenosti sond mezi 6 a 47 cm (2017) Před měřením bylo tedy nutné provést kalibraci přístroje.

Měření proběhlo na každém vzorku ve vzdálenostech od středu 3, 5, 7, 9 a 11 cm. Hodnoty, které byly naměřeny, byly vyneseny do grafu a proloženy přímkou, poté byla odečtena korekce v  $\mu\text{s}$ , tedy čas, který bychom naměřili, kdyby přitlačné sondy byly v nulové vzdálenosti.

### Výpočet dynamického modulu pružnosti

Na zkušebních tělesech, kde nebyla provedena korekce, ve vzdálenosti 7 cm od středu vzorku, tedy 14 cm mezi sondami byl změřen čas průchodu vlny. S pomocí zjištění času průchodu vlny mezi sondami a s uvážením korekce času byla pomocí následujícího vzorce vypočítána rychlost šíření zvuku

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (30)$$

Kde  $d$  – vzdálenost mezi sondami [mm]

$t$  – čas průchodu vlny [ $\mu\text{m}$ ]

$kor$  – korekce [ $\mu\text{m}$ ]

Poté byl vypočítán dynamický modul pružnosti, a to dle vzorce

$$E_{dyn} = \frac{\rho_w \cdot v^2}{1000} [MPa] \quad (31)$$

Kde  $\rho_w$  – hustota při dané vlhkosti [ $\text{g}\cdot\text{cm}^3$ ]

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

#### 4.3.3. *Pevnost v ohybu a statický modul pružnosti*

Vzorky, u kterých byl vypočítán dynamický modul pružnosti, byly dále použity pro zjištění pevnosti v ohybu a také statického modulu pružnosti. Obě zkoušky byly zjišťovány použitím třibodového ohybu. K těmto účelům byl použit trhací stroj UTS 50, který byl modernizován softwarem TIRA.

#### Pevnost v ohybu

Tato mechanická zkouška byla provedena celkem na 129 zkušebních tělesech rozdělených do třech skupin podle stupně tepelné úpravy, tedy na 43 tepelně neupravených vzorcích, 43 vzorcích upravených při teplotě 165 °C a 43 vzorcích tepelně upravených při 210 °C.

Při této zkoušce bylo zkušební těleso položeno na podpěry tak, aby na něj síla působila v jeho středu a v tangenciálním směru. Síla trhacího stroje na těleso působila až

do jeho meze úměrnosti. Díky zjištěné síle, která byla potřeba pro dosažení meze úměrnosti tělesa, znalosti vzdálenosti podpěr a rozměrů tělesa, byl vypočten statický modul pružnosti, použit byl Navierův vzorec

$$\sigma_{max} = \frac{3.F.l_0}{2.b.h^2} [MPa] \quad (32)$$

kde

F – působící síla [N]

$l_0$  – vzdálenost mezi podpěrami [m]

h – výška [m]

b – šířka nosníku [m]

#### Statický modul pružnosti

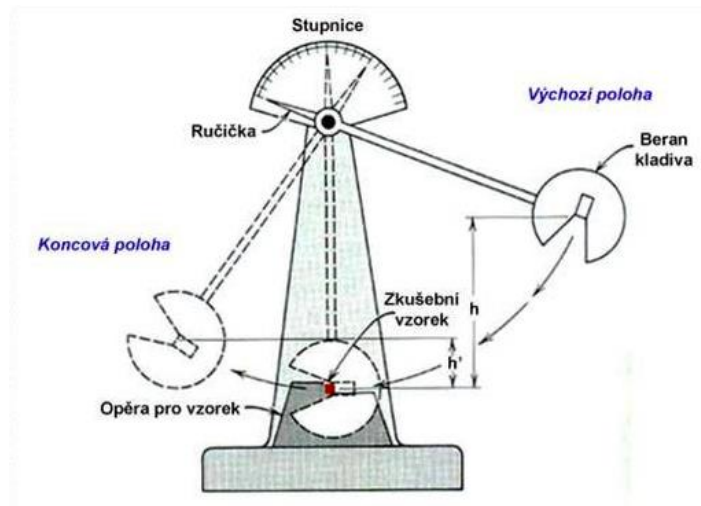
Díky závislostem mezi průhybem tělesa do meze úměrnosti během zkoušky na trhacím stroji, jeho rozměrům a znalosti vzdálenosti mezi podpěrami, mohl být z tohoto měření vypočten i statický modul pružnosti.

#### 4.3.4. *Rázová houževnatost*

Tato zkouška byla provedena podle normy ČSN 49 0117.

Zkouška rázové houževnatosti byla provedena na druhé polovině z celkového počtu zkušebních těles, tedy stejně jako při zkoušce pevnosti v ohybu na 129 vzorcích rozdělených do tří skupin podle stupňů tepelné úpravy.

Postupovalo se následovně. Vzorek byl umístěn na podpěry od sebe vzdálené 240 mm tak, aby byl přeražen na radiální ploše. Jakmile zaujal vzorek správné místo, byla provedena zkouška, kdy se Charpyho kladivo odjistilo viz obrázek 9 a přerazilo vzorek. Na jeho stupnici se zobrazila síla v J, kterou vzorek odolával vůči přeražení neboli síla, kterou zkušební těleso absorbovalo.



Obrázek 9: Charpyho kladivo (noze-nuz, 2018)

Výpočet rázové houževnatosti proběhl podle vzorce

$$A_w = \frac{W}{b \cdot h} \quad [J \cdot cm^{-2}] \quad (34)$$

kde

$W$  – práce spotřebovaná na přerážení tělesa [J],

$b, h$  – rozměry tělesa v radiálním a tangenciálním směru [cm]

#### 4.3.5. Vlhkost

Měření vlhkosti proběhlo podle normy ČSN 49 0103 a bylo provedeno na zkušebních tělesech, která byla původně určena pro destruktivní zkoušku rázové houževnatosti. Konce přerážených vzorků byly odřezány, zváženy a následně vysušeny v sušárně při  $103 \pm 2$  °C do doby dosažení absolutně suchého stavu. Vysušená tělesa byla opět zvážena a poté byla vypočítána absolutní vlhkost dle vztahu

$$w_a = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (24)$$

kde

$m_0$  – hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu,

$m_w$  – hmotnost dřeva při vlhkosti  $w$ .

#### 4.3.6. Bobtnání a sesychání

Zkouška bobtnání dřeva byla provedena na vzorcích, které byly odřezány ze zkušebních těles prvotně určených pro destruktivní zkoušku rázové houževnatosti a následně byla využita pro výpočet vlhkosti. Použito bylo tedy 86 vzorků pro každý stupeň tepelné úpravy.

Do nádoby s vodou byla zkušební tělesa uložena tak, aby byla celá ponořena. Po dosažení rovnovážné vlhkosti, tedy přibližně po týdnu byla z vody vyjmuta, přeměřena a převážena.

Tuto vlastnost dřeva vyjádřenou v procentech jsme vypočítali pomocí vzorce vyjadřujícího podíl změny rozměru před a po nabobtnání tělesa.

Vzorec pro výpočet bobtnání v radiálním směru:

$$a_{r \max} = \frac{l_{r \max} - l_{r \min}}{l_{r \min}} * 100 [\%] \quad (35)$$

Vzorec pro výpočet bobtnání v tangenciálním směru:

$$a_{t \max} = \frac{l_{t \max} - l_{t \min}}{l_{t \min}} * 100 [\%] \quad (36)$$

Vzorec pro výpočet bobtnání v podélném směru:

$$a_{a \max} = \frac{l_{a \max} - l_{a \min}}{l_{a \min}} * 100 [\%] \quad (37)$$

Vzorec pro výpočet objemového bobtnání:

$$a_{V \max} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\min}} * 100 [\%] \quad (38)$$

$l_{r \max}$ ,  $l_{t \max}$ ,  $l_{a \max}$ ,  $V_{\max}$  – rozměry zkušebního tělesa ve směru radiálním, tangenciálním, podélném a objemu při vlhkosti vyšší anebo rovné mezi hygroskopicity

$l_{r \min}$ ,  $l_{t \min}$ ,  $l_{a \min}$ ,  $V_{\min}$  – rozměry zkušebního tělesa ve směru radiálním, tangenciálním, podélném a objemu v absolutně suchém stavu

Poté byly hodnoty bobtnání přepočítány na základě následujících vztahů na hodnoty sesychání:

$$\alpha_i = \frac{100 \cdot \beta_i}{100 - \beta_i} \quad (42)$$

$$\beta_i = \frac{100 \cdot \beta_i}{100 + \beta_i} \quad (43)$$

kde

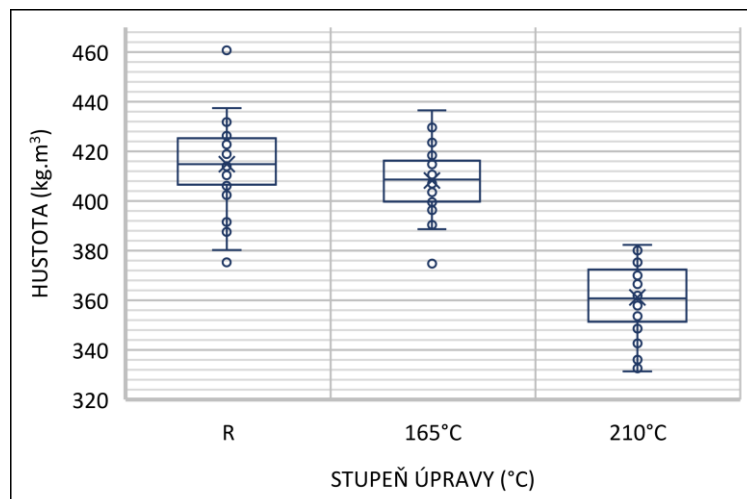
$\alpha_i$  – celkové sesychání dřeva a

$\beta_i$  – celkové nabobtnání dřeva

## 5. DISKUSE A VÝSLEDKY

### 5.1. HUSTOTA

Z grafu 4 je patrné, že se zvyšující se tepelnou úpravou klesá hustota. Uvážíme-li, že referenční hodnota vzorků = 100 %, je pokles hustoty následovný – při teplotě 165 °C se hustota zkušebních těles sníží o 1,59 %. U úpravy 210 °C je pokles razantnější a to o 12,95 %.



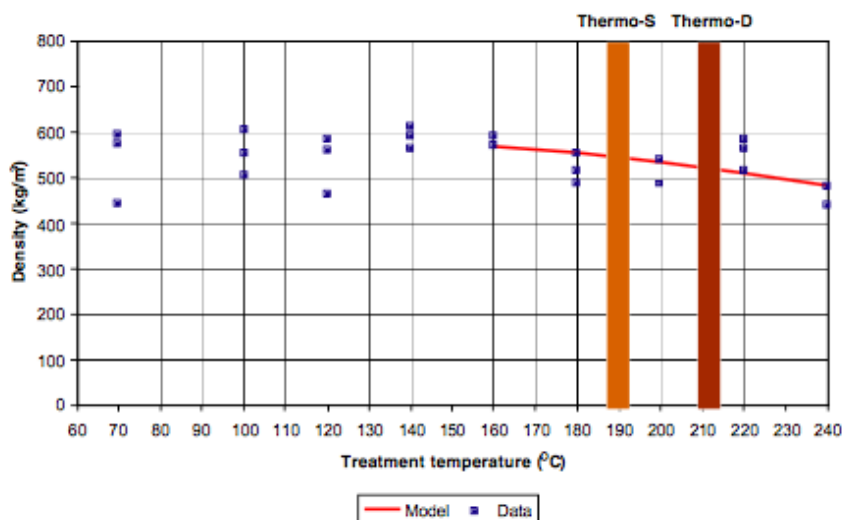
Graf 3: Krabicový graf hustoty podle tepelné úpravy

Tabulka 1: Základní statistika hustoty podle tepelné úpravy

ÚPRAVA	R	165 °C	210 °C
PRŮMĚR	414,91	408,32	361,18
MEDIÁN	414,93	408,72	360,84
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	15,43	11,96	13,19
VARIÁČNÍ KOEFIČIENT	238,01	143,16	173,97

V literatuře (Požgaj, a další, 1993) je pro topol osiku uvedena hustota 400-450 (kg.m<sup>3</sup>), což až na výjimky, které mohly být ovlivněny vlivem vad ve dřevě, odpovídá naměřeným hodnotám.

Průběh výsledků měření hustoty se shoduje i s literaturou „Se zvyšující se teplotou při termické úpravě klesá hustota“ (2003). Tento fakt je zapříčinen zejména tím, že při tepelné modifikaci dřeva dochází k odbourávání chemických složek ve dřevě, a to zejména hemicelulóz. Taktéž se tepelnou úpravou snižuje hmotnost dřeva, což také přispívá k již zmíněnému poklesu hustoty.



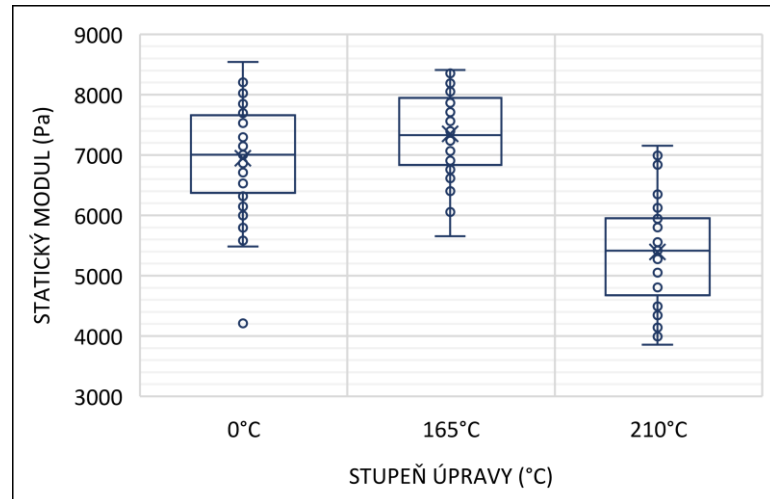
Graf 4: Vliv tepelné úpravy na hustotu borovice (2003)

## 5.2. STATICKÝ A DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI

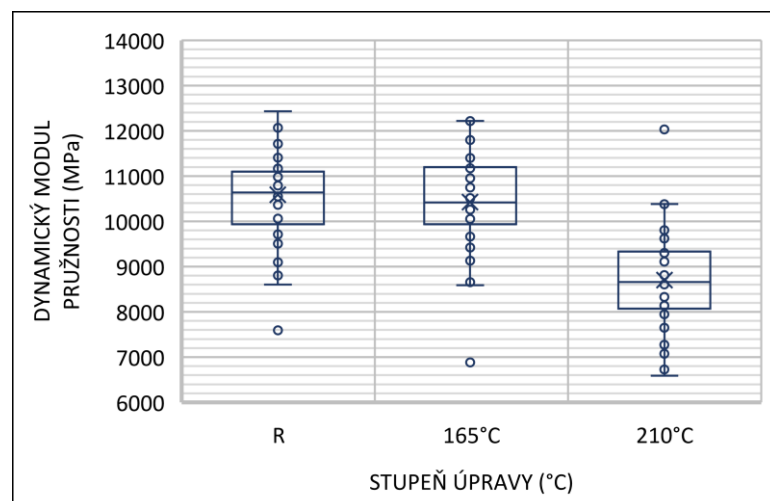
Průběh statického a dynamického modulu pružnosti je podobný viz graf 6 a graf 7. U prvního stupně tepelné úpravy můžeme pozorovat mírné zvýšení, i když u dynamického modulu pružnosti je medián mírně v poklesu, to však může mít za následek minimální naměřená hodnota této úpravy, která mohla být chybná v závislosti vad dřeva nebo



nepřesnosti měření. U druhého stupně tepelné modifikace oproti referenčním vzorkům naopak oba moduly celkem výrazně klesají. Tento trend má pravděpodobně za následek degradace materiálu spojená se zvyšováním tepelné úpravy dřeva.



Graf 5: Krabicový graf statického modulu pružnosti podle tepelné úpravy



Graf 6: Krabicový graf dynamického modulu pružnosti podle tepelné úpravy

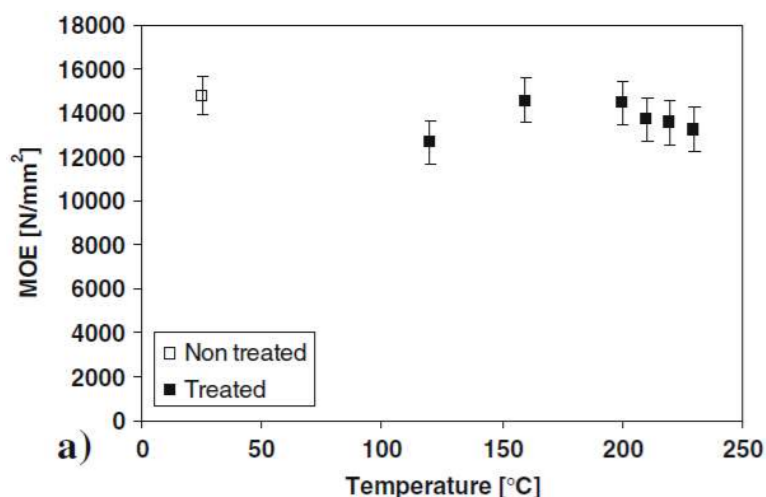
Tabulka 2: Základní statistika statického modulu pružnosti podle tepelné úpravy

ÚPRAVA	R	165 °C	210 °C
PRŮMĚR	6945,24	7347,56	5393,60
MEDIÁN	7004,38	7327,47	5415,03
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	883,64	690,96	857,98
VARIAČNÍ KOEFIČIENT	780812,49	477420,12	736126,94

Tabulka 3: základní statistika dynamického modulu pružnosti podle tepelné úpravy

ÚPRAVA	R	165 °C	210 °C
PRŮMĚR	10584,43	10427,01	8700,513
MEDIÁN	10634,94	10420,31	8660,087
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	1136,51	1071,29	1053,923
VARIACNÍ KOEFCIENT	1291665,66	1147655,76	1110754

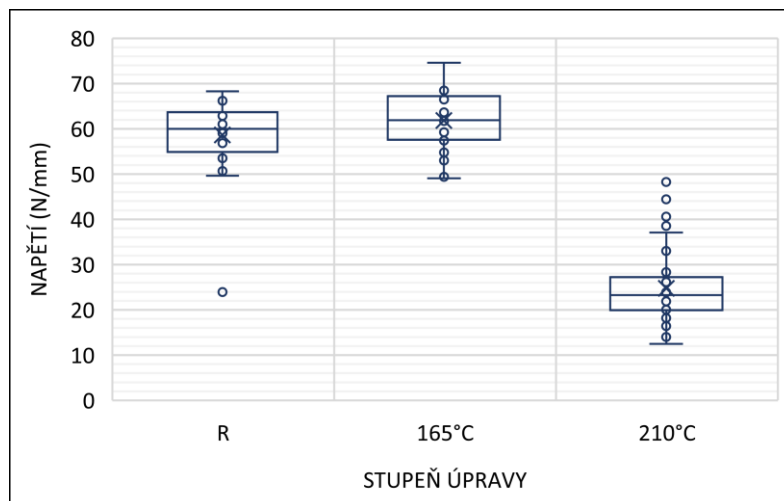
V literatuře (Poncsák, a další, 2006) viz graf 8 byla naměřena na zkušebních tělesech dřeva břízy stejná hodnota modulu pružnosti u tepelně neupravených vzorků a vzorků upravených při 160 °C, u vzorků tepelně modifikovaných při 210 °C došlo k jeho poklesu.



Graf 7: Vliv teploty na modul pružnosti

### 5.3. PEVNOST V OHYBU

Z tohoto měření vyplývá zajímavé zjištění a to, že se u vzorků s prvním stupněm tepelné úpravy pevnost v ohybu zvyšuje přibližně o 5 % oproti tepelně neupraveným vzorkům viz graf 9. Důvodem je pravděpodobně snížení vlhkosti, která pevnost v ohybu negativně ovlivňuje a také stavba dřeva není tepelnou úpravou při 165 °C výrazně poškozena. Při druhém stupni tepelné úpravy zkušebních těles, tedy modifikací při 210 °C, došlo k výraznému snížení pevnosti v ohybu. Dřevo je totiž vysokou teplotou výrazně poškozeno. Oproti referenčním vzorkům klesla pevnost v ohybu téměř o 58 %.

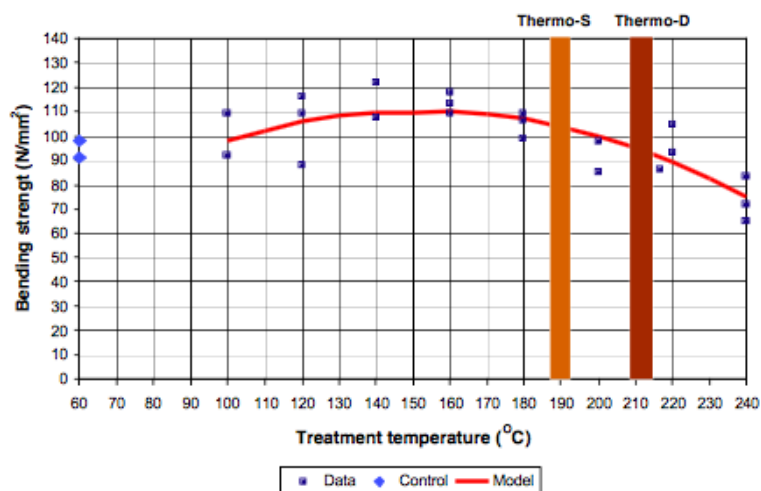


Graf 8: Krabicový graf pevnosti v ohybu podle tepelné úpravy

Tabulka 4: Základní statistika pevnosti v ohybu podle tepelné úpravy

ÚPRAVA	R	165 °C	210 °C
PRŮMĚR	58,67	61,86	24,78
MEDIÁN	60,00	61,88	23,25
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	7,41	6,00	8,14
VARIAČNÍ KOEFIČIENT	54,90	36,03	66,30

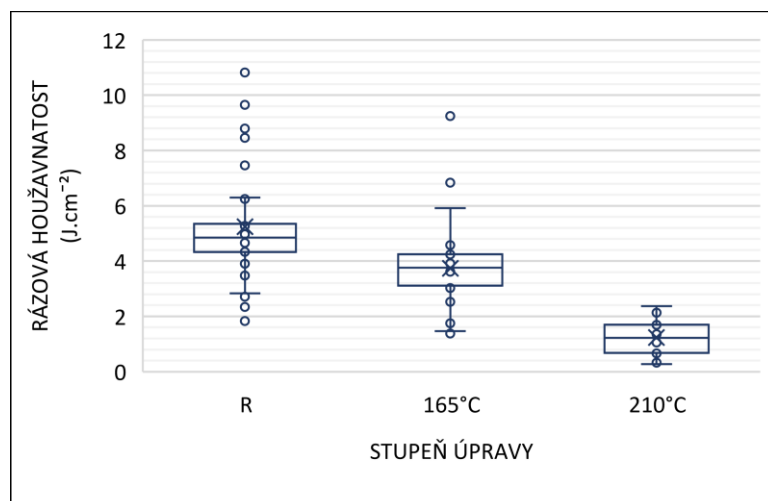
V knize (2003) je uveden při tepelné úpravě 220 °C pokles hodnoty pevnosti v ohybu přibližně o 10 % oproti dřevu bez tepelné modifikace. Tato hodnota se ovšem vztahuje ke dřevu borovice.



Graf 9: Vliv teploty na pevnost v ohybu borovice (2003)

## 5.4. RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST

Z výsledků měření lze vyčíst, že podobně jako u naměřené hustoty rázová houževnatost společně se zvyšující se tepelnou modifikací klesá viz graf 11. V procentuálním vyjádření klesla oproti tepelně neupraveným vzorkům houževnatost o téměř 29 % u vzorků upravených při 165 °C a u vzorků upravených při 210 °C o téměř 76 %.



Graf 10: Krabicový graf rázové houževnatosti podle stupně tepelné úpravy

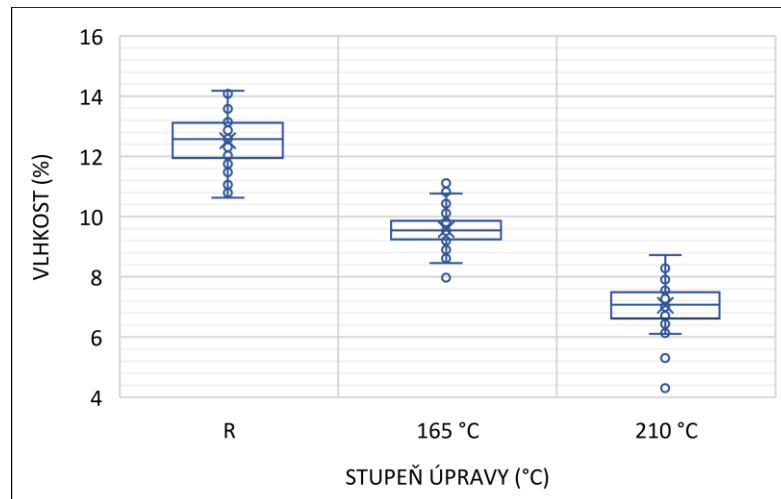
Tabulka 5: Základní statistika rázové houževnatosti podle pevnosti v ohybu

ÚPRAVA	R	165 °C	210 °C
PRŮMĚR	5,30	3,74	1,21
MEDIÁN	4,98	3,76	1,08
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	2,07	1,46	0,61
VARIAČNÍ KOEFICIENT	4,29	2,12	0,37

V literatuře (2003) je uvedeno, že u smrku tepelně modifikovaného při 220 °C se hodnota přerážecí práce snižuje o přibližně 25 % oproti hodnotě naměřené u dřeva tepelně neupraveného, což může být odpovídající, uvažíme-li rozdílnost stavby dřeviny jehličnaté a roztroušeně pórovité listnaté dřeviny.

## 5.5. VLHKOST

Pokud se zaměříme na graf 3, můžeme si povšimnout poklesu vlhkosti u termicky upravených těles. Zkušební tělesa byla naklimatizována při teplotě 20 °C a vlhkosti 65%. V případě tepelné úpravy při 165 °C klesla rovnovážná vlhkost dřeva oproti tepelně neupraveným vzorkům o téměř 25% a při tepelné úpravě 210 °C klesla přibližně o 44%.



Graf 11: Krabicový graf vlhkosti podle tepelné úpravy

Tabulka 6: Základní statistika vlhkosti podle tepelné úpravy

ÚPRAVA	R	165 °C	210 °C
PRŮMĚR	12,52	9,58	7,05
MEDIÁN	12,57	9,55	7,08
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	0,82	0,57	0,67
VARIACNÍ KOEFIČIENT	0,67	0,33	0,45

V literatuře je uvedeno, že se při již zmíněných podmínkách klimatizace (20 °C a vlhkosti vzduchu 65 %) rovnovážná vlhkost termicky neupraveného dřeva ustálí přibližně na 12 %. Což se s naším průměrem prakticky potvrdilo viz tabulka 2.

Dřevo po termické úpravě má vlivem odbourávání hemicelulóz a blokadí hydrofilních funkčních skupin nižší rovnovážnou vlhkost. (Kačíková, a další, 2011)

## 5.6. *BOBTNÁNÍ A SESYCHÁNÍ*

Při této zkoušce bylo, díky získaným hodnotám ze zkoušky bobtnání a jejich následnému přepočítání dle výše uvedeného vzorce na hodnoty sesychání, vyhodnoceno sesychání objemové, radiální, tangenciální a bobtnání podél vláken viz graf 12.

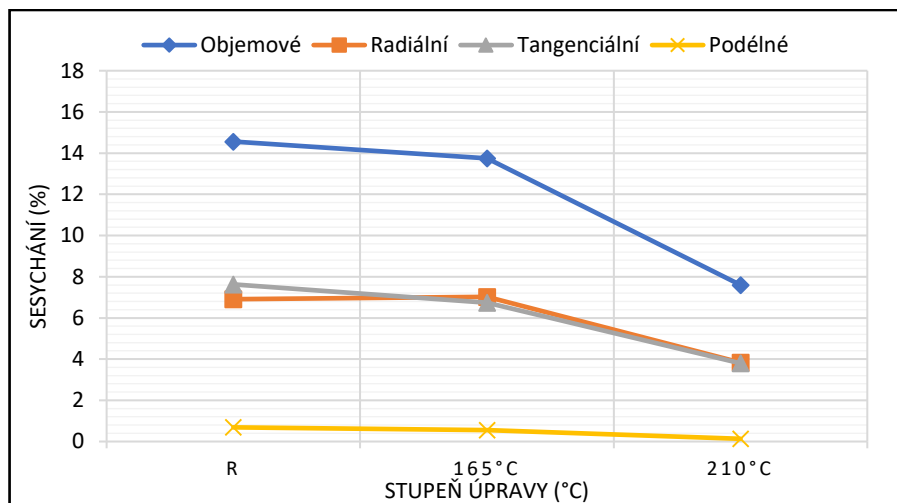
U objemového sesychání při prvním stupni tepelné úpravy si můžeme všimnout oproti vzorkům tepelně neupraveným mírného poklesu (asi o 1 %) a výraznějšího poklesu při druhém stupni tepelné úpravy, a to téměř o 7 %. Čím vyšší teplotou jsou tedy zkušební tělesa upravována, tím se bobtnání snižuje. Vlhkost termicky upravených dřev je totiž nižší než dřev tepelně neupravených, to zapříčiňuje jejich nižší hygroskopicitu.

U sesychání radiálního zaznamenáváme u prvního stupně tepelné úpravy překvapivě mírný vzrůst oproti vzorkům tepelně neupraveným a při druhém stupni úpravy hodnoty opět klesají výrazněji.

Pokud se zaměříme na sesychání tangenciální, vidíme, že hodnota u tepelně upravených vzorků při 165 °C vzhledem k tepelně nemodifikovaným zkušebním tělesům mírně klesá, zatímco u tepelně upravených vzorků při 210 °C opět klesá výrazněji, tedy asi o 3 %.

Rozdíl sesychání v tangenciálním a v radiálním směru lze vysvětlit vlivem dřevových paprsků, které nabývají na větší šířce v tangenciálním směru než ve směru radiálním.

Nejmenší rozměrové změny zaznamenáváme u sesychání podél vláken, hodnoty tepelně neupravených a modifikovaných vzorků při 165 °C se téměř neliší, mezi neupravenými vzorky a tepelně upravenými při 210 °C sledujeme jen opravdu mírný pokles na rozdíl od výsledovaného sesychání v jiných směrech. Toto je v literatuře vysvětlováno tím, že molekuly vody obtížně vnikají do valenčního řetězce mezi fibrily v jejich podélném spojení, tím pádem nevzniká jejich rozestupování.



Graf 12: Graf objemového, radiálního, tangenciálního a podélného sesychání podle tepelné úpravy

Tabulka 7: Základní statistika objemového sesychání podle tepelné úpravy

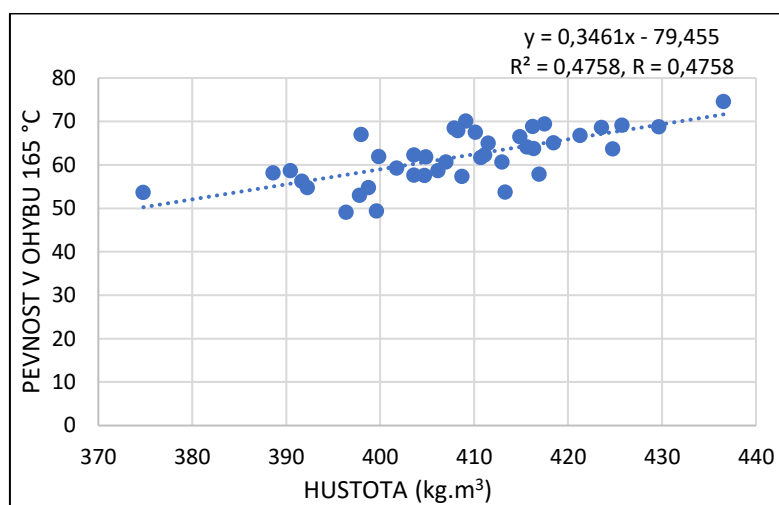
ÚPRAVA	R	165 °C	210 °C
PRŮMĚR	16,68	15,83	8,34
MEDIÁN	16,70	15,62	8,19
SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	1,55	1,40	1,07
VARIAČNÍ KOEFCIENT	2,41	1,95	1,14

V literatuře (MENDELU) se uvádí, že je topol osika středně sesychavý, jeho koeficient bobtnání a sesychání je uveden v rozmezí 0,4 – 0,47.

## 5.7. KORELACE VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ

### 5.6.1. Hustota – pevnost v ohybu

Pokud se zaměříme na korelaci mezi hustotou a pevností dřeva v ohybu, můžeme nejvíc zřetelný vztah mezi veličinami pozorovat u tepelně upravených vzorků při 165 °C, kde se projevuje ve výsledku přibližně 0,47 viz graf 13. U tepelně neupravených vzorků vyšla tato hodnota téměř poloviční a to cca 0,22. U tepelně upravených těles při 210 °C můžeme bližší závislost takřka vyloučit ( $R = 0,002$ ).

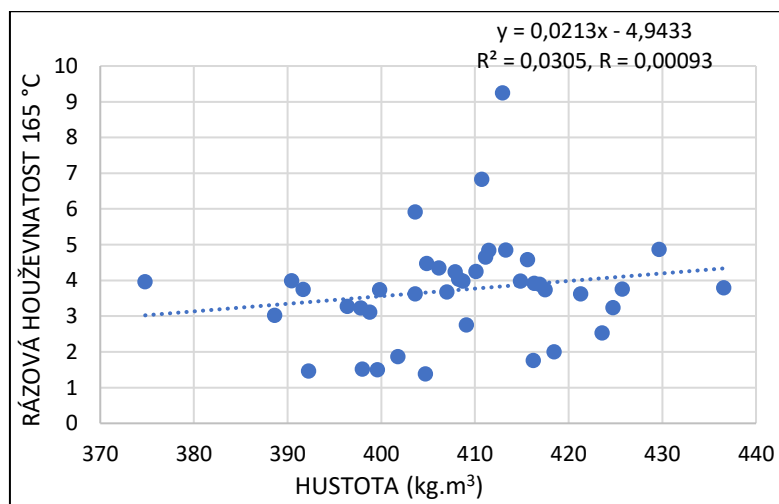


Graf 13: Korelace hustoty a pevnosti v ohybu tepelně upraveného dřeva při 165 °C



### 5.6.3. Hustota – rázová houževnatost

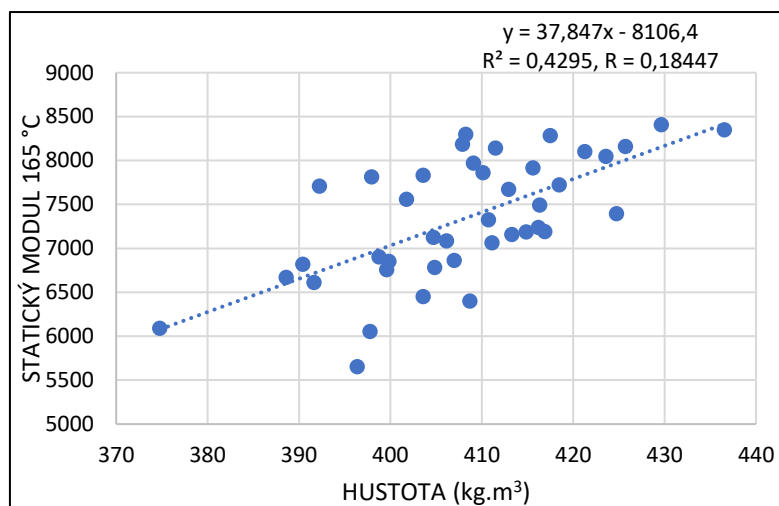
U hustoty a rázové houževnatosti můžeme jejich závislost na sobě prakticky vyloučit, a to u všech stupňů úpravy. Nejvyšší naměřená hodnota se projevila u zkušebních těles upravených při 165 °C, a to ve výši přibližně 0,0009 viz graf 14. U těles tepelně neupravených a tepelně upravených při 210 °C byla tato hodnota naměřena podobná, a to opravdu v zanedbatelné výši cca 0,0003.



Graf 14: Korelace hustoty a rázové houževnatosti tepelně upraveného dřeva při 165 °C

#### 5.6.4. Hustota – statický modul pružnosti

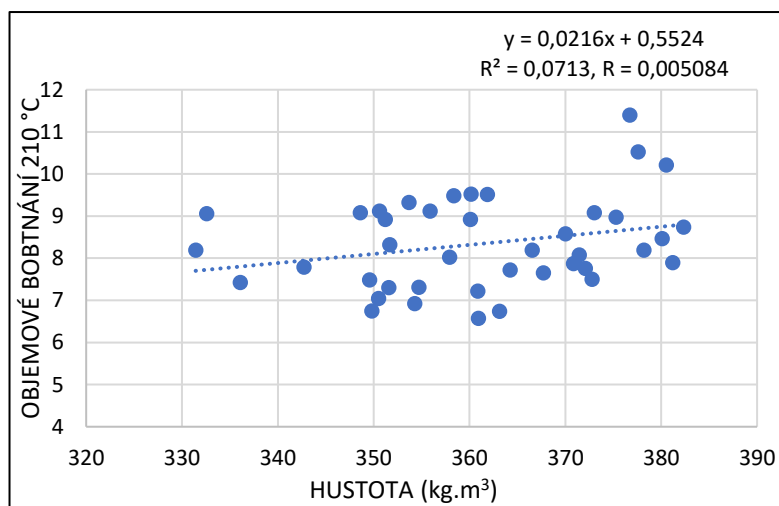
Ač se korelace u hustoty vzorků a jejich statického modulu pružnosti projevila také jen velmi malá, nejvyšší jí můžeme pozorovat opět u vzorků s tepelnou úpravou při 165 °C, kdy dosahuje hodnoty cca 0,18 viz graf 15. U prvního stupně tepelné úpravy dosahuje korelace hodnoty přibližně 0,1. Při druhém stupni tepelné úpravy přibližně 0,02.



Graf 15: Korelace hustoty a statického modulu pružnosti tepelně upraveného dřeva při 165 °C

### 5.6.5. Hustota – objemové bobtnání

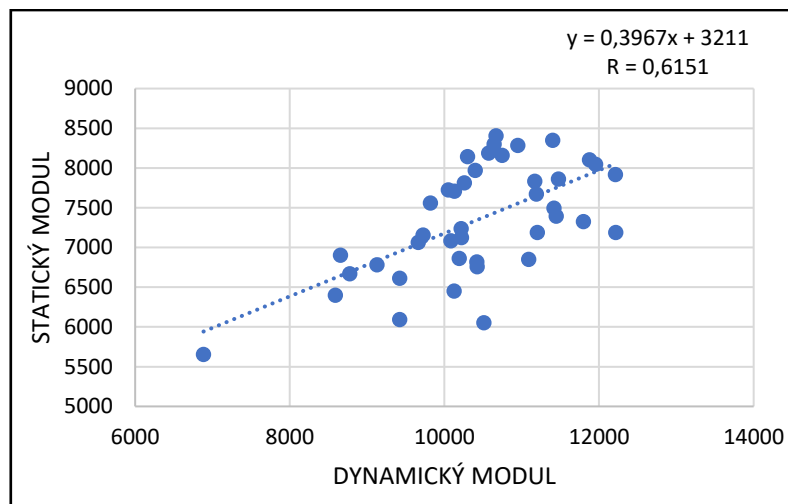
Korelaci s hustotou a naměřenou hodnotou objemového bobtnání můžeme také prakticky vyloučit, a to u všech stupňů tepelné úpravy. Nejvyšší, i když i přesto velmi nízká hodnota byla vyhodnocena u těles tepelně upravených při 210 °C viz graf 16. U zbylých dvou tepelných úprav je tato hodnota opravdu zanedbatelná.



Graf 16: Korelace hustoty a bobtnání tepelně upraveného dřeva při 210 °C

### 5.6.6. Dynamický – Statický modul pružnosti

Pokud se zaměříme na korelaci mezi dynamickým a statickým modulem pružnosti, největší vzájemný vztah nalezneme opět u hodnot naměřených na vzorcích tepelně upravených při 165 °C viz graf 17. U tepelně neupravených vzorků a tepelně upravených při 210 °C nebyla tato hodnota tak vysoká, a to přibližně okolo hodnoty 0,4.



Graf 17: Korelace dynamického a statického modulu pružnosti tepelně upraveného dřeva při 165 °C

## 6. ZÁVĚR

Při tepelné modifikaci dřeva topolu dochází vlivem vysokých teplot k určitým změnám v jeho struktuře a k ovlivnění jeho mechanických vlastností.

S aplikováním přiměřené teploty (v tomto případě 165 °C) lze docílit zlepšení například pevnosti v ohybu dřeva, jeho pružnostních vlastností a odolnosti vůči bobtnání. Ovšem u rázové houževnatosti pozorujeme již při úpravě 165 °C pokles této vlastnosti.

Pokud při tepelné modifikaci použijeme vyšší teplotu a to 210 °C, můžeme pozorovat mnohem závažnější dopady na jeho vybrané vlastnosti, které jsou s výjimkou odolnosti vůči bobtnání dřeva výrazně negativní. Měřením bylo totiž prokázáno, že čím vyšší teplota je pro termickou modifikaci dřeva použita, tím je dřevo vůči bobtnání odolnější bez ohledu na výrazné zhoršení ostatních vlastností. Pozitivní na termické úpravě dřeva je také úbytek vlhkosti, díky kterému bude dřevo pravděpodobně méně napadáno biotickými škůdci a materiál bude rozměrově stabilnější. Ovšem za tyto pozitiva si tepelná úprava vybere vysokou daň v již zmíněných výrazně klesajících mechanických vlastnostech. Při této úpravě klesá oproti neupraveným vzorkům hustota dřeva o 12,95 %, dynamický modul pružnosti o 17,8 %, pevnost v ohybu o téměř 58 %, statický modul pružnosti o 22,34 % a rázová houževnatost o přibližně 76 %. Díky tomuto zjištění můžeme říci, že je vyloučeno použít dřevo termicky upraveného topolu při 210 °C na jakékoliv nosné konstrukce. Dřevo modifikováno přiměřenou teplotou by se však mohlo hodit pro saunové vybavení, pro podlahy nebo obklady zdí.

Zajímavé zjištění a doplňující informace by mohlo přinést otestování tepelně upravených těles například při 175 °C. Můžeme se domnívat, že pokud by se pro modifikaci použila tato teplota, mohly by se vybrané vlastnosti dřeva ještě o něco zlepšit.

## 7. CITOVANÁ LITERATURA

2017. FAKOPP Ultrasonic timer's guide. [Online] 2017.  
<http://fakopp.com/docs/products/ultrasonic/UltrasonicGuide.pdf>.
- Gandelová, Libuše, Horáček, Petr a Šlezingerová, Jarmila. 2009. *Nauka o dřevě*. Brno : Mendelova zemědělská univerzita v Brně, 2009. ISBN 978-80-7375-312.
- Kačíková, D. a F., Kačík. 2011. *Chemické a mechanické zmeny dreva při termickej úprave*. Zvolen : TU vo Zvolene, 2011. ISBN 978-80-228-2249-7.
- Kocián, Petr. 2003-2017. *kvetenacr. kvetenacr.* [Online] 2003-2017.  
<http://www.kvetenacr.cz/detail.asp?IDdetail=854>.
- Matovič, Anton. 1993. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. Brno : autor neznámý, 1993. ISBN 80-7157-086-9.
- MENDELU, IS. Bobtnání, sesychání. *is.mendelu.* [Online]  
[https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=9178](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9178).
- . 1965-1993. *is.mendelu. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva.* [Online] 1965-1993. <https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/index.pl?cast=9192>.
- . Pevnost dřeva. *is.mendelu.* [Online]  
[https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=9190](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9190).
- . Vlhkost dřeva. *is.mendelu.* [Online]  
[http://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=9177](http://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9177).
- noze-nuz. 2018. *noze-nuz. noze-nuz.* [Online] 2018. <http://www.noze-nuz.com/recenze/vlastnosti-damasku/vlastnosti-damasku.php>.
- Požgaj, Alexander, a další. 1993. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava : PRÍRODA a. s., 1993. str. 485. ISBN 80-07-00600-1.
- Polák, Stanislav. 2018. *mezistromy. mezistromy.* [Online] 2018.  
<https://www.mezistromy.cz/ochrana-a-uprava-dreva/modifikacedreva/odborny>.
- Poncsák, Sándor a al., et. 2006. *Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch*. místo neznámé : Wood Science and Technology, 2006.
- Reinprecht, L. 2008. *Ochrana dreva*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1863.
- Reinprecht, Ladislav a Vidholdová, Zuzana. 2011. *Termodrevo*. Zvolen : Šmíra - print s.r.o., 2011. ISBN 978-80-87427-05-7.
- Úředníček, Luboš, Maděra, Petra a kolektiv. 2001. *Dřeviny České republiky*. Písek : Matice Lesnická, 2001. str. 333. ISBN 80-86271-09-9.

1997-1999. stromy.sk. *stromy.sk*. [Online] 1997-1999.

[http://stromy.wz.sk/topol\\_osika.htm](http://stromy.wz.sk/topol_osika.htm).

Svoboda, P. 1952. *Lesní dřeviny a jeho porosty: skripta k předmětu dendrologie*.

Praha : Státní pedagogické nakladatelství, 1952.

2003. Thermowood handbook. *International thermowood association*. [Online] 2003.

<https://www.thermowood.fi>.

*Thermowood*. Marek, Vlastimil. 1997-2017. 1997-2017, Prokom.

Tsoumis, George T. 1991. *Science and technology of wood: structure, properties, utilization*. New York : Van Nostrand Reinhold, 1991. ISBN 0442239858.