

# Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská  
Katedra základního zpracování dřeva



## **Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva břízy**

Bakalářská práce

Autor: Vojtěch Kanát  
Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D.

2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vojtěch Kanát

Dřevařství

Název práce

**Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva břízy**

Název anglicky

**Assessment of elasticity and strength properties of untreated and thermally modified birch wood**

---

### Cíle práce

1. Zhodnotit rázovou houževnatost, dynamický a statický modul pružnosti, pevnost v ohybu a tvrdost dřeva břízy, a to jak neupraveného (1. zkušební série vzorků), tak i termicky upraveného při teplotě 165 °C (2. série) a při teplotě 210 °C (3. série).
2. Posoudit i vliv hustoty a šířky letokruhů na posuzované vlastnosti.
3. Porovnat zjištěné hodnoty s dostupnými údaji v odborné literatuře.

### Metodika

1. Zpracovat literární rešerši o zkoumané dřevině, termické úpravě dřeva (termodřevu), hodnocených vlastnostech a o faktorech ovlivňujících jejich proměnlivost.
2. Zajistit reprezentativní vzorky dřeva břízy pro vykonání zkoušek a na relevantním počtu provedení termické úpravy.
3. Standardizovanými postupy na zkušebních tělesech stanovit rázovou houževnatost, dynamický a statický modul pružnosti, pevnost v ohybu, tvrdost a dále hustotu a šířku letokruhů jako faktory ovlivňující zkoumané vlastnosti.
4. Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě.

## Doporučený rozsah práce

35-45 stran textu

## Klíčová slova

dřevo břízy, termická úprava, vlastnosti, dynamický a statický modul pružnosti, rázová houževnatost, pevnost v ohybu, tvrdost

---

## Doporučené zdroje informací

- ČSN 49 0000: Názvoslovie v drevárskom priemysle. Všeobecné pojmy a vlastnosti dreva.  
ČSN 49 0103: Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach.  
ČSN 49 0108: Drevo. Zisťovanie hustoty.  
ČSN 49 0115: Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe.  
ČSN 49 0116: Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti pri statickom ohybe.  
Čunderlík, I. 2009. Štruktúra dreva. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 133 s. ISBN 978-80-228-2061-5.  
Dinwoodie, J. M. (2000). Timber: Its nature and behavior, Taylor & Francis New York, USA, 258 s. ISBN 0-419-25550-8.  
Gandelová a kol. (2009). Nauka o dřevě. 173 s. ISBN 978-80-7375-312-2.  
Horáček, P. (1998). Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 124 s. ISBN 80-7157-347-7.  
Kačíková, D., Kačík, F. (2011). Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011. 71 s. ISBN 978-80-228-2249-7.  
Požgaj, A. a kol. (1997). Štruktúra a vlastnosti dreva, Príroda a.s., Bratislava 1993, 485 s. ISBN 80-07-00600-1.  
Reinprecht, L., Vidholdová, Z. (2008). Termodrevo Príprava, vlastnosti a aplikácie, TU Zvolen 2008, ISBN 978-80-228-1920-6.  
Tsoumis, G. (1991). Science and technology of wood structure, properties, utilization. New York: Chapman and Hall, 497 s. ISBN 0-412-07851-1  
Wagenführ, R. (2000). Holzatlas. Leipzig: Fachbuchverlag, 707 s. ISBN 978-3446213906
- 

## Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FLD

## Vedoucí práce

Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

## Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

## Konzultant

doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 10. 5. 2016

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

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 1. 2017

**prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.**

Děkan

V Praze dne 20. 04. 2017

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva břízy“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vlastimila Borůvky, Ph.D. 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 20. 4. 2017

---

## Poděkování

Rád bych zde poděkoval Ing. Vlastimilu Borůvkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a také za shovívavost v případech pozdních příchodů. Dále děkuji Ing. Tomáši Holečkovi za zajištění zkušebních těles a pomoc a rady při měření.

# **Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva břízy**

---

## **Assessment of elasticity and strength properties of untreated and thermally modified birch wood**

### **Souhrn**

Tato práce přináší základní poznatky o změnách hustoty, vlhkosti a vybraných mechanických vlastností tepelně upravené břízy. Pevnost v ohybu, rázová houževnatost, statický a dynamický modul pružnosti a tvrdost byly zkoumány na třech sériích vzorků – neupravené (referenční), upravené při 165 °C a upravené při 210 °C. Kromě stupně úpravy byla také posouzena míra vlivu hustoty a šířky letokruhů testovaných vzorků na jednotlivé vlastnosti. Zjištěné výsledky byly vyhodnoceny, statisticky a graficky znázorněny. Mimo jiné bylo zjišťováno, zda a do jaké míry spolu jednotlivé vlastnosti korelují. V diskuzi jsou výsledky porovnány s údaji z dostupné literatury.

### **Summary**

This thesis brings basic information of the changes of density, moistness and selected mechanical properties of thermally modified birch. The thesis aims at testing static bending strength, impact bending strength, static and dynamic elasticity modulus and hardness on three sets of samples, one of them being raw (for reference) and the others modified (at 165 °C and 210 °C). It was necessary to consider not only the level of modification but also the influence of the degree of density and grown ring width on the properties tested. The final results were evaluated and both statistically and graphically presented. Furthermore, the attention was paid to mutual correlation of individual properties and to the degree of their prospective correlation. The discussion deals with the comparison of the conclusions arrived at with the data available from literature.

**Klíčová slova:** bříza, mechanické vlastnosti, termická modifikace, dřevo

**Keywords:** birch, mechanical properties, thermal modification, wood

# Obsah

1. ÚVOD	9
2. CÍL PRÁCE	10
3. ROZBOR PROBLEMATIKY	11
3.1. Bříza bělokorá	11
3.2. Vlastnosti posuzované v práci	11
3.2.1. Vlhkost	11
3.2.2. Hustota	13
3.2.3. Šířka letokruhů	13
3.2.4. Pružnost dřeva a modul pružnosti	15
3.2.5. Tvrdost	16
3.2.6. Pevnost v ohybu	17
3.2.7. Houževnatost	18
3.3. Termická úprava	18
3.3.1. Změny v upraveném dřevě	20
4. METODIKA	22
4.1. Příprava vzorků	22
4.2. Tepelná úprava vzorků	22
4.3. Měření	23
4.3.1. Hustota	23
4.3.2. Vlhkost	24
4.3.3. Dynamický modul pružnosti	24
4.3.4. Pevnost v ohybu a statický modul pružnosti	26
4.3.5. Houževnatost	27
4.3.6. Tvrdost	27
4.3.7. Měření šířky letokruhů	28
5. VÝSLEDKY A DISKUZE	29
5.1. Základní statistika	29

5.2.	Krabicové grafy	31
5.2.1.	Vlhkost	31
5.2.2.	Hustota	32
5.2.3.	Moduly pružnosti	33
5.2.4.	Pevnost v ohybu	34
5.2.5.	Houževnatost	36
5.2.6.	Tvrдость	37
5.3.	Korelace	39
5.3.1.	Hustota – tvrdost	39
5.3.2.	Hustota - pevnost v ohybu	40
5.3.3.	Hustota – houževnatost	40
5.3.4.	Šířka letokruhů	41
5.3.5.	Statický modul pružnosti – pevnost v ohybu	43
5.3.6.	Dynamický modul pružnosti – statický modul pružnosti	44
6.	ZÁVĚR	45
7.	POUŽITÉ ZDROJE	46
8.	SEZNAM GRAFŮ, OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH	48
9.	PŘÍLOHY	51



# 1. Úvod

Dřevo jako materiál má mnoho výhodných vlastností, pro které je hojně využíváno v mnoha odvětvích lidské činnosti od výroby energie přes použití na nábytek až po konstrukce domů. Na druhou stranu má i své nevýhody dané především svým chemickým složením a mikroskopickou a makroskopickou stavbou. Ty se projevují mimo jiné schopností ze vzduchu přijímat a zase zpět do něj odevzdávat vzdušnou vlhkost – hygroskopicitou a s ní spojeným bobtnáním a sesycháním. Zvýšená vlhkost přináší nebezpečí napadení houbami a hmyzem. I samotné vystavení dřeva zvýšené vlhkosti, ať už stálé nebo cyklicky se měnící, zkracuje životnost výrobku ze dřeva. Také nehomogenní anizotropní struktura dřeva je faktorem, který omezuje některé případy jeho použití. Za účelem odstranění negativních vlastností dřeva, nebo alespoň jejich výrazného omezení, se dřevo vždy nějak upravovalo. V dnešní době převládá aplikace nátěrových hmot na povrch výrobku, případně impregnace. Vlastnosti dřevěného výrobku se dají ovlivnit i jinými postupy, jako je například modifikace dřeva chemickou či fyzikální cestou. Do této kategorie spadá i thermowood – tepelná úprava za teplot, při kterých dochází k chemickým změnám uvnitř dřeva. Tato technologie částečně potlačuje některé negativní vlastnosti – zejména přijímání vzdušné vlhkosti a s ním spojenou změnu rozměrů. Také vylepšuje již poměrně dobrou tepelnou vodivost, respektive nevodivost dřeva. Daní za to je snížení většiny pevnostních vlastností takto upraveného materiálu. Tím je také částečně omezený rozsah použití thermowoodu, zejména v oblasti nosných konstrukcí. Míra změn je dána především teplotou (stupněm) úpravy a také použitou dřevinou. Právě posouzení těchto změn u dřeva břízy v závislosti na stupni úpravy je předmětem této práce.

## **2. Cíl práce**

Cílem této bakalářské práce bylo zhodnotit rázovou houževnatost, dynamický a statický modul pružnosti, pevnost v ohybu a tvrdost dřeva břízy, a to jak neupraveného (1. zkušební série vzorků), tak i termicky upraveného při teplotě 165 °C (2. série) a při teplotě 210 °C (3. série). Dále provést posouzení vlivu hustoty a šířky letokruhů na posuzované vlastnosti a porovnat zjištěné hodnoty s dostupnými údaji v odborné literatuře.

## **3. Rozbor problematiky**

### **3.1. Bříza bělokorá**

Bříza, latinsky *betula*, je roztroušeně pórovitá listnatá dřevina. Má bělavou barvu se žlutým nebo načervenalým nádechem, nemá znatelné jádro. Dřevo je středně tvrdé, v anglicky psané literatuře se zařazuje do kategorie *hardwood*. Hustota při 12% absolutní vlhkosti se pohybuje okolo  $640 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . (Zeidler, 2012; Horáček, 1998; Požgaj, 1993)

Existuje přibližně 120 druhů břízy, šest druhů roste na území České republiky. V současnosti bříza představuje 2,9 % ze všech druhů, zatímco původní (a také doporučené) zastoupení je 0,8 %. Bříza je světlomilná dřevina, pionýrská – obsazuje holé plochy. Klimaticky velice univerzální rostlina s velkým rozšířením. Vyskytuje se téměř v celé Evropě, na severu zasahuje až k polárnímu kruhu, na východě k Ochotskému moři. (Musil, 2005)

Vzorky pro tento výzkum pocházejí z břízy bělokoré.

### **3.2. Vlastnosti posuzované v práci**

#### **3.2.1. Vlhkost**

Dřevo je materiál schopný přijímat nebo odevzdávat vodu do okolního prostředí. Díky této vlastnosti můžeme říct, že dřevo má určitou vlhkost. Tato vlastnost je důležitá v mnoha ohledech. V závislosti na vlhkosti se mění hustota dřeva, bobtnáním či sesycháním se mění jeho rozměry a obsah vody ve dřevě také více či méně významně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Nepřímo také ovlivňuje pravděpodobnost napadení biotickými škůdci. To vše je dáno stavbou dřeva a jeho chemickým složením.

Vodu ve dřevě rozdělujeme do tří skupin: chemicky vázaná, vázaná a volná. Chemicky vázaná voda je součástí chemických sloučenin dřeva, odstranit ji lze pouze spálením. Vázaná voda je obsažena v buněčných stěnách a má největší vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti. Od bodu nasycení vláken (BNV), který se pohybuje okolo 30 %, výše přibývá voda volná. Ta vyplňuje lumeny buněk a mezibuněčné prostory. Také

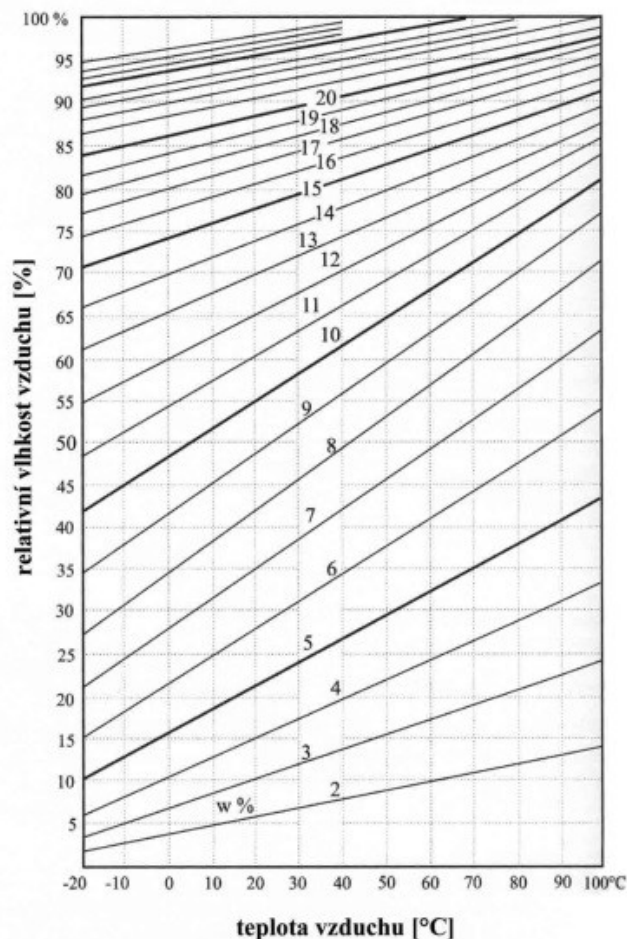
ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti, ale ne tak významně jako voda vázaná. Na rozměrové změny nemá vliv.

Volná voda se vyskytuje ve dřevě rostoucího stromu a může se vyskytovat i ve vytěženém dřevě. Do dřeva se ale může dostat pouze z vody v kapalném stavu. Vzdušnou vlhkost přijímá dřevo pouze do BNV. Výsledná vlhkost materiálu v prostředí se stabilními podmínkami je ovlivněna nejen relativní vzdušnou vlhkostí, ale také teplotou. Významná hodnota absolutní vlhkosti je 12 %. Té by mělo dřevo dosáhnout po dlouhodobé klimatizaci při 20 °C a 65 % relativní vzdušné vlhkosti. Ostatní případy ukazuje graf č. 1

Rozlišujeme absolutní a relativní vlhkost dřeva. Relativní vlhkost je vyjádřena poměrem hmotnosti vody a mokrého dřeva, zatímco absolutní vlhkost je vyjádřena poměrem hmotnosti vody a absolutně suchého dřeva. Absolutní vlhkost se používá při měření fyzikálních a mechanických vlastností dřeva, v celé práci je tudíž pod pojmem „vlhkost“ myšlena ta absolutní. (Požgaj, 1993; Horáček, 1998; Gandelová, 2009)

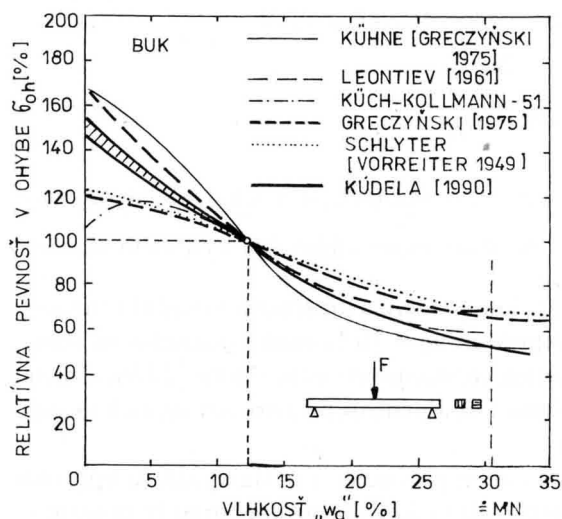
### Vliv vlhkosti na mechanické vlastnosti

Jak již bylo řečeno, změny vlhkosti ovlivňují fyzikální vlastnosti. Obecně se dá konstatovat, že se zvyšující se vlhkostí se snižuje pevnost dřeva. Změny pevnosti mají nelineární průběh. V rozmezí od 0 % do BNV znamená rozdíl 1 % vlhkosti změnu pevnosti dřeva o 2,5-3,5 %. Celkový pokles činí 30-70 %.



**Graf 1:** Absolutní vlhkost dřeva v závislosti na teplotě vzduchu a relativní vzdušné vlhkosti (Borůvka, 2016)

Naproti tomu moduly pružnosti dřeva se mění lineárně, o 1,5-2 % na každé procento změny vlhkosti dřeva. To platí opět pro rozsah změn vázané vody. (Požgaj, 1993)



**Graf 2:** Závislost relativní meze pevnosti v ohybu bukového dřeva na vlhkosti (Požgaj, 1993)

### 3.2.2. Hustota

Hustota patří mezi základní fyzikální vlastnosti posuzované při zkoumání dřeva. Je ovlivněna vlhkostí dřeva. Pro většinu dřevin platí, že čím vyšší vlhkost, tím vyšší je jejich hustota. Proto se taky rozlišují podmínky, za kterých je uvedená hustota stanovena. Nejčastěji rozlišujeme tři základní stavy:

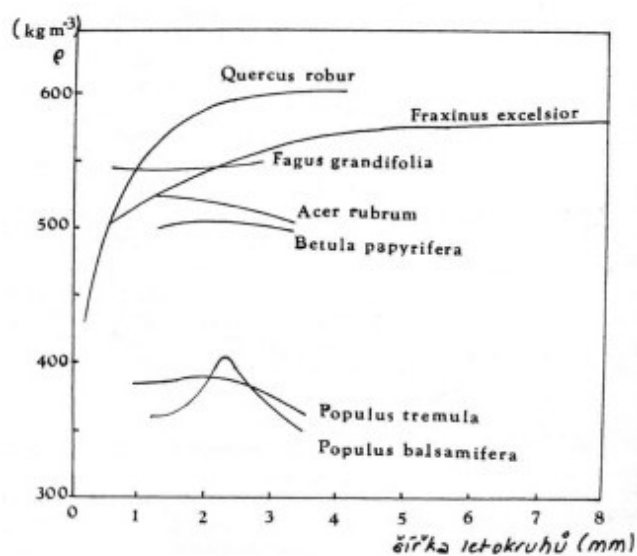
1. hustota v absolutně suchém stavu
2. hustota při 12% vlhkosti
3. hustota vlhkého dřeva

Jednotky používané v souvislosti se dřevem jsou  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

### 3.2.3. Šířka letokruhů

Letokruhy tvoří přírůstové vrstvy dřeva. Dřevo přirůstá periodicky (v našich podmínkách tvoří periody jednotlivé roky) a tyto přírůstky jsou v závislosti na dřevině více či méně výrazně pozorovatelné jako soustředné kruhy se středem v dřeni. Každý letokruh je tvořen tzv. jarním a letním dřevem. Jehličnaté dřeviny mají mezi jarním a letním dřevem výrazný přechod. Listnaté dřeviny dělíme do dvou skupin podle výraznosti letokruhů na kruhovitě pórovité a roztroušeně pórovité. (Balabán, 1955)

Šířka letokruhů závisí na dřevině, poloze ve stromu a na mnoha vnějších faktorech. Nejširší jsou v horní části stromu, v kmenové části jsou letokruhy užší. Tyto základní parametry jsou vždy ovlivněny vnějšími podmínkami. Obtížnější růstové podmínky znamenají užší letokruhy. Málo světla a prostoru v zápoji, půda se nízkým obsahem živin, vyšší míra sucha, horské oblasti a další, pro růst negativní, faktory způsobují užší letokruhy. (Balabán, 1955)



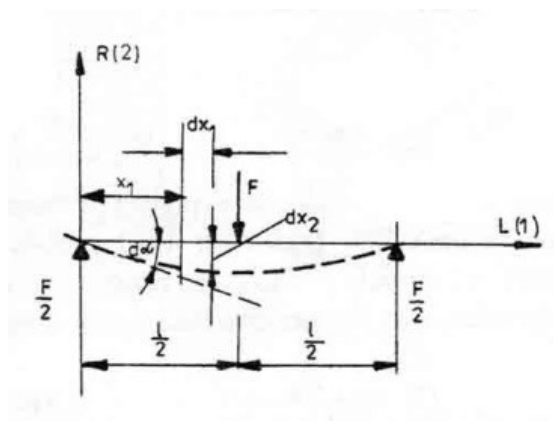
**Graf 3:** Závislost hustoty dřeva na šířce letokruhů vybraných dřevin  
(Gandelová, 2009)

Šířka letokruhů a podíl letního dřeva ovlivňuje pevnost dřeva jako celku. Obecně se dá konstatovat, že čím vyšší podíl letního dřeva letokruh obsahuje, tím je materiál pevnější. Každá dřevina má své rozmezí ideální šířky letokruhů, ve kterém jsou pevnostní vlastnosti nejlepší. Překročení tohoto rozmezí, ať už na jednu nebo druhou stranu, má za následek snížení pevnosti. U jehličnatých dřevin se se zvyšující šířkou letokruhů mechanické vlastnosti snižují, u kruhovitě pórovitých naopak zvyšují. U roztroušeně pórovitých není souvislost šířky letokruhů a mechanických a fyzikálních vlastností výrazná a jednoznačná jako u jehličnanů a roztroušeně pórovitých listnáčů. (Dinwoodie, 2000; Gandelová, 2009; Požgaj, 1993)

### 3.2.4. Pružnost dřeva a modul pružnosti

Pružnost charakterizuje schopnost dřeva vrátit se do původního tvaru poté, co na něj přestane působit vnější síla, která způsobuje deformaci. O pružnosti můžeme mluvit, pokud jsou deformace vratné – předmět se musí vrátit do původního tvaru. Z makroskopického pohledu nedochází k problému. Od submikroskopického stupně dál se může stát, že nenastane návrat úplně do stavu, jako před působením síly na předmět. (Gandelová, 2009)

Míru odporu materiálu proti pružné deformaci vyjadřuje modul pružnosti. Ke způsobení deformací u materiálů s vyšším modulem pružnosti je třeba většího napětí. Používají se dva moduly: E – modul pro normálová namáhání, tj. tah, tlak a ohyb, a G – pro namáhání tangenciální, tj. smyk a krut. V této práci se zabýváme pouze modulem pružnosti pro ohyb, tudíž dále budeme zacházet pouze s modulem E. (Požgaj, 1993)



Obrázek 1: Čistý ohyb (Požgaj, 1993)

Pro výčet modulu pružnosti ve statickém ohybu by se v našem případě nejvíc hodil vzorec

$$E = \frac{Fl_0^3}{4bh^3\Delta y}$$

F – působící síla [N]

$l_0$  – vzdálenost podpěr [mm]

b – šířka zkušební tělesa [mm]

h – výška zkušební tělesa [mm]

$\Delta y$  – průhyb tělesa (Gandelová, 2009)

Tento vzorec platí pro pravoúhlý průřez zkušební tělesa. Reálně jsme však v měření dostali statický modul vypočítaný zkušebním strojem.

Ke zjištění dynamického modulu se využívají ultrazvukové vlny a měření času jejich průchodu materiálem. Všechny vady jako suky a trhliny, změny hustoty, či napadení biotickými škůdci výrazně ovlivňují rychlost průchodu ultrazvukového vlnění. V osmdesátých a devadesátých letech dvacátého století byly v této oblasti provedeny četné výzkumy. Ve všech případech byla zjištěná dobrá závislost mezi pevností materiálu a rychlostí průchodu ultrazvukové vlny. (Kloiber, 2006)

### 3.2.5. Tvrdost

Tvrdost představuje schopnost odolávat vniknutí cizího předmětu do materiálu. Je také velice důležitým faktorem ovlivňující náročnost a způsob obrábění dané dřeviny. Tvrdost dřeviny je na různých plochách rozdílná (radiální, tangenciální, příčné). Existuje několik způsobů stanovení tvrdosti. Jednotlivé metody se liší vhodností pro použití na různé materiály – zejména co se rozsahu tvrdosti týká. Využívané metody se také měnily v průběhu vývoje. V neposlední řadě ovlivňuje použití konkrétní metody i jednoduchost stanovení tvrdosti. V oblasti zkoušení dřeva se používají převážně tyto dvě metody: Jankova a Brinellova. (Požgaj, 1993; Gandelová, 2009)

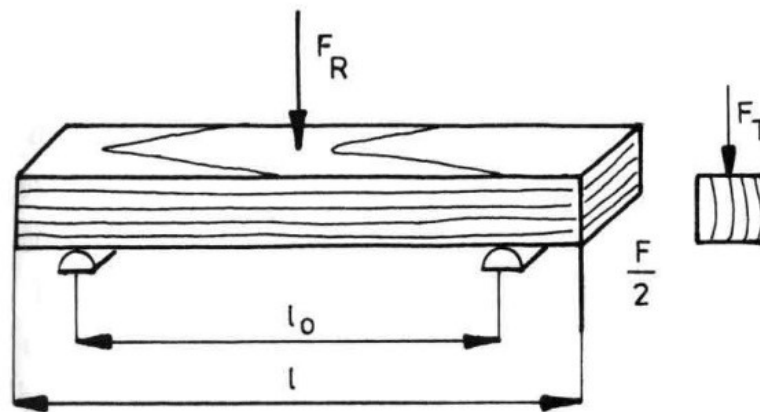


**Obrázek 2:** Tvrdoměr Duravision



### 3.2.6. Pevnost v ohybu

Ohyb patří mezi základní typy namáhání a schopnost dřeva mu odolávat je při praktickém využití velice důležitá. Může se jednat o nosníky v konstrukcích mostů a krovů, sedací nábytek, ale i obyčejné police na knihy. Při posuzování ohybu řešíme pouze situaci, kdy síla působí napříč vláken (v tangenciálním nebo radiálním směru) a vlákna jsou orientována rovnoběžně s podélnou osou zkušebního tělesa. Pokud jsou vlákna kolmo k podélné ose tělesa, pevnost v ohybu klesá na 5-10 % z původní hodnoty. Rozměry běžně využívaného řeziva navíc většinou ani nedávají příležitost k ohybu takovým způsobem. (Požgaj, 1993)



**Obrázek 3:** Způsob zatížení zkušebního tělesa při ohybové zkoušce (Požgaj, 1993)

Obvykle se pevnost v ohybu testuje v tangenciálním směru. Rozdíl v pevnosti dřeva je výraznější u jehličnanů – tangenciální pevnost je o 10-12 % větší než radiální pevnost. Pro listnaté dřeviny jsou hodnoty v obou směrech téměř totožné, rozdíly jsou maximálně 2-4 %.

Při namáhání dřeva na ohyb působí na dřevo dvě různá namáhání. Přibližně uprostřed testovaného tělesa je tzv. neutrální osa. Na stranu k zatěžující síle je dřevo namáháno tlakem, na druhou stranu od osy je namáháno tahem. První deformace probíhají v místě působení zatěžující síly (podél vláken má dřevo menší pevnost v tlaku než v tahu), které ale nejsou příliš vizuálně výrazné. Konečné porušení materiálu se obvykle děje

v tahové oblasti. Průměrná hodnota pevnosti v ohybu pro břízu je při 12% vlhkosti 110 MPa. (Gandelová, 2009; Požgaj 1993)

### 3.2.7. Houževnatost

Houževnatost dřeva vyjadřuje jeho schopnost absorbovat práci, kterou vykonává rázový ohyb. Míru houževnatosti lze také odhadnout podle struktury lomu. Čím je dřevo houževnatější, tím více je zlom tvořen vytrhanými třískami, má vláknitý charakter. Dřeva s nízkou houževnatostí mají naopak tupý zlom.

Spojitosť mezi pevností ve statickém ohybu a rázovou houževnatostí není nutná. Některé dřeviny jsou křehké, ale jejich pevnost ve statickém ohybu je velká. Rozdíl mezi pevností v tangenciálním a radiálním směru závisí na typu dřeviny. Pro jehličnaté s jádrem a kruhovitě pórovité je rozdíl ve prospěch radiálního směru značný (o 25-50 % větší), pro roztroušeně pórovité dřeviny je houževnatost shodná v obou směrech. Taktéž je listnaté dřevo 1,5 až 2,5krát houževnatější než dřevo jehličnatých stromů. (Požgaj, 1993)

## 3.3. Termická úprava

Termická úprava má dlouhou historii použití. Již staří Vikingové na některé exteriérové aplikace využívali dřevo opalované plamenem. Ve třicátých letech dvacátého století začala být tepelná úprava dřeva zkoumána v Německu. V druhé polovině dvacátého století probíhaly další výzkumy, přičemž nejrozsáhlejší byl veden ve Finsku v devadesátých letech. Tam také nyní sídlí Mezinárodní asociace Thermowoodu. Rozsáhlý výzkum vedený v oblasti termické úpravy dřeva objasnil mnoho aspektů, ale některé zásadní otázky (například výsledné vlastnosti rozměrnějších dílců) stále nejsou dostatečně prozkoumány. (Thermowood handbook, 2010)

Termicky upravené dřevo se připravuje za přesně daných podmínek, přičemž je zapotřebí pouze energie a voda. Při přípravě nejsou používány žádné chemikálie. Proces úpravy se skládá ze tří částí:

1. **Ohřátí a sušení.** Materiál se ohřeje na přibližně 100 °C a následně suší horkým vzduchem při cca 130 °C. Nutná je přítomnost vodní páry, která brání nerovnoměrnému vysoušení, které by mohlo mít za následek praskliny.

V této fázi je spotřebováno cca 80 % z celkového spotřebovaného množství za celý proces úpravy.

2. **Samotná úprava.** Po vysušení materiálu je teplota zvýšena na 160-215 °C. V této fázi probíhá hlavní část změn v materiálu. Zvolená teplota závisí na vlastnostech, které požadujeme od konečného výrobku, a také na upravované dřevině. Obecně platí, že čím vyšší teplota je zvolena, tím výraznější změny ve dřevě probíhají. Na výsledném použití také závisí délka trvání této fáze, která se pohybuje v rozmezí 2-3 hodin.
3. **Ochlazení a klimatizace.** Po ukončení druhé fáze je pomocí vodní páry snížena teplota na 80-90 °C a materiál je klimatizován. Je třeba dosáhnout běžné vlhkosti, kterou bude mít termodřevo za běžných podmínek. Ta závisí na stupni (teplotě) úpravy. Pro 165 °C můžeme uvažovat cca 10 % absolutní vlhkosti, u 215 °C přibližně 4 %.

Proces termické úpravy může být proveden na již vysušeném dřevě, ale také na čerstvém dřevě s vysokou vlhkostí. Tomu je samozřejmě třeba přizpůsobit dobu trvání první fáze a zvlhčování během ní. Množství spotřebované energie je o pouze 25 % vyšší než u samotného vysušení. (Thermowood handbook, 2010)

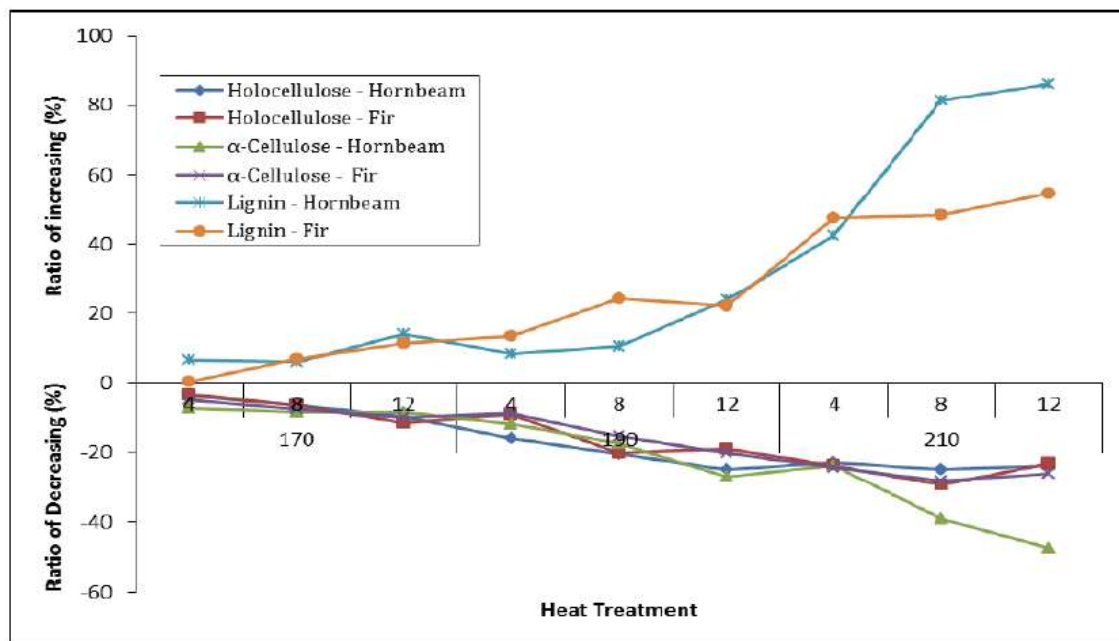


**Obrázek 4:** Termokomora (Holeček, 2016)

### 3.3.1. Změny v upraveném dřevě

Základní složky dřeva celulóza, hemicelulóza a lignin reagují v důsledku rozdílného chemického složení a stavby na vysokou teplotu různě. Dřevo je přibližně z 45–50 % tvořeno celulózou, 20–35 % hemicelulózou a 20–30 % ligninem. Hodnoty závisí na dřevině a především u ligninu se mohou hodně lišit. Při teplotách do 150 °C dochází převážně k sušení dřeva, chemické změny nejsou příliš významné. (Thermowood handbook, 2010)

Jako první se rozkládají **hemicelulózy**. Je to dáno nižším polymerizačním stupněm (obvyklé rozmezí 100-200), rozvětvenou strukturou a nižším podílem krystalické části. Významné změny v hemicelulóze začínají probíhat při 150 °C a se stoupající teplotou pokračují. Tím dochází ke snížení hygroskopicity a v souvislosti s tím i zmenšení rozměrových změn. Vylepšuje se také odolnost proti biotickým škůdcům, jelikož velká část z nich napadá primárně právě hemicelulózu. Tím, že hemicelulóza není kritická pro pevnost dřeva, její rozklad při teplotách okolo 160 °C nepůsobí příliš výrazné snížení pevnostních vlastností. V některých případech se mohou v důsledku snížení vlhkosti dřeva po úpravě některé mechanické vlastnosti mírně zlepšit. Udávaná teplota pro rozklad hemicelulózy se pohybuje v rozmezí 200-260 °C. (Kačík, 2010; Thermowood handbook, 2010)



Graf 4: Chemické změny v tepelně upraveném dřevě jedle a habru (Tumen, 2010)

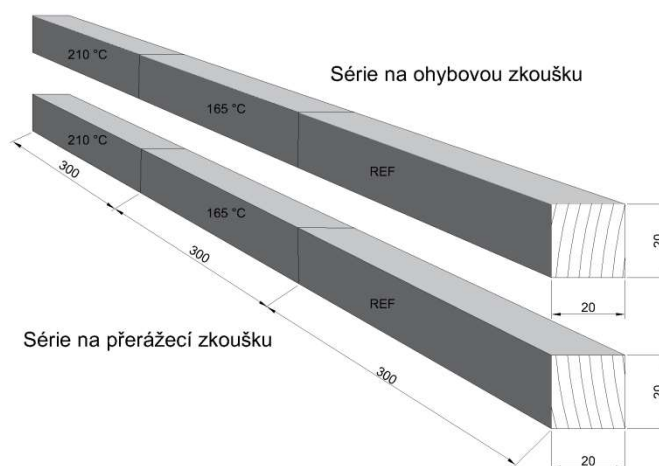
**Celulóza** se začíná rozkládat později. Je to pravděpodobně vyšším polymerizačním stupněm, ten se pohybuje v rozmezí 5-14 tisíc. Část celulózy je také v krystalické formě, která je obecně lépe odolnější. Při působení tepla se celulóza depolymerizuje v konečné fázi až na polymerizační stupeň cca 170. Nejprve se rozkládá amorfní část. Teplota pro rozklad celulózy se udává 240-350 °C. Masivní rozklad celulózy by ale znamenal podstatné snížení pevnosti dřeva. To nám určuje horní teplotní hranici použitelnosti termické úpravy. (Gandelová, 2014; Kačík, 2010; Thermowood handbook, 2010)

**Lignin** ve dřevě plní především mechanickou funkci. Lignin z velké části tvoří střední lamelu, která spojuje jednotlivé buňky. Po vytvoření celulózové kostry dojde díky ligninu k zdřevnatění (lignifikaci). Tím získává dřevo svou konečnou pevnost. Lignin je ze všech tří základních složek dřeva nejodolnější a při teplotách běžně používaných pro tepelnou úpravu dřeva nedochází k jeho podstatné degradaci. (Gandelová, 2014; Gandelová, 2009; Kačík, 2010)

## 4. Metodika

### 4.1. Příprava vzorků

Vzorky byly připraveny dle normy ČSN 49 101. Materiál byl rozřezán na 180 vzorků, které byly rozděleny do tří skupin určených pro jednotlivé stupně úpravy. Každá z těchto skupin byla navíc rozdělena na dvě série. Jedna určená pro přerážecí zkoušku, druhá pro ohybovou zkoušku. Vzorky jsou spárovány tak, aby vzorky se stejným číslem v rámci série byly původně v rostlém dřevě vedle sebe. Naopak vzorky do jednotlivých skupin podle stupně úpravy byly v rostlém dřevě ve směru vláken za sebou. Systém pořezu znázorňuje obr. 5.

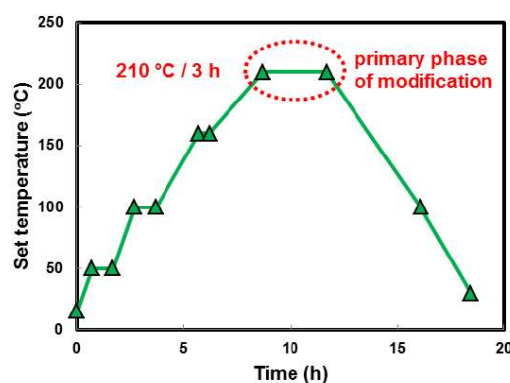
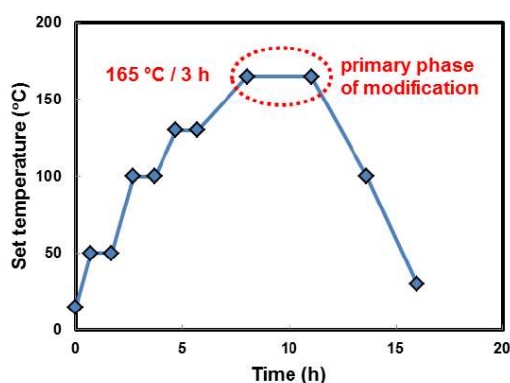


**Obrázek 5:** Systém pořezu materiálu na zkušební tělesa

### 4.2. Tepelná úprava vzorků

Po rozřezání na požadované rozměry následovala tepelná úprava. Jedna třetina vzorků byla upravena při 165 °C, druhá při 210 °C, třetí zůstala bez úpravy a sloužila jako referenční hodnota.

Úprava probíhala ve stroji od firmy Katres postupem popsáním v patentu EP-0759137. (Viitaniemi, 1998) Průběh úpravy při 165 °C respektive 210 °C přibližují grafy 5.



**Graf 5:** Průběh tepelné úpravy při 165 °C (vlevo), při 210 °C vpravo  
(Borůvka, 2015)

### 4.3. Měření

Měření probíhalo v laboratořích Fakulty lesnické a dřevařské. Měření rozměrů probíhalo digitálním posuvným měřítkem zn. Kinex s přesností 0,01 mm. K určování hmotnosti byly použity digitální váhy s přesností 0,01 g. Všechny vlastnosti byly měřeny na vzorcích klimatizovaných při 20 °C a 65% vzdušné vlhkosti. To znamená přibližně 12 % absolutní vlhkosti neupraveného dřeva. Jelikož upravené vzorky neodpovídají běžným principům nasakování vlhkosti, nebyly naměřené hodnoty přepočítávány pro 12 % vlhkost.

#### 4.3.1. Hustota

Práce probíhaly dle normy ČSN 49 0108. Hustota vyjadřuje hmotnost vztaženou k jednotce objemu. Hmotnost se zjišťuje vážením, objem měřením rozměrů. Při dané vlhkosti se počítá podle vzorce

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$$

$m_w$  – hmotnost vzorku v a.s. stavu [g]

$V_w$  – objem vzorku v a.s. stavu [cm<sup>3</sup>]

(Požgaj, 1993)

### 4.3.2. Vlhkost

Pro zjištění vlhkosti byla použita metoda popsaná v normě ČSN 49 0103. Testované vzorky byly zváženy po klimatizaci na testovací podmínky. Po provedení měření byly vzorky vysušeny v sušárně při  $103 \pm 2$  °C do absolutně suchého stavu. Výpočtem byla zjištěna vlhkost dřeva při měření. Absolutní vlhkost dřeva se vypočítá dle vztahu

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

$m_w$  – hmotnost vlhkého dřeva [g]

$m_0$  – hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu [g]

(Horáček, 1998)

### 4.3.3. Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti byl zjišťován na tělesech o rozměrech 300x20x20 mm. Pomocí přístroje FAKOPP s přítlačnými sondami byl změřen čas průchodu ultrazvukového signálu vzorkem a následně pomocí vzorce spočítán dynamický modul pružnosti.



**Obrázek 6:** Fakopp Ultrasonic timer (<http://fakopp.com/product/ultrasonic/>)

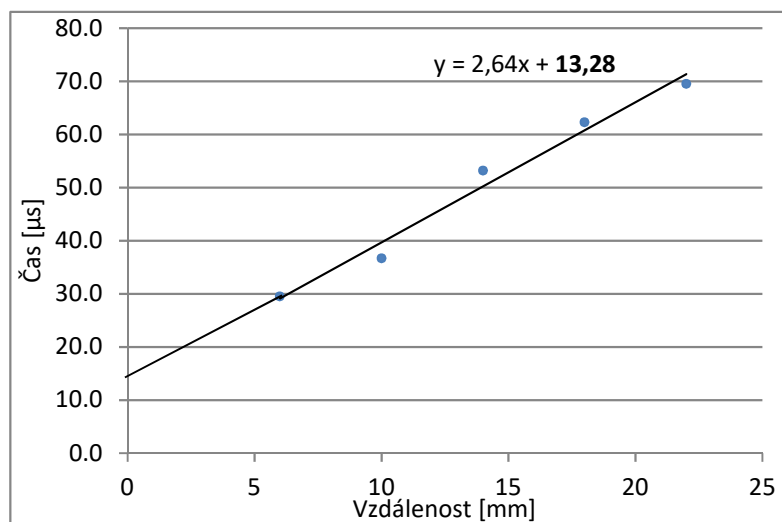


### FAKOPP Ultrasonic timer

FAKOPP Ultrasonic timer je přístroj, který měří čas s přesností na desetinu mikrosekundy. Kromě zjišťování modulu pružnosti se používá například k detekci vad v materiálu. K přístroji jsou připojeny dvě sondy, které se přiloží na testovaný materiál. Jednou za dvě sekundy je generován ultrazvukový impulz, ve stejnou chvíli začne přístroj měřit čas. Ve chvíli, kdy druhá sonda přijme impulz, přístroj vypíše čas potřebný k přenosu signálu. (uživatelská příručka FAKOPP Ultrasonic timer)

### Korekce nulové vzdálenosti

Naměřený čas průchodu ultrazvukového impulzu zahrnuje i čas průchodu sondami, přístrojem samotným a další nepřesnosti. Z toho důvodu je třeba provádět korekci nulové vzdálenosti. Ta se dá provést následujícím způsobem: měří se časy průchodu impulzu ve vzdálenostech sond 6, 10, 14, 18, 22 cm od sebe navzájem. Naměřené časy jsou vyneseny do grafu v závislosti na vzdálenosti. Následně je řadou bodů proložena přímka. Hodnota, ve které přímka protne osu y, je hledaná hodnota pro korekci nulové vzdálenosti. Tuto hodnotu také získáme použitím funkce INTERCEPT v programu MS Excel. Vzhledem k velkému počtu měření byla zvolena druhá varianta. Proložení přímky bylo použito pro kontrolu získaných hodnot. Korekce byla provedena na všech měřených vzorcích. (uživatelská příručka FAKOPP Ultrasonic timer)



**Graf 6:** Příklad korekce nulové vzdálenosti

### Výpočet dynamického modulu pružnosti

Z času získaného přístrojem FAKOPP vypočítáme rychlost průchodu vyslaného impulzu podle vzorce

$$v = \frac{1000 \cdot l}{t - k} [m \cdot s^{-1}]$$

$l$  – vzdálenost sond od sebe [mm]

$t$  – čas průchodu impulzu [ $\mu$ s]

$k$  – korekce nulové vzdálenosti [ $\mu$ s]

Rychlost šíření zvuku ve dřevě se dá také vypočítat pomocí vztahu

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

$c$  – rychlost šíření zvuku

$E$  – modul pružnosti [MPa]

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

Po úpravě získáme vztah pro výpočet modulu pružnosti

$$E = c^2 \cdot \rho [MPa]$$

(Kloiber, Koltýnová; 2006)

#### 4.3.4. Pevnost v ohybu a statický modul pružnosti

Pevnost v ohybu a statický modul pružnosti byly zjišťovány třibodovým ohybem. Kromě tohoto parametru probíhala zkouška podle normy ČSN 49 0115 respektive ČSN 49 0116. Měření probíhalo pomocí stroje UTS 50 se softwarem TIRA. Současně byl také zjištěn statický modul pružnosti.

##### Pevnost v ohybu

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

$F_{max}$  – maximální zatížení [N]

$l$  – vzdálenost mezi podpěrami [mm]

$b, h$  – příčné rozměry zkoušeného tělesa [mm]

Tento vztah je částečně zjednodušen, protože počítá s lineárním průběhem napětí v celém rozsahu k mezi pevnosti. Výpočet podle skutečného průběhu by ale byl pro využití v praxi příliš složitý. (Gandelová, 2009)

#### 4.3.5. Houževnatost

Stanovení houževnatosti (přerážecí práce) probíhá podle normy ČSN 49 0117. Normalizovaná zkušební tělesa o rozměrech 300x20x20 mm jsou přerážena pomocí Charpyho kladiva. Po změření přesných příčných rozměrů v místě budoucího přeražení (uprostřed) je vzorek uložen na podpěry vzdálené od sebe 240 mm tak, aby přerážecí kladivo dopadlo na radiální plochu. Přerážení tedy probíhá v tangenciálním směru. Na připravený vzorek je spuštěno kladivo, které při úspěšném přeražení ztratí část své energie a pokračuje dále v kyvu. Podle délky kyvu, a tedy i množství zbylé energie, je vychýlen ukazatel na stupnici.

Měření bylo provedeno na kladivu s energií 50 J. Jen v několika případech neupraveného dřeva nestačila energie na úplné přeražení vzorku.

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

W – práce spotřebovaná na přeražení tělesa [J]

b, h – příčné rozměry tělesa v místě přeražení [mm]

(Požgaj, 1993; Lokaj, 2010)

#### 4.3.6. Tvrdost

V této práci byla ke zkoumání tvrdosti vzorků použita Brinellova metoda. Při zkoušce se zatlačuje ocelová kulička o průměru 10 mm danou silou (v rozmezí od 100 N do 1000 N podle tvrdosti testované dřeviny) a zkoumáme, jak velký otlak kulička ve dřevě zanechala. Výslednou tvrdost spočítáme podle následujícího vzorce:

$$H_B = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} [MPa]$$

F – síla působící na kuličku [N]

D – průměr kuličky [mm]

d – průměr otláčené plochy ve dřevě [mm]

Tvrdost byla měřena na přístroji Duravision. Na základě otestování několika vzorků z každé série byla zvolena síla 250 N. Na každém vzorku o rozměrech 30x20x20 mm byla tvrdost změřena na obou radiálních i obou tangenciálních plochách. Tvrdoměr vypíše

hodnotu v  $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ , tu je třeba vynásobit tíhovým zrychlením. Tím dostaneme tvrdost v MPa podle Brinella.

#### 4.3.7. Měření šířky letokruhů

Ke stanovení šířky letokruhů byly naskenovány vzorky z čelní plochy na stolním skeneru. V programu NIS Elements proběhlo samotné vyhodnocování. Na každém zkušebním tělese byly změřeny šířky všech celých letokruhů nacházejících se na příčném řezu. Výstup z programu tvoří medián šířky letokruhů na jednom vzorku a směrodatná odchylka vyjádřené v počtu obrazových bodů. Hodnoty v milimetrech získáme přepočtením podle vztahu

$$l = \frac{px \cdot 25,4}{dpi} [\text{mm}]$$

$l$  – šířka letokruhu [mm]

$px$  – počet obrazových bodů

$dpi$  – rozlišení snímku pořízeného skenerem



**Obrázek 7:** Vzorek naskenovaný k měření šířky letokruhů

## 5. Výsledky a diskuze

V této kapitole se nacházejí výsledky provedených měření ve třech formách zpracování. První jsou jednoduché statistické tabulky se základním přehledem hodnot jednotlivých vlastností ve formě průměru, směrodatné odchylky a variačního koeficientu. Následují krabicové grafy se sledovanými vlastnostmi v závislosti na stupni úpravy, kde je poměrně dobře vidět jejich vývoj. Ke zjištění souvislostí mezi vlastnostmi byly přidány grafy korelací, které tvoří třetí část. Nachází se tam pouze ty grafy, které přinášejí zajímavé informace, a také ty, na kterých jsou obsaženy vztahy mezi vlastnostmi danými v cíli práce. Zbytek grafů lze nalézt v příloze.

### 5.1. Základní statistika

**Tabulka 1:** Základní statistika referenční série

Neupravená (referenční) série				
		průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient
Absolutní vlhkost	[%]	12,4	0,85	0,07
Hustota	[g.cm <sup>-3</sup> ]	0,645	0,04	0,06
Statický modul pružnosti	[MPa]	7052	2098	0,30
Dynamický modul pružnosti	[MPa]	9368	3174	0,34
Pevnost v ohybu	[MPa]	69	23	0,34
Houževnatost	[J*cm <sup>-2</sup> ]	8,3	3,6	0,43
Tvrдость	radiální plocha [MPa]	20,9	8,0	0,38
	tangenciální plocha [MPa]	30,2	12,9	0,43

**Tabulka 2:** Hodnoty z literatury pro neupravené vzorky (Požgaj, 1993; Gandelová, 2009; Heräjärvi, 2001)

Neupravené březové dřevo (výběr z literatury)		
Absolutní vlhkost	[%]	12,0
Hustota	[g.cm <sup>-3</sup> ]	0,640
Modul pružnosti	[MPa]	16820
Pevnost v ohybu	[MPa]	127
Houževnatost	[J*cm <sup>-2</sup> ]	8,3
Tvrдость	radiální plocha [MPa]	19,5
	tangenciální plocha [MPa]	23,5

Pokud porovnáme průměrné naměřené hodnoty s dostupnou literaturou, zjistíme, že většina hodnot souhlasí, ale modul pružnosti a pevnost v ohybu se výrazně odlišují. I v případě, že vezmeme hodnoty z jiného zdroje, například Wood handbook, stále jsme výrazně pod udávaným modulem (11 000 MPa respektive 13 900 MPa). Stejně tak pevnost v ohybu, v našem měření je téměř na polovině hodnot nalezených v literatuře.

**Tabulka 3:** Základní statistika série prvního stupně úpravy (165 °C)

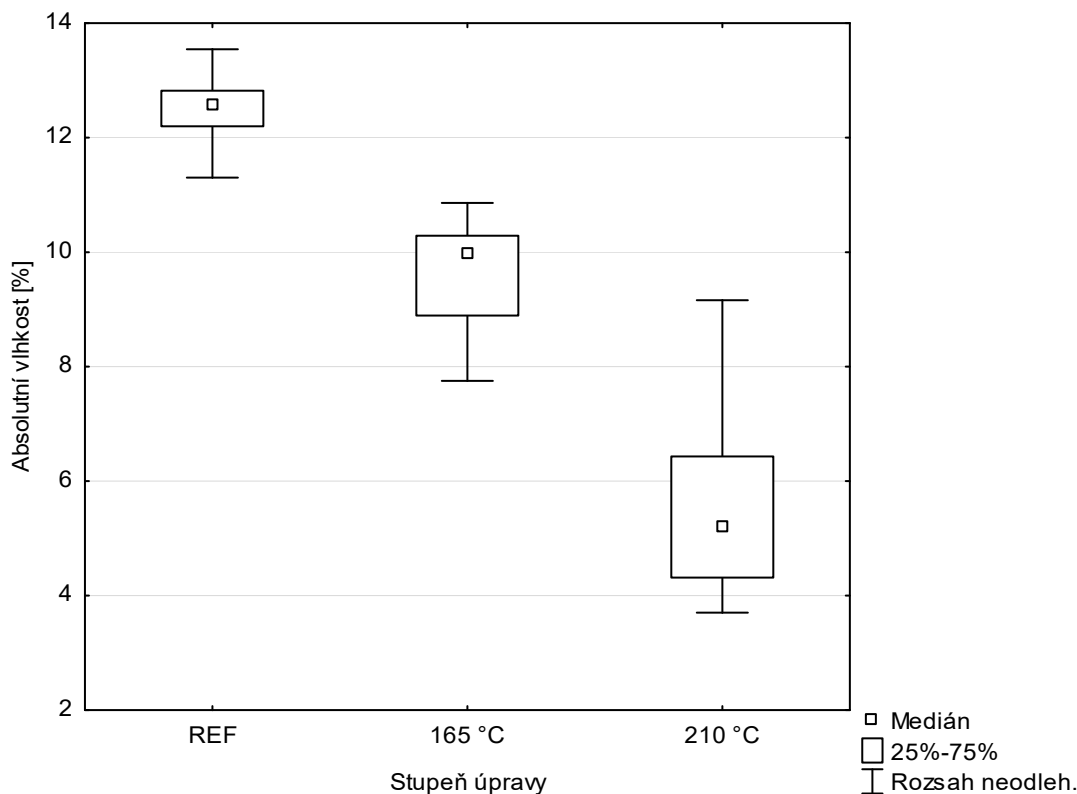
Série upravená při 165 °C					
		průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	
Absolutní vlhkost	[%]	9,5	1,08	0,11	
Hustota	[g.cm <sup>-3</sup> ]	0,635	0,05	0,08	
Statický modul pružnosti	[MPa]	8707	1893	0,22	
Dynamický modul pružnosti	[MPa]	10935	2496	0,23	
Pevnost v ohybu	[MPa]	87	24	0,27	
Houževnatost	[J*cm <sup>-2</sup> ]	3,4	1,8	0,52	
Tvrдость	radiální plocha	[MPa]	27,2	11,9	0,44
	tangenciální plocha	[MPa]	37,2	14,8	0,40

**Tabulka 4:** Základní statistika série druhého stupně úpravy (210 °C)

Série upravená při 210 °C					
		průměr	směrodatná odchylka	variační koeficient	
Absolutní vlhkost	[%]	5,5	1,44	0,26	
Hustota	[g.cm <sup>-3</sup> ]	0,590	0,04	0,07	
Statický modul pružnosti	[MPa]	7607	1788	0,24	
Dynamický modul pružnosti	[MPa]	10355	2616	0,25	
Pevnost v ohybu	[MPa]	36	10	0,27	
Houževnatost	[J*cm <sup>-2</sup> ]	1,1	0,5	0,50	
Tvrдость	radiální plocha	[MPa]	23,6	11,0	0,47
	tangenciální plocha	[MPa]	34,2	16,6	0,48

## 5.2. Krabicové grafy

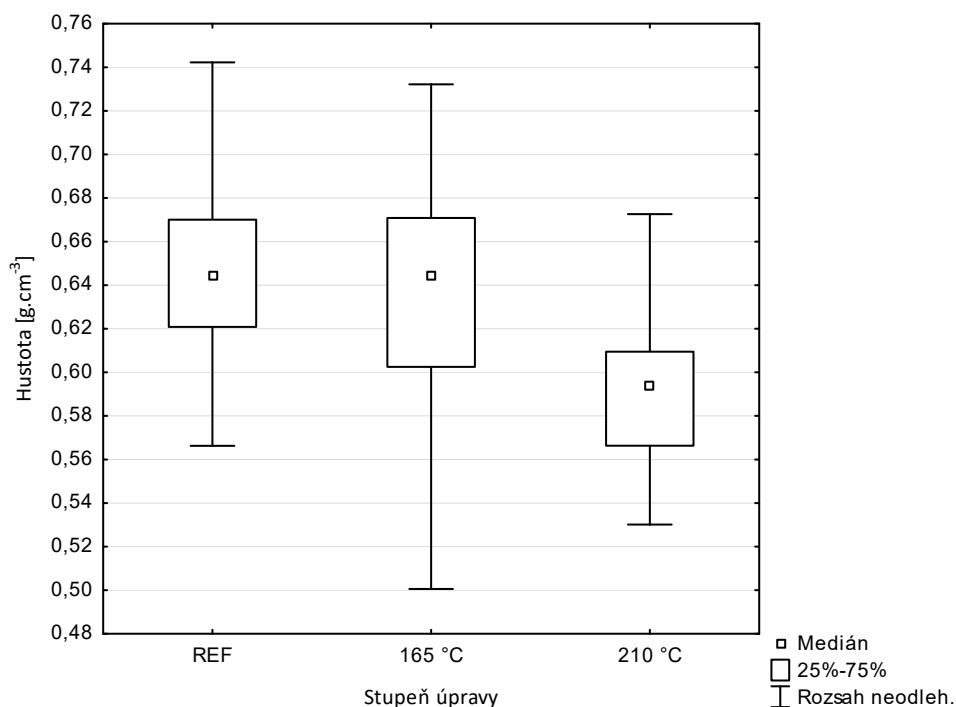
### 5.2.1. Vlhkost



**Graf 7:** Krabicový graf vlhkosti pro jednotlivé série

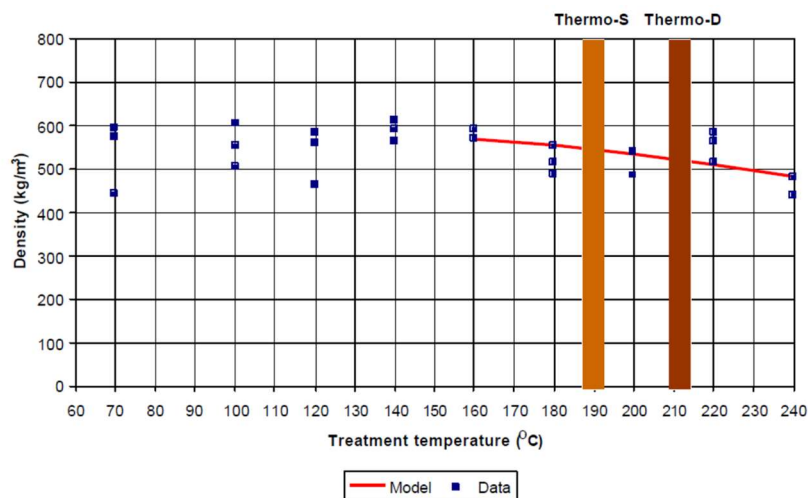
Na grafu 7 je jasně vidět pokles rovnovážné vlhkosti dřeva v závislosti na stupni úpravy tak, jak říká teorie. Thermowood handbook uvádí 6-8 % absolutní vlhkosti pro dřevo upravené při 180 °C a 5-6 % vlhkosti pro dřevo upravené při 215 °C. Za předpokladu, že je závislost rovnovážné vlhkosti dřeva na teplotě úpravy přibližně lineární, budou souhlasit i hodnoty pro teplotu 165 °C, kterou Thermowood handbook neuvádí. U obou stupňů úpravy lze pozorovat větší rozptyl vlhkosti než u referenční série, přičemž u série upravené při 210 °C je tento rozptyl větší. Statisticky to vyjadřuje směrodatná odchylka, respektive variační koeficient v tabulkách 1, 3 a 4. Může to být dáno rozdílnou reakcí jednotlivých vzorků na úpravu. Také to může být ovlivněno okolnostmi měření, série určená pro ohybovou zkoušku byla pro zjištění vlhkosti vážena později než série pro houževnatost. A právě vzorky ze série pro ohybovou zkoušku vykazují plošně vyšší vlhkost, ačkoli byl dodržen správný postup měření.

## 5.2.2. Hustota



**Graf 8:** Krabicový graf hustoty pro jednotlivé série

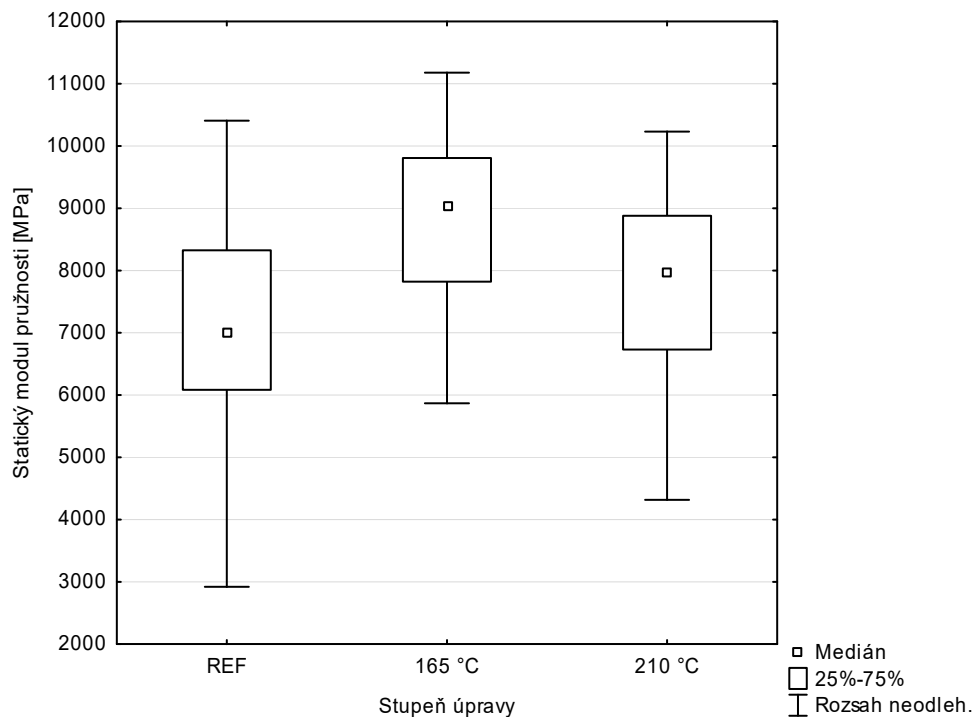
Pokles hustoty podobně jako vlhkost souhlasí s teoretickými poznatky, viz graf z Thermowood handbook. U druhého stupně úpravy (210 °C) je vidět mírný pokles hustoty. U prvního stupně (165 °C) zůstal medián prakticky nezměněný. Snížení vlhkosti pravděpodobně kompenzují mírně zmenšené rozměry. Za povšimnutí stojí mírně zvýšený rozptyl hodnot u prvního stupně úpravy v porovnání se zbylými sériemi. Na druhou stranu je třeba vzít v úvahu velké měřítko grafu.



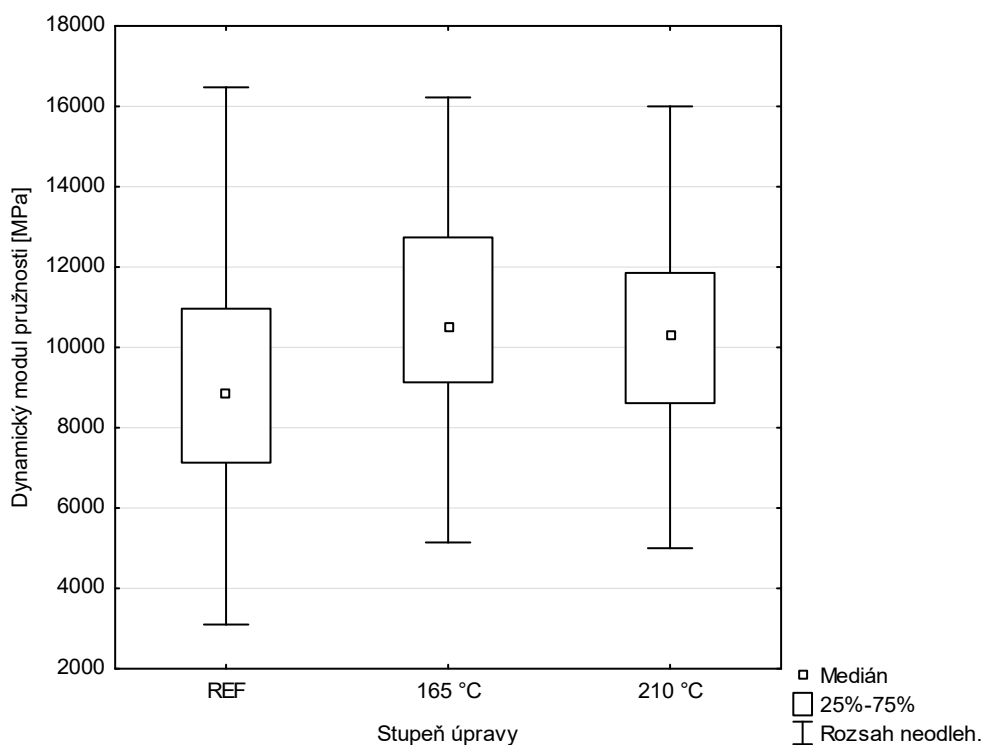
**Graf 9:** Vliv teploty úpravy na hustotu borovice (Thermowood handbook, 2010)



### 5.2.3. Moduly pružnosti



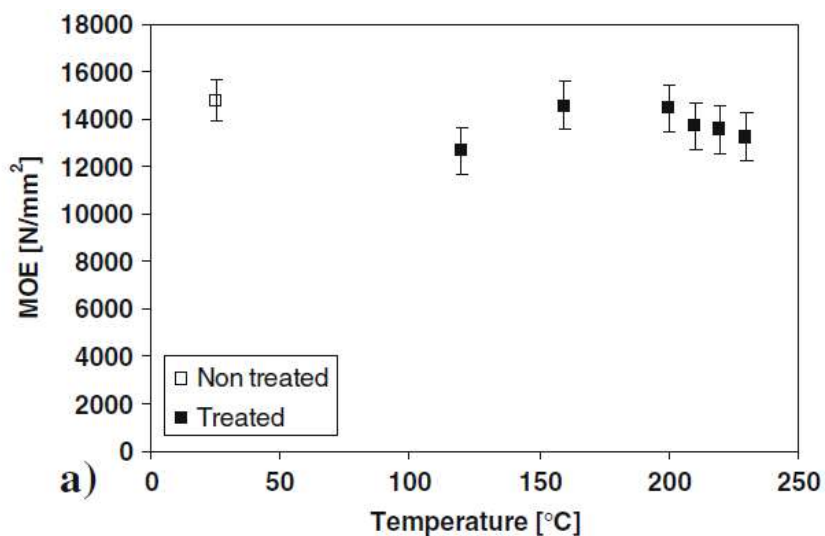
**Graf 10:** Krabicový graf statického modulu pružnosti pro jednotlivé série



**Graf 11:** Krabicový graf dynamického modulu pružnosti pro jednotlivé série

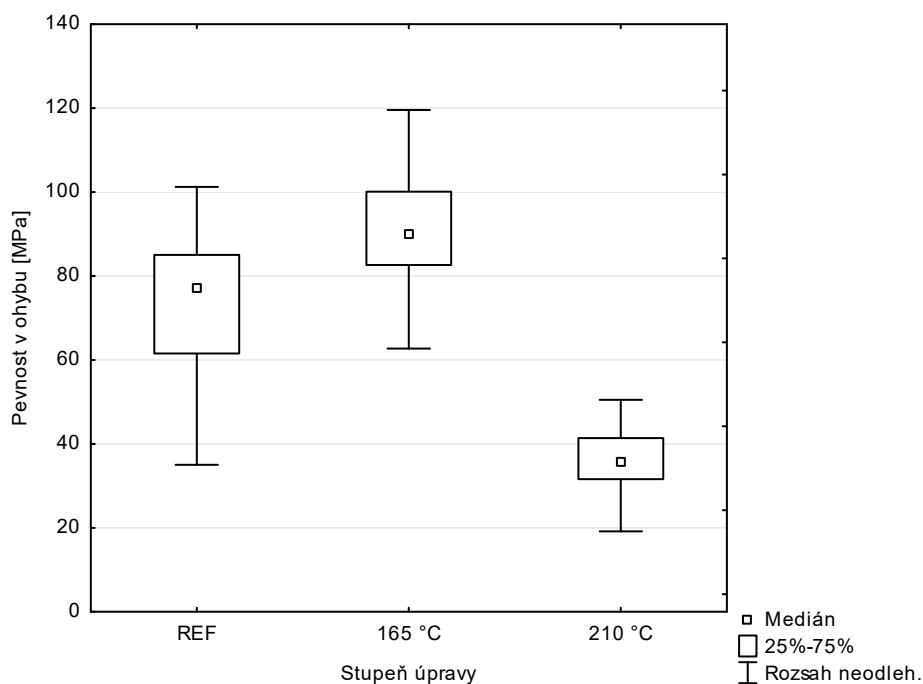
Statický i dynamický modul mají podobný trend. Mírné zvýšení u druhého stupně úpravy, větší zvýšení u stupně prvního. Pravděpodobně by to mohlo znamenat, že vliv snížení

vlhkosti je výraznější než degradace materiálu teplem. Taková data ale nesouhlasí například s výsledky, které publikoval Poncsák a kol. v roce 2006. V jejich měření modul pružnosti zůstal při 160 °C shodný a při 210 °C v porovnání s neupravenými vzorky klesl. Modul pružnosti se ale lišil už od začátku na neupravených tělesech. Navíc v jejich výzkumu byl použitý jiný druh břízy (betula papyrifera), což také může hrát roli.



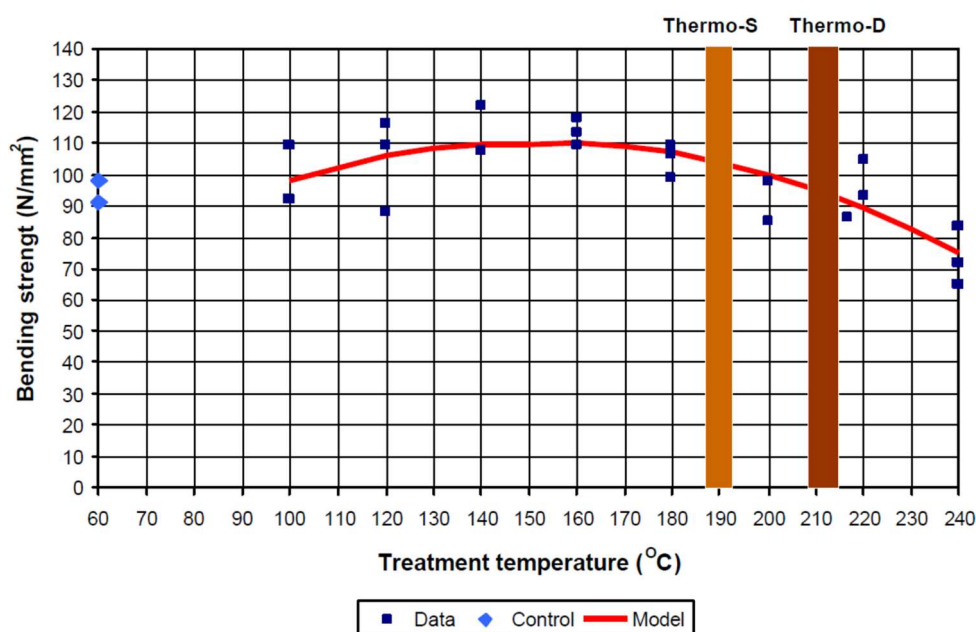
**Graf 12:** Závislost modulu pružnosti na teplotě úpravy (Poncsák a kol., 2006)

#### 5.2.4. Pevnost v ohybu



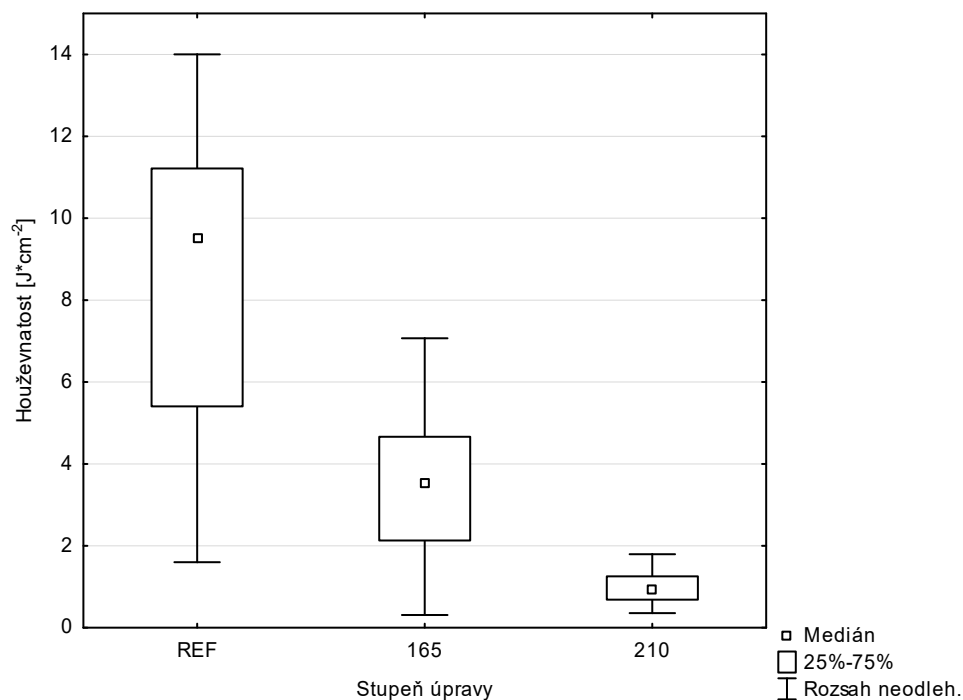
**Graf 13:** Krabicový graf pevnosti v ohybu pro jednotlivé série

Zkouška pevnosti v ohybu přinesla zajímavé zjištění. První stupeň úpravy přinesl výrazné zlepšení oproti neupraveným vzorkům. Nejspíš je to dáno snížením vlhkosti, která pevnost v ohybu ovlivňuje, a málo výrazným poškozením stavby dřeva úpravou při této teplotě. Úprava při 210 °C u druhého stupně úpravy už ale přinesla výrazné zhoršení. Proti referenčním vzorkům klesla pevnost v ohybu téměř na polovinu. Nepomohlo už ani snížení rovnovážné vlhkosti dřeva o další čtyři procenta v porovnání s prvním stupněm úpravy. Tento výsledek je výrazně rozdílný od údajů uvedených v Thermowood handbook, kde uvádějí snížení pevnosti v ohybu pro úpravu při 215 °C o přibližně 10 % z pevnosti neupraveného dřeva. Jedná se ale o hodnoty pro borovici.



**Graf 14:** Vliv teploty úpravy na pevnost v ohybu borovice  
(Thermowood handbook, 2010)

### 5.2.5. Houževnatost

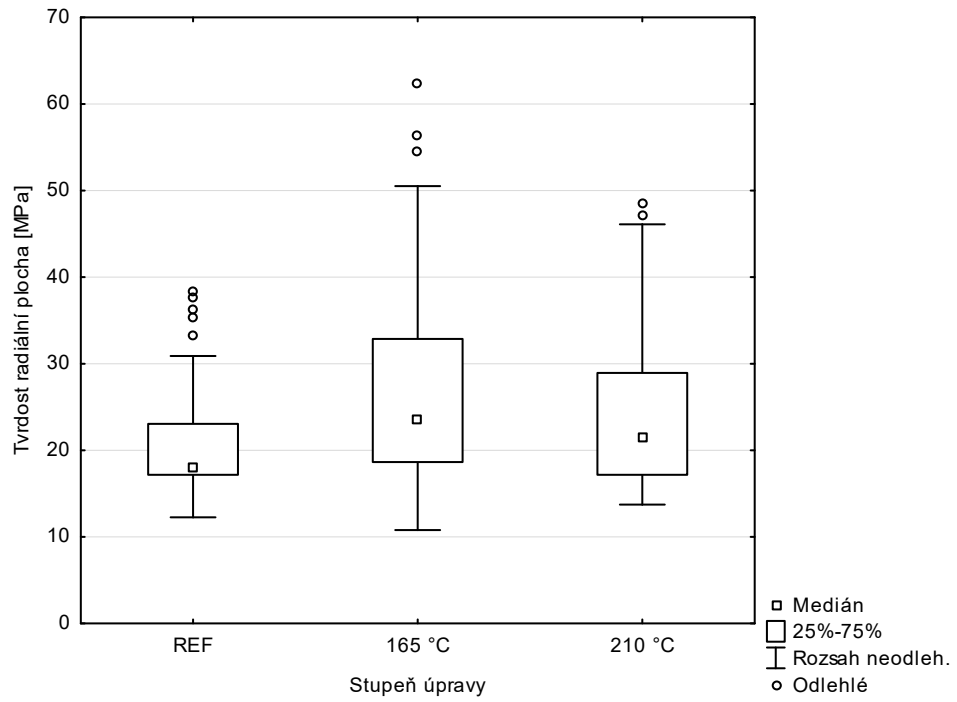


**Graf 15:** Krabicový graf houževnatosti pro jednotlivé série

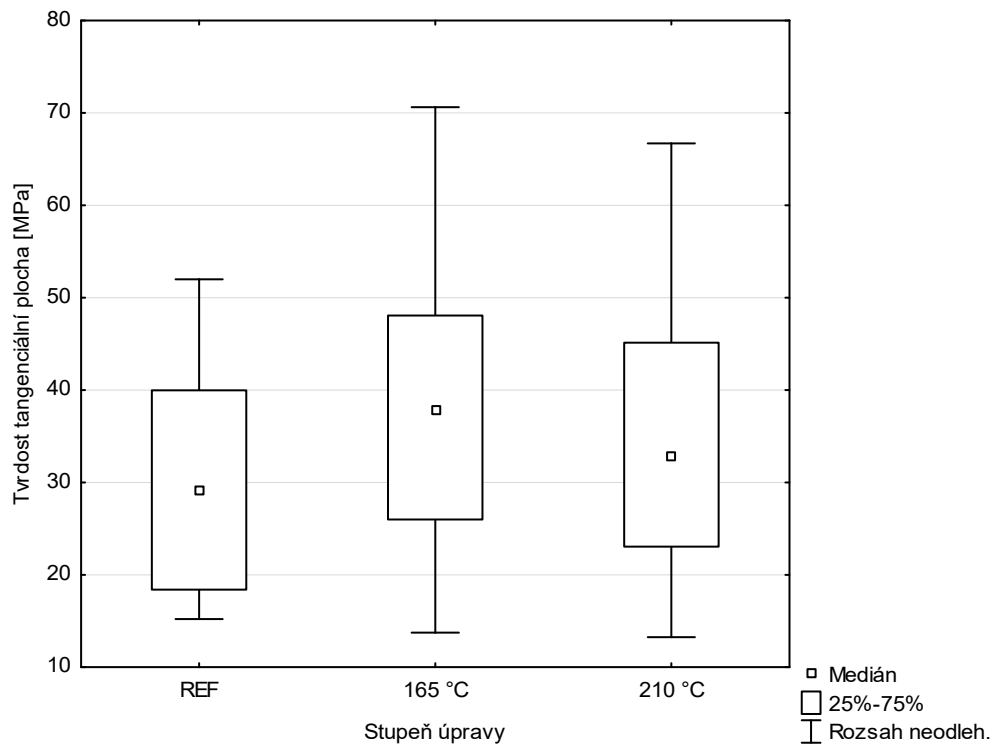
Na rozdíl od statického ohybu je rázová houževnatost výrazně ovlivněna již u prvního stupně úpravy. Průměrná houževnatost klesla na 40 % hodnoty referenční série. Vzorky s velmi malou houževnatostí srovnatelnou s hodnotami druhého stupně úpravy byly téměř ve všech případech oslabené sukem nebo jinou vadou. Stejně postižená byla většina referenčních vzorků zasahujících houževnatostí do hodnot vzorků upravených při 165 °C. Zmenšení rozptylu je pouze relativní, variační koeficient zůstává podobný, mírně vyšší než u referenční série.

Ještě výraznější pokles je u druhého stupně úpravy. Pouze 13 % původní houževnatosti má březové dřevo po úpravě při 210 °C. Za takových podmínek je vyloučené použití kdekoli, kde se může počítat byť jen s mírným mechanickým namáháním. Při přerážení se zkušební tělesa často rozpadala na větší množství drobnějších kusů. Toto je velký rozdíl oproti údajům z Thermowood handbook, kde uvádějí snížení rázové houževnatosti smrku upraveného při 220 °C o přibližně 25 % z hodnoty neupraveného dřeva.

## 5.2.6. Tvrdost

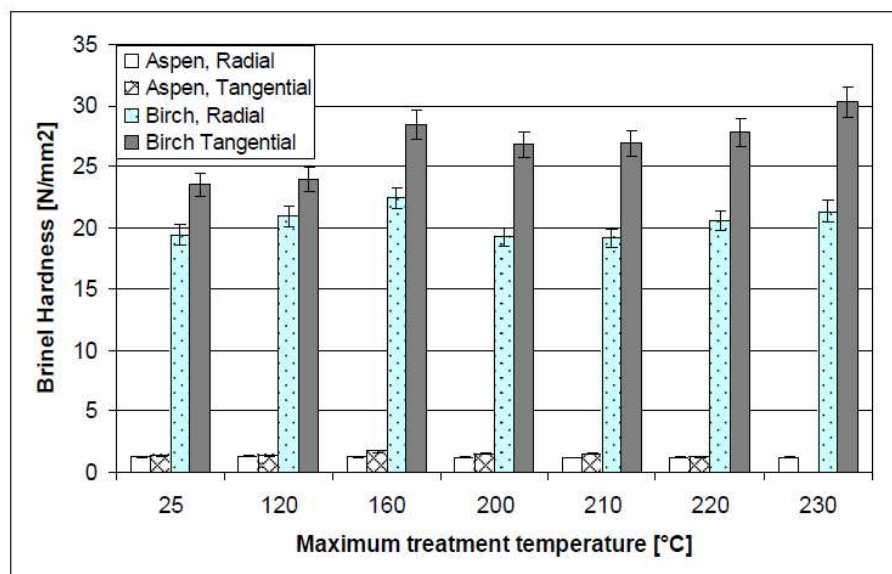


**Graf 16:** Krabicový graf tvrdosti na radiální ploše pro jednotlivé série

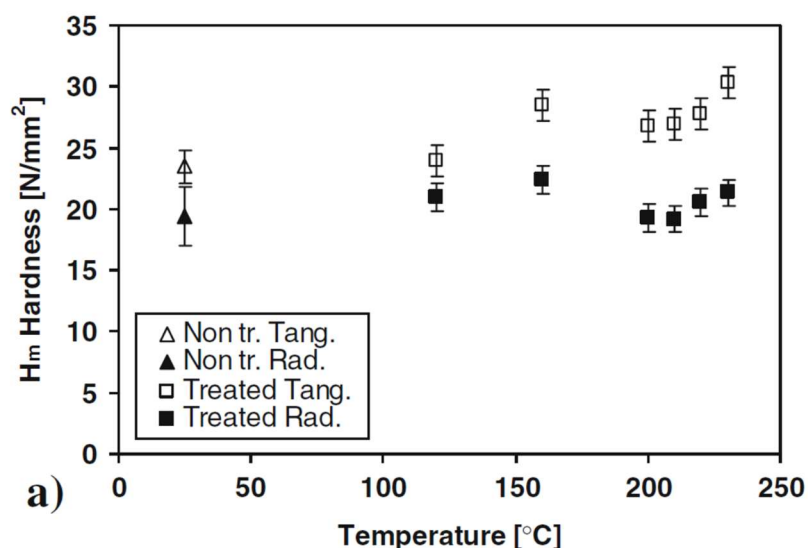


**Graf 17:** Krabicový graf tvrdosti na tangenciální ploše pro jednotlivé série

Měření tvrdosti potvrzuje dosavadní poznatky dostupné z literatury. Tvrdost se u obou stupňů úpravy zvýšila, přičemž u prvního stupně bylo toto zvýšení větší. Stejně tak se potvrdila vyšší tvrdost na tangenciální ploše v porovnání s radiální tvrdostí. Tento trend je vidět například na grafu z práce Kocaeve a kol. Podobné výsledky se také objevily v práci Poncsáka a kol. Zajímavé hodnoty by mohlo také přinést měření s kuličkou zatlačovanou silou 500 N namísto 250 N, byť by pro část vzorků nebylo možné měření provést.



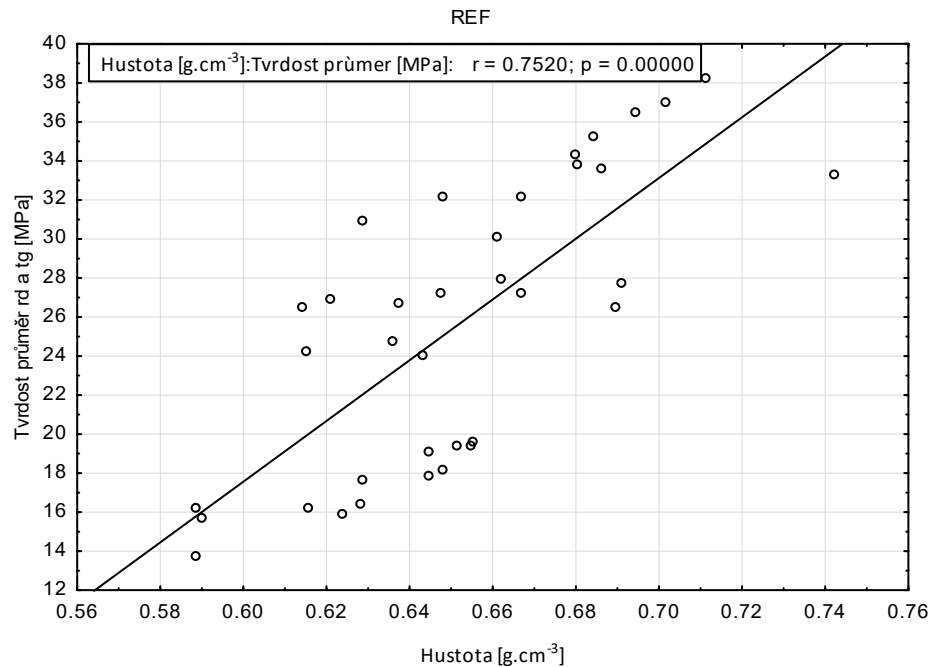
**Graf 18:** Tvrdost na radiální a tangenciální ploše podle teploty úpravy (Kocaeve a kol., 2008)



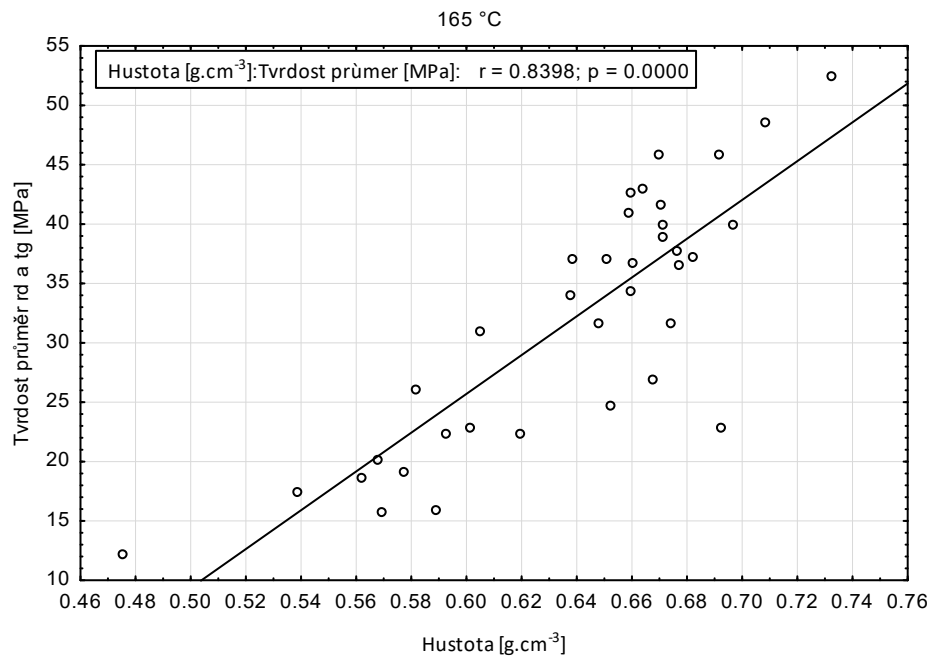
**Graf 19:** Tvrdost na radiální a tangenciální ploše podle teploty úpravy (Poncsák a kol., 2006)

## 5.3. Korelace

### 5.3.1. Hustota – tvrdost



**Graf 20:** Korelace hustoty a tvrdosti neupraveného dřeva

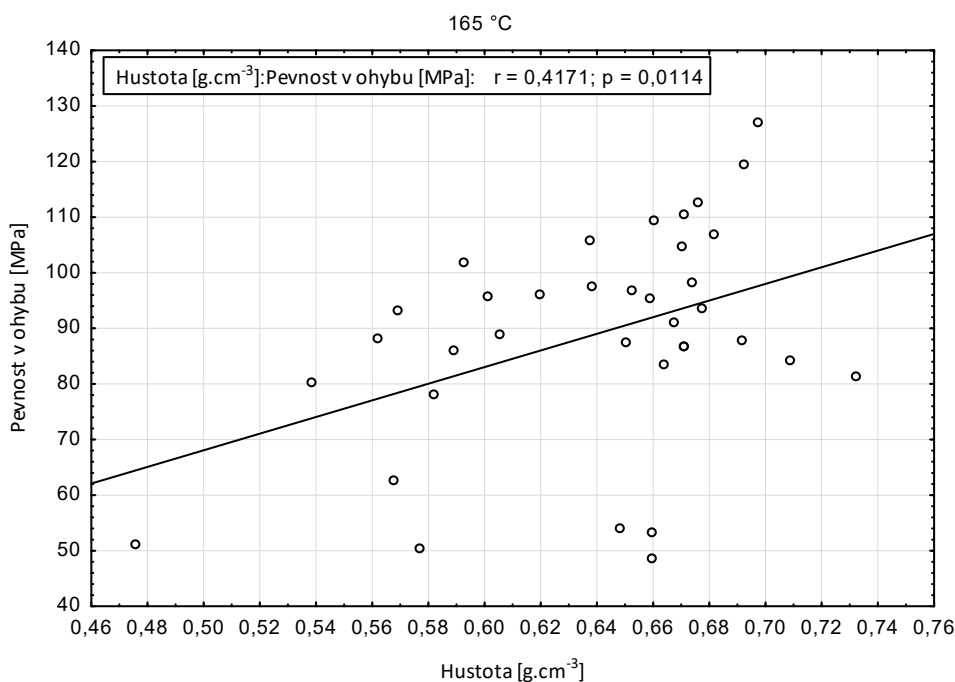


**Graf 21:** Korelace hustoty a tvrdosti dřeva upraveného při 165 °C

Nejlépe korelovaná dvojice vlastností je hustota s tvrdostí. Neupravená série má korelační koeficient  $r = 0,75$ , pro první stupeň úpravy je  $r = 0,84$ . Pouze u druhého stupně

úpravy se koeficient snižuje na  $r = 0,43$ . To potvrzuje i Heräjärvi ve své práci, kde tvrdí, že tvrdost závisí na hustotě (Heräjärvi, 2001). Vyšší hustota při stejné vlhkosti znamená více dřevní hmoty a méně vzduchových mezer ve dřevě. To logicky vede k závěru, že se zvýší tvrdost, tj. schopnost odolat vniknutí cizího předmětu do materiálu. Graf pro druhý stupeň úpravy je umístěn v příloze.

### 5.3.2. Hustota - pevnost v ohybu



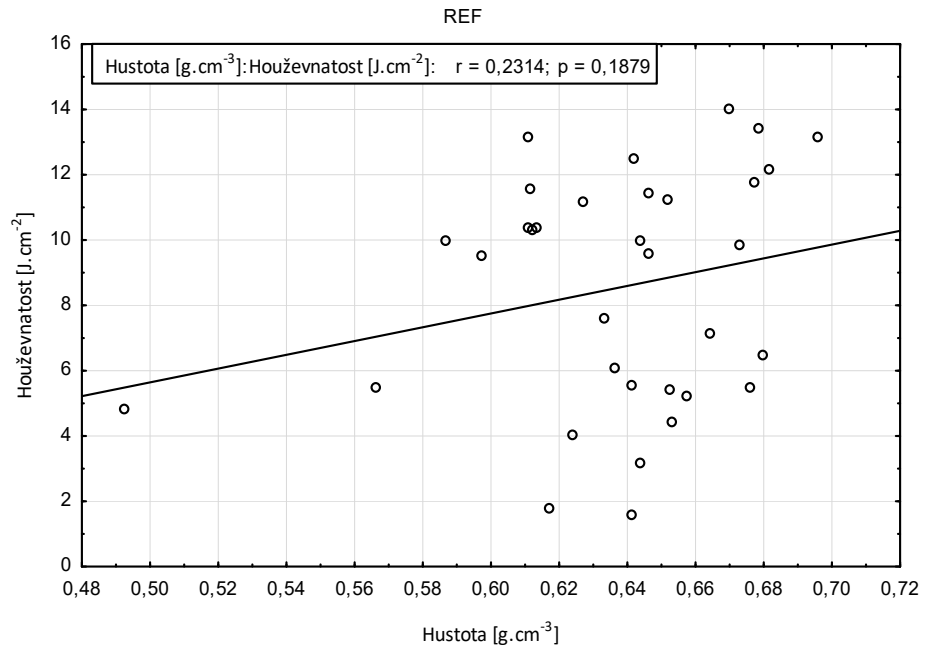
**Graf 22:** Korelace hustoty a pevnosti v ohybu

Další ze sledovaných korelací byla hustota s pevností v ohybu. Zde se ale žádná významná souvislost neobjevila. Nejvyšší korelační koeficient vyšel pro první stupeň úpravy. A ani ten není významný,  $r = 0,42$ . Referenční série má  $r = 0,18$ . Druhý stupeň úpravy dokonce  $r = 0,03$ , tudíž můžeme prohlásit, že zde žádná korelace není.

### 5.3.3. Hustota – houževnatost

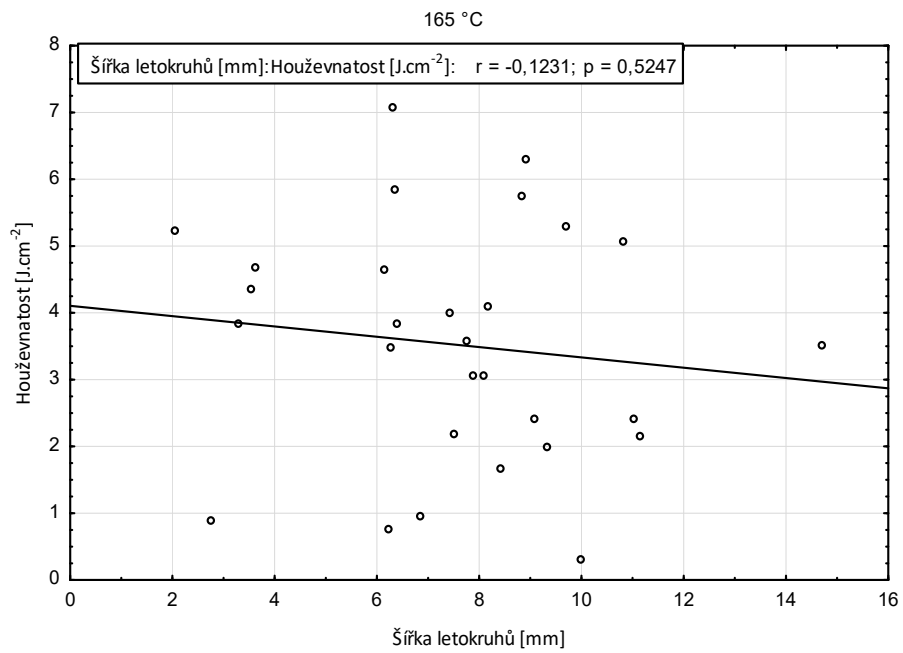
U dvojice vlastností hustota – houževnatost také nebyla nalezena významná korelace. Referenční série má zanedbatelných  $r = 0,23$ , první stupeň úpravy  $r = 0,06$  a u druhého stupně jde korelační koeficient dokonce do minusových hodnot:  $r = -0,20$ .



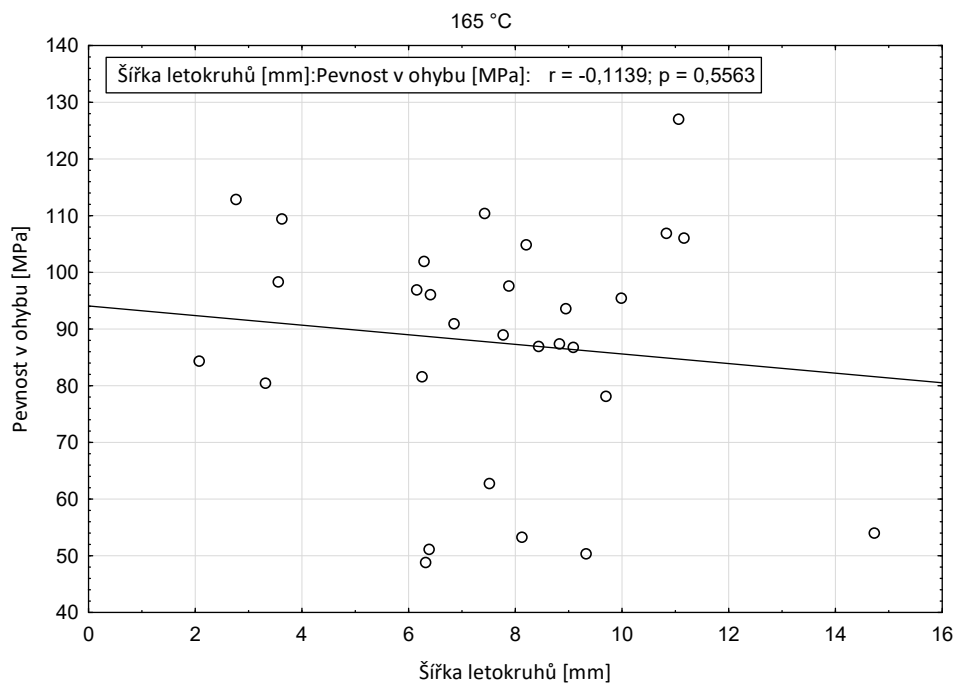


**Graf 23:** Korelace hustoty a houževnatosti neupraveného dřeva

### 5.3.4. Šířka letokruhů



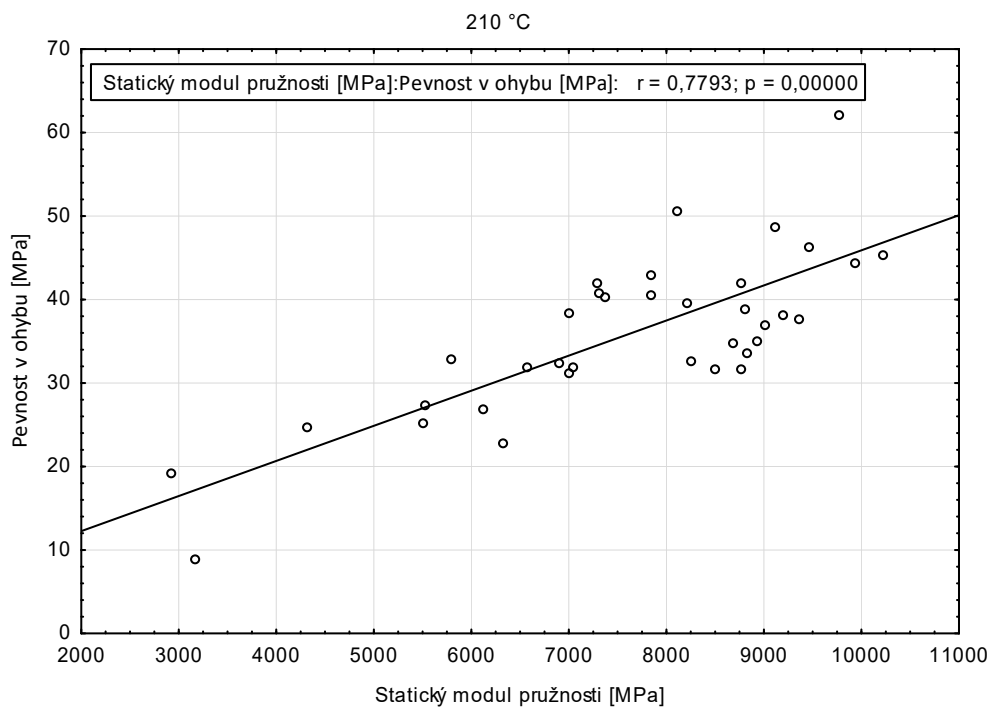
**Graf 24:** Korelace šířky letokruhů a houževnatosti dřeva upraveného při 165 °C



**Graf 25:** Korelace šířky letokruhů a pevnosti v ohybu dřeva upraveného při 165 °C

Dále byly v centru zájmu korelace mechanických vlastností se šířkou letokruhů. V této oblasti se ale žádný významný vztah nalézt nepodařilo. Za všechny případy tu jsou dva výše uvedené grafy pro houževnatost a pevnost v ohybu pro sérii upravené při 165 °C. Je vidět, že korelační koeficient je záporný, což znamená nepřímou úměru mezi korelovanými vlastnostmi. To by sice dávalo smysl, ale absolutní hodnoty těchto koeficientů jasně ukazují, že tyto vztahy nemají žádnou váhu. Ostatní série pro pevnost v ohybu, houževnatost i tvrdost vykazují podobnou míru korelace.

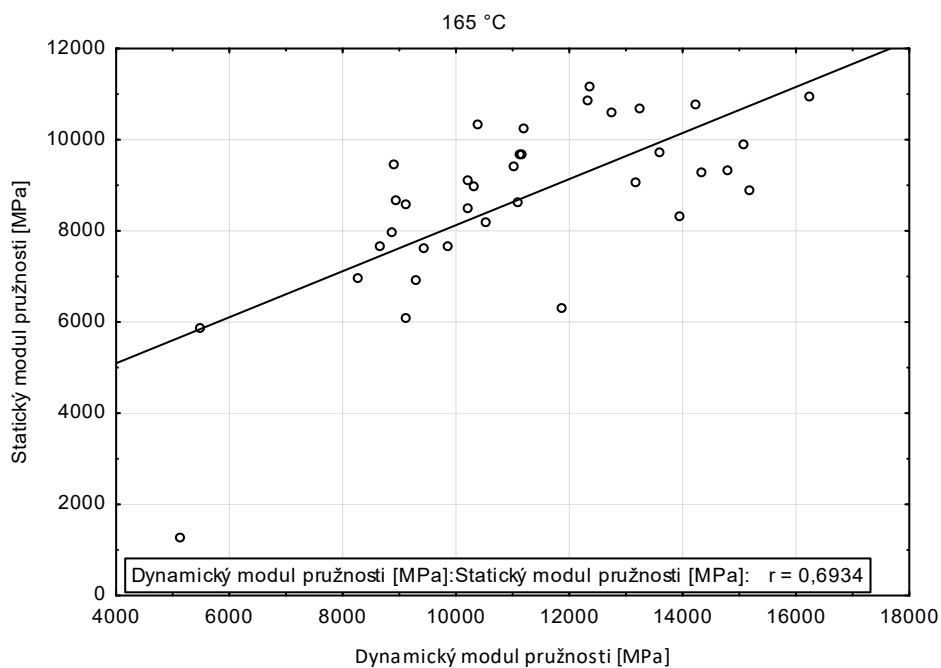
### 5.3.5. Statický modul pružnosti – pevnost v ohybu



**Graf 26:** Korelace statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu dřeva upraveného při 210 °C

Významná korelace byla nalezena u dvojice vlastností statický modul pružnosti a pevnost v ohybu. Korelační koeficienty jsou 0,60 pro neupravenou sérii, 0,55 pro první stupeň úpravy a 0,78 pro druhý stupeň úpravy.

### 5.3.6. Dynamický modul pružnosti – statický modul pružnosti



**Graf 27:** Korelace dynamického modulu pružnosti a statického modulu pružnosti dřeva upraveného při 165 °C

Další korelace byla nalezena mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti. Významná je ale pouze u prvního stupně úpravy. Neupravená série má korelační koeficient 0,32, druhý stupeň úpravy 0,48.

## 6. Závěr

Termická úprava je účinná metoda k vylepšení vlastností břízy. V závislosti na zamýšleném způsobu použití je ale třeba zvolit správný stupeň úpravy. Po úpravě při teplotě 165 °C se průměrná absolutní vlhkost dřeva při 65% relativní vzdušné vlhkosti a teplotě vzduchu 20 °C snižuje na 9,5 %. S tím se redukuje i bobtnání a sesychání. Zároveň se zlepšují sledované mechanické vlastnosti kromě houževnatosti. Ta už při prvním stupni úpravy klesá na 40 % hodnoty neupraveného dřeva. Díky takovému souboru vlastností se dá bříza upravená při 165 °C použít v aplikacích, kde se nepředpokládá výrazné rázové zatížení. Je tedy vhodná například na výrobu nábytku nebo obložení do saun.

Úprava při 210 °C má mnohem výraznější dopady na vlastnosti dřeva. Snížení vlhkosti je v tomto případě ještě výraznější: při výše uvedených podmínkách vlhkosti a teploty vzduchu klesá průměrná absolutní vlhkost dřeva až na 5,5 %. Díky tomu bude dřevo mnohem lépe odolávat působení vlhkosti, pravděpodobnost napadení biotickými škůdci je i v exteriéru snížena na minimum a rozměrové změny budou také minimální. Tyto pozitivní vlastnosti jsou ale vykoupeny zřetelným zhoršením vlastností mechanických. Houževnatost je snížena ještě více než u prvního stupně úpravy. Její průměrná hodnota klesá na 13 % původní houževnatosti. K tomu se přidává výrazný pokles pevnosti v ohybu, na 52 % hodnoty neupraveného dřeva. Tyto dva faktory vylučují využití břízy upravené při 210 °C z jakékoli mechanicky namáhané konstrukce. Jediné podstatné využití takové úpravy je pravděpodobně na obklady zdí, především fasád domů.

Je třeba zdůraznit rozdíl mezi statickým a dynamickým namáháním. Zatímco se při prvním stupni úpravy pevnost v ohybu zlepšuje, houževnatost již výrazně klesá. Statický i dynamický modul pružnosti a tvrdost se mírně zlepšují v porovnání s neupraveným dřevem.

Bylo by také dobré vyzkoušet úpravu při teplotě, která je mezi 165 °C a 210 °C. Například 175 °C a 185 °C. Je možné, že by jedna z nich mohla více snížit rovnovážnou vlhkost dřeva a se současně ne příliš zhoršenými mechanickými vlastnostmi.

## 7. Použité zdroje

POŽGAJ, Alexander. Štruktúra a vlastnosti dreva. BRATISLAVA: PRÍRODA, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

MUSIL, Ivan a Jana MÖLLEROVÁ. Lesnická dendrologie. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2005. ISBN 80-213-1367-6.

ALEŠ, Zeidler. Lexikon dřeva [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2012 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: [http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon\\_dreva/lexikon\\_dreva.pdf](http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon_dreva/lexikon_dreva.pdf)

HORÁČEK, Petr. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998. ISBN 80-7157-347-7.

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

GANDELOVÁ, Libuše a Jarmila ŠLEZINGEROVÁ. Stavba dřeva. 2., nezměn. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014. ISBN 978-80-7375-966-7.

BALABÁN, Karel. Nauka o dřevě. Praha: SZN, 1955. Lesnická knihovna. Velká řada. DINWOODIE, J. M. Timber, its nature and behaviour. 2nd ed. London: E & FN Spon, 2000. ISBN 0419255508.

BORŮVKA, Vlastimil a Marián BABIAK. Vlastnosti dřeva v příkladech. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2016. ISBN 978-80-213-2618-7.

Thermowood Handbook. Helsinki: Finnish Thermowood Association 2010 [online]. [cit. 17. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.thermowood.fi/brochurestexts>

KLOIBER, Michal; KOTLÍNOVÁ, Mária. Porovnání dynamického a statického modulu pružnosti poškozeného dřeva. Applied Mechanics, 2006, 8.

KAČÍK, František a Danica KAČÍKOVÁ. Chemické zmeny pri termickej modifikácii dreva. Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva 2010 [online]. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2010 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z:

[https://www.tuzvo.sk/files/DF/katedry\\_df/kod/konferencia/2010/kacik\\_kacikova.pdf](https://www.tuzvo.sk/files/DF/katedry_df/kod/konferencia/2010/kacik_kacikova.pdf)

FAKOPP Ultrasonic timer user's guide [online]. [cit. 17. 4. 2017]. Dostupné z:

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

- LOKAJ, Antonín; VAVRUŠOVÁ, Kristýna. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada stavební. 2010, roč. 10, č. 1, s. 27-32 : il.
- HERÄJÄRVI, Henrik. Variation of basic density and Brinell hardness within mature Finnish *Betula pendula* and *B. pubescens* stems. *Wood and Fiber Science*, 2007, 36.2: 216-227.
- PONCSÁK, Sándor, et al. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Science and Technology*, 2006, 40.8: 647-663.
- BORŮVKA, Vlastimil; ZEIDLER, Aleš; HOLEČEK, Tomáš. Comparison of Stiffness and Strength Properties of Untreated and Heat-Treated Wood of Douglas Fir and Alder. *BioResources*, 2015, 10.4: 8281-8294.
- KOCAEFE, Duygu; PONCSAK, Sandor; BOLUK, Yaman. Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen. *BioResources*, 2008, 3.2: 517-537.
- TUMEN, Ibrahim, et al. Changes in the chemical structure of thermally treated wood. *BioResources*, 2010, 5.3: 1936-1944.
- 
- ČSN 49 0101 Drevo. Všeobecné požiadavky na fyzikálne a mechanické skúšky. 1980
- ČSN 49 0103 Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach. 1979
- ČSN 49 0108 Drevo. Zisťovanie hustoty. 1993
- ČSN 49 0115 Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe. 1979
- ČSN 49 0116 Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti pri statickom ohybe. 1982
- ČSN 49 0117 Drevo. Rázová húževnatost v ohybe. 1977.

## 8. Seznam grafů, obrázků, tabulek a příloh

<b>Graf 1:</b> Absolutní vlhkost dřeva v závislosti na teplotě vzduchu a relativní vzdušné vlhkosti (Borůvka, 2016) .....	12
<b>Graf 2:</b> Závislost relativní meze pevnosti v ohybu bukového dřeva na vlhkosti (Požgaj, 1993) .....	13
<b>Graf 3:</b> Závislost hustoty dřeva na šířce letokruhů vybraných dřevin (Gandelová, 2009) .....	14
<b>Graf 4:</b> Chemické změny v tepelně upraveném dřevě jedle a habru (Tumen, 2010) .....	20
<b>Graf 5:</b> Průběh tepelné úpravy při 165 °C (vlevo), při 210 °C vpravo .....	23
<b>Graf 6:</b> Příklad korekce nulové vzdálenosti .....	25
<b>Graf 7:</b> Krabicový graf vlhkosti pro jednotlivé série .....	31
<b>Graf 8:</b> Krabicový graf hustoty pro jednotlivé série .....	32
<b>Graf 9:</b> Vliv teploty úpravy na hustotu borovice (Thermowood handbook, 2010) .....	32
<b>Graf 10:</b> Krabicový graf statického modulu pružnosti pro jednotlivé série .....	33
<b>Graf 11:</b> Krabicový graf dynamického modulu pružnosti pro jednotlivé série .....	33
<b>Graf 12:</b> Závislost modulu pružnosti na teplotě úpravy (Poncsák a kol., 2006) .....	34
<b>Graf 13:</b> Krabicový graf pevnosti v ohybu pro jednotlivé série .....	34
<b>Graf 14:</b> Vliv teploty úpravy na pevnost v ohybu borovice (Thermowood handbook, 2010) .....	35
<b>Graf 15:</b> Krabicový graf houževnatosti pro jednotlivé série .....	36
<b>Graf 16:</b> Krabicový graf tvrdosti na radiální ploše pro jednotlivé série .....	37
<b>Graf 17:</b> Krabicový graf tvrdosti na tangenciální ploše pro jednotlivé série .....	37
<b>Graf 18:</b> Tvrdost na radiální a tangenciální ploše podle teploty úpravy (Kocaeffe a kol., 2008) .....	38
<b>Graf 19:</b> Tvrdost na radiální a tangenciální ploše podle teploty úpravy (Poncsák a kol., 2006) .....	38
<b>Graf 20:</b> Korelace hustoty a tvrdosti neupraveného dřeva .....	39
<b>Graf 21:</b> Korelace hustoty a tvrdosti dřeva upraveného při 165 °C .....	39
<b>Graf 22:</b> Korelace hustoty a pevnosti v ohybu .....	40
<b>Graf 23:</b> Korelace hustoty a tvrdosti dřeva upraveného při 165 °C .....	41
<b>Graf 24:</b> Korelace šířky letokruhů a houževnatosti dřeva upraveného při 165 °C .....	41
<b>Graf 25:</b> Korelace šířky letokruhů a pevnosti v ohybu dřeva upraveného při 165 °C .....	42



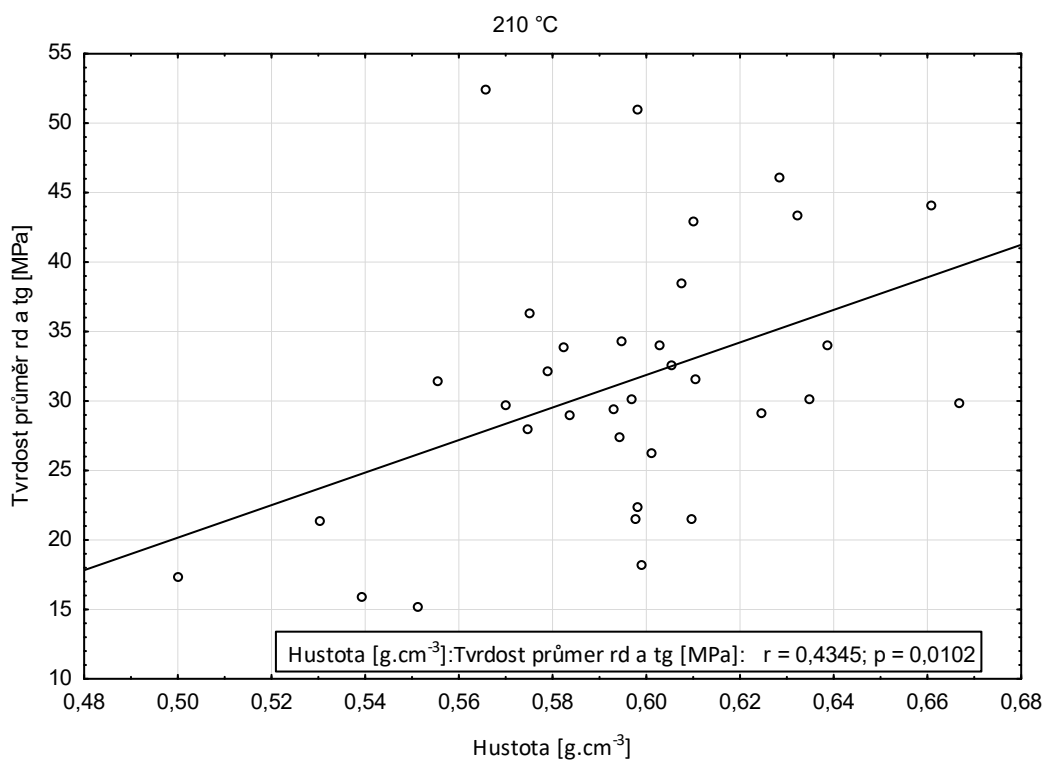
<b>Graf 26:</b> Korelace statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu dřeva upraveného při 210 °C .....	43
<b>Graf 27:</b> Korelace dynamického modulu pružnosti a statického modulu pružnosti dřeva upraveného při 165 °C .....	44
<b>Obrázek 1:</b> Čistý ohyb (Požgaj, 1993) .....	15
<b>Obrázek 2:</b> Tvrdoměr Duravision .....	16
<b>Obrázek 3:</b> Způsob zatížení zkušební tělesa při ohybové zkoušce (Požgaj, 1993).....	17
<b>Obrázek 4:</b> Termokomora (Holeček, 2016) .....	19
<b>Obrázek 5:</b> Systém pořezu materiálu na zkušební tělesa .....	22
<b>Obrázek 6:</b> Fakopp Ultrasonic timer ( <a href="http://fakopp.com/product/ultrasonic/">http://fakopp.com/product/ultrasonic/</a> ).....	24
<b>Obrázek 7:</b> Vzorek naskenovaný k měření šířky letokruhů .....	28
<b>Tabulka 1:</b> Základní statistika referenční série .....	29
<b>Tabulka 2:</b> Hodnoty z literatury pro neupravené vzorky (Požgaj, 1993; Gandelová, 2009; Heräjärvi, 2001) .....	29
<b>Tabulka 3:</b> Základní statistika série prvního stupně úpravy (165 °C).....	30
<b>Tabulka 4:</b> Základní statistika série druhého stupně úpravy (210 °C) .....	30
<b>Příloha 1:</b> Nastavení parametrů úpravy v programu obsluhujícím termokomoru.....	51
<b>Příloha 2:</b> Korelace hustoty a tvrdosti dřeva upraveného při 210 °C .....	51
<b>Příloha 3:</b> Korelace hustoty a pevnosti v ohybu neupraveného dřeva.....	52
<b>Příloha 4:</b> Korelace hustoty a pevnosti v ohybu dřeva upraveného při 210 °C.....	52
<b>Příloha 5:</b> Korelace statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu neupraveného dřeva .....	53
<b>Příloha 6:</b> Korelace statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu dřeva upraveného při 165 °C .....	53
<b>Příloha 7:</b> Korelace dynamického modulu pružnosti a statického modulu pružnosti neupraveného dřeva .....	54
<b>Příloha 8:</b> Korelace dynamického modulu pružnosti a statického modulu pružnosti dřeva upraveného při 210 °C .....	54

<b>Příloha 9:</b> Korelace tvrdosti na radiální ploše a tvrdosti na tangenciální ploše neupraveného dřeva .....	55
<b>Příloha 10:</b> Korelace tvrdosti na radiální ploše a tvrdosti na tangenciální ploše dřeva upraveného při 165 °C .....	55
<b>Příloha 11:</b> Korelace tvrdosti na radiální ploše a tvrdosti na tangenciální ploše dřeva upraveného při 210 °C .....	56

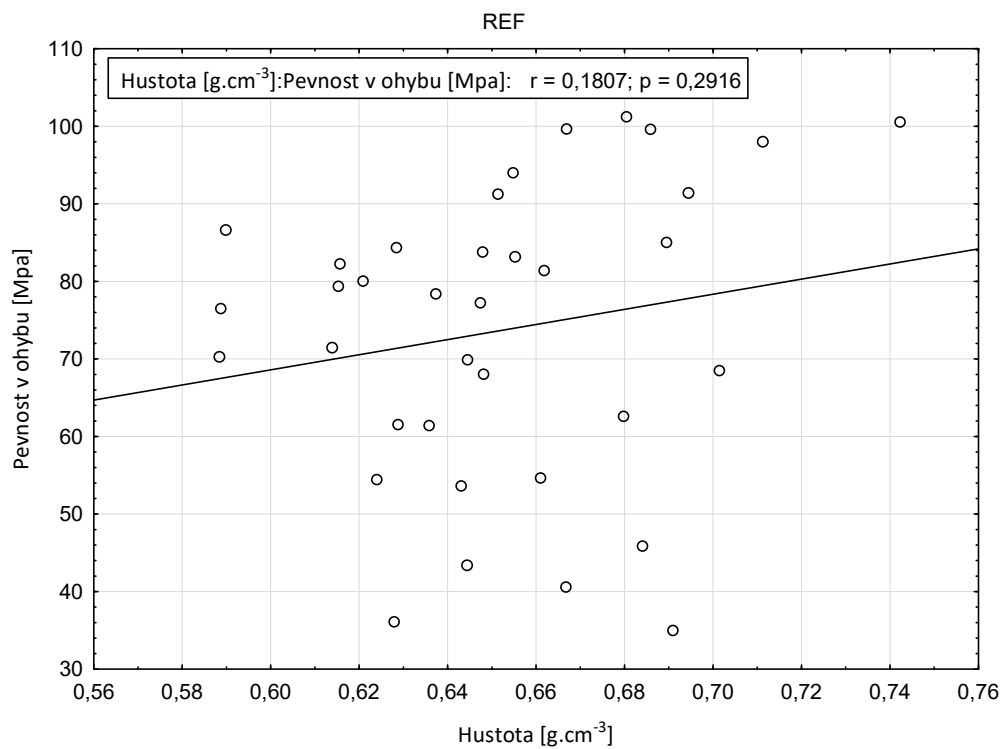
## 9. Přílohy

Termo 210°C-2,10,2015- T.H.												
Č.	Fáze	Doba hod	Teplota °C	Strmost °C/hod	Otáčky %	Reverse hod	Podtlak			Paření %	Vlhčení	
							nast. Pa	min. %	klapka %		zap. sek	vyp. sek
1	Ohřev	1.00	50.0	50	100	0.0	60.0	50	70	5	0	0
2	Ohřev	1.00	100.0	50	100	0.0	60.0	50	60	0	0	0
3	Ohřev	0.50	160.0	30	100	0.0	40.0	50	50	0	3	60
4	Thermo	3.00	210.0	20	80	0.0	30.0	0	20	0	10	30
5	Ochlazení	0.00	100.0	25	90	0.0	30.0	0	30	0	0	0
6	Ochlazení	0.00	30.0	30	90	0.0	0.0	0	0	0	0	0
7		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
8		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
9		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
10		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
11		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
12		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
13		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
14		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
15		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0

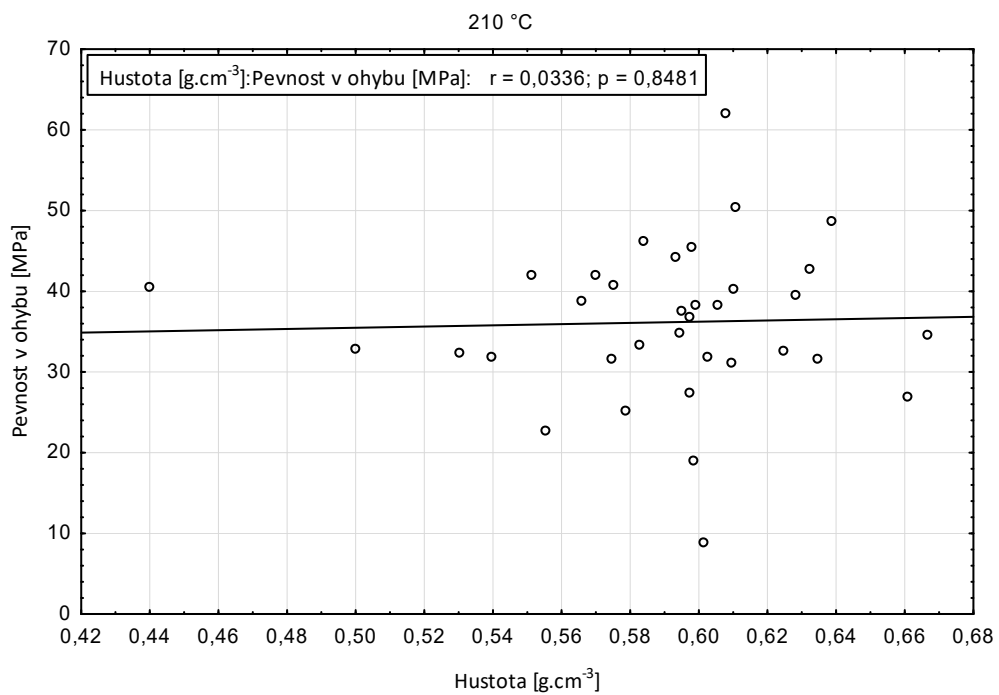
**Příloha 1:** Nastavení parametrů úpravy v programu obsluhujícím termokomoru



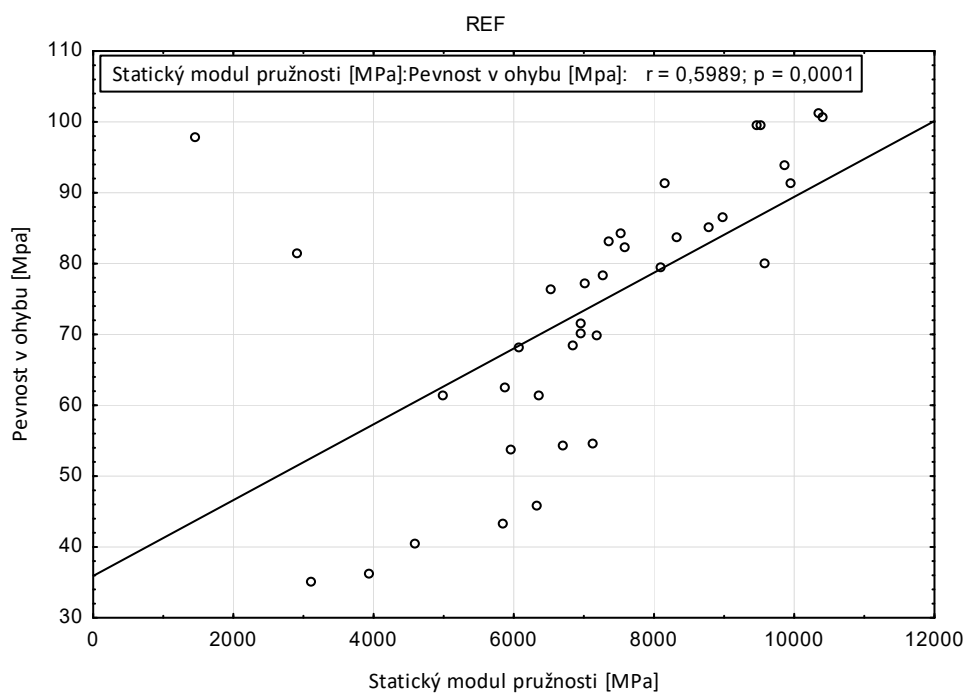
**Příloha 2:** Korelace hustoty a tvrdosti dřeva upraveného při 210 °C



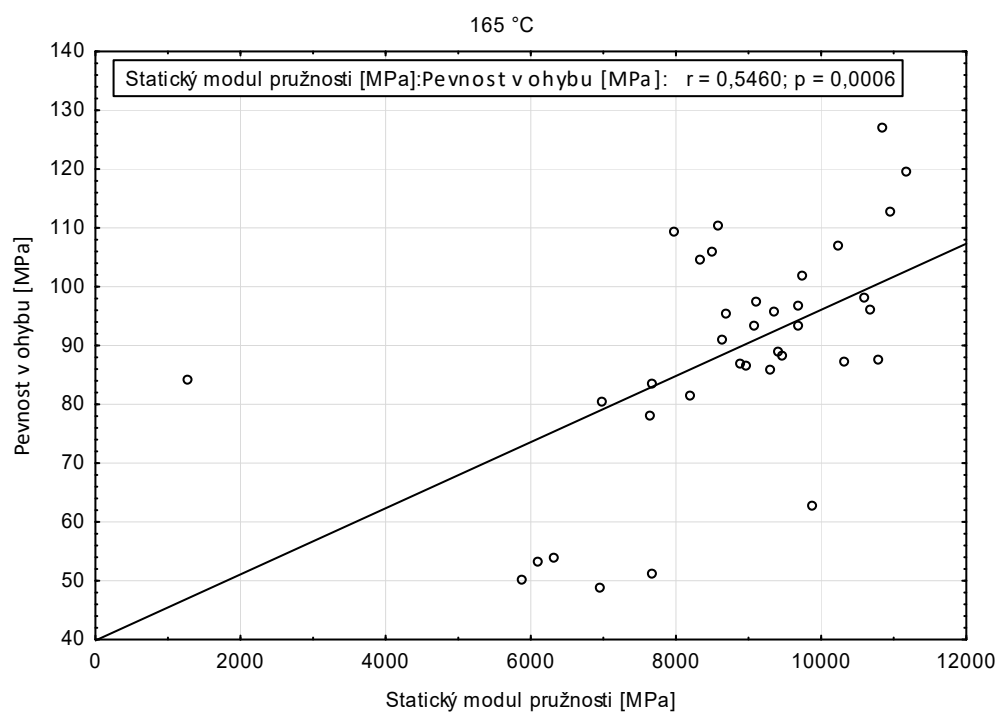
**Příloha 3:** Korelace hustoty a pevnosti v ohybu neupraveného dřeva



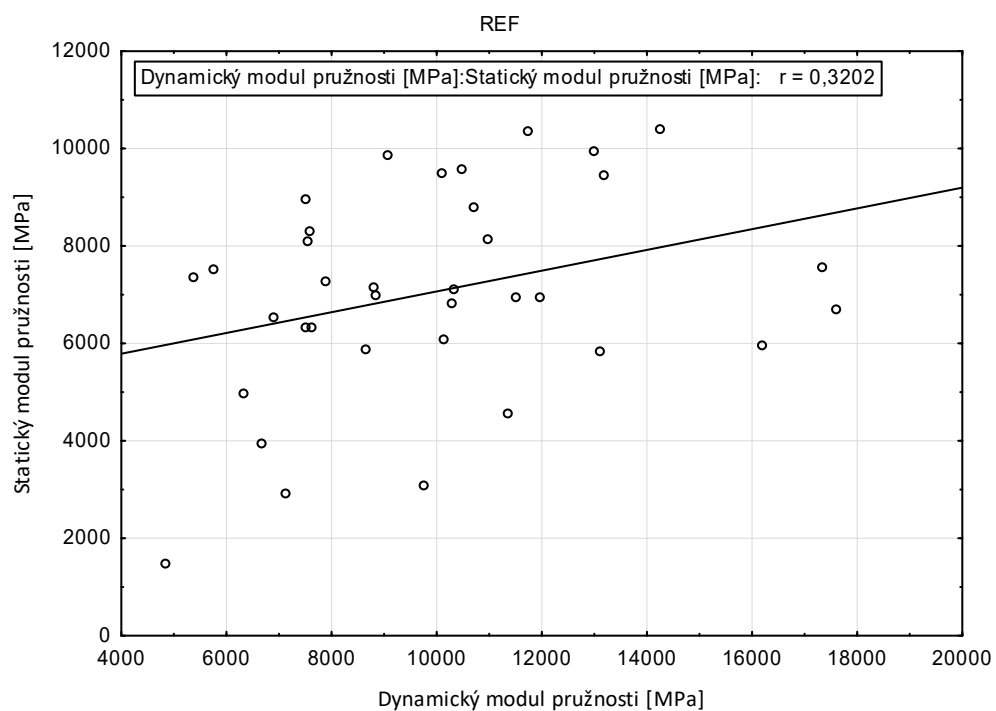
**Příloha 4:** Korelace hustoty a pevnosti v ohybu dřeva upraveného při 210 °C



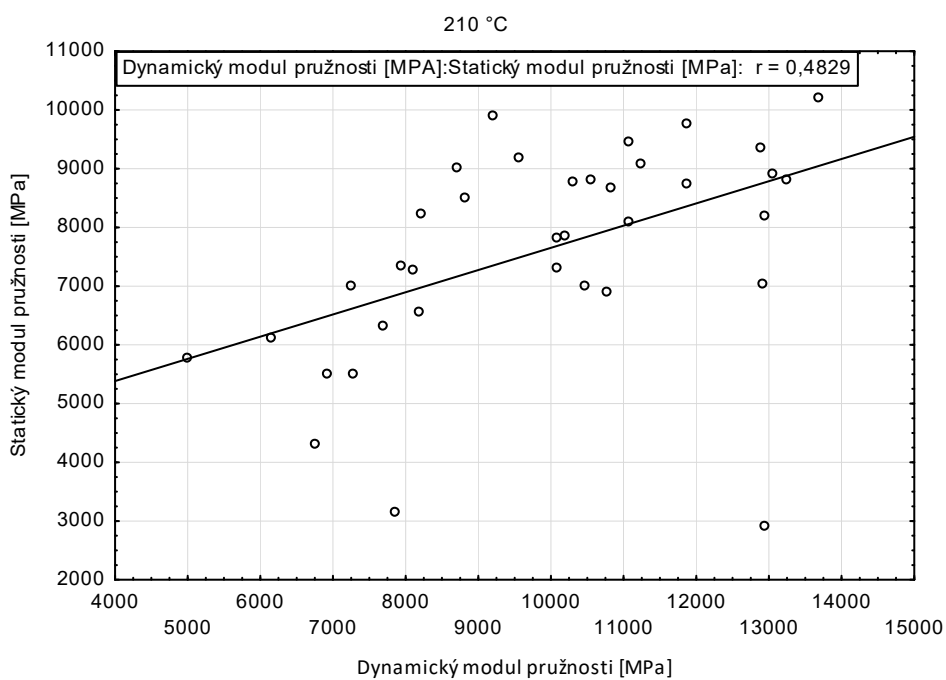
**Příloha 5:** Korelace statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu neupraveného dřeva



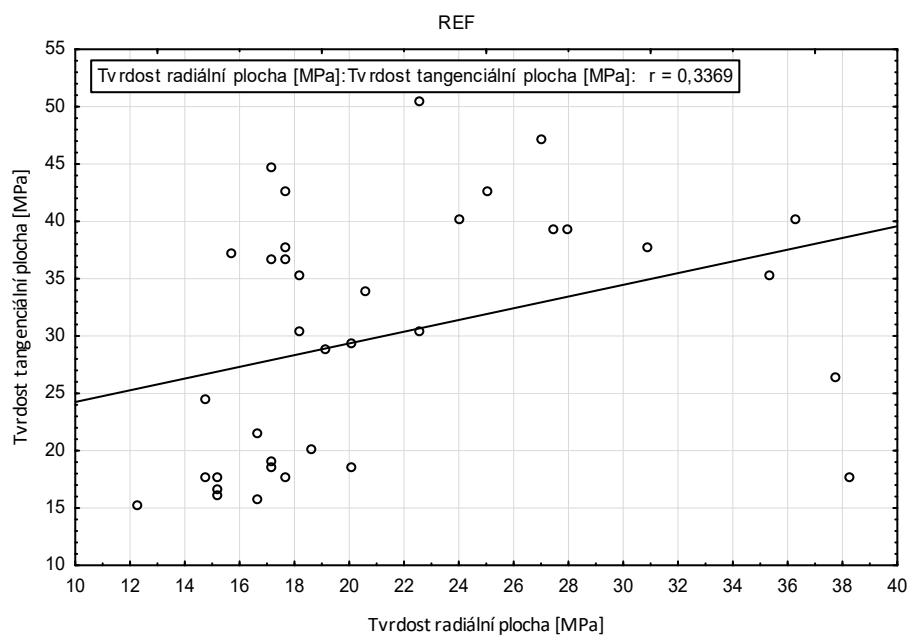
**Příloha 6:** Korelace statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu dřeva upraveného při 165 °C



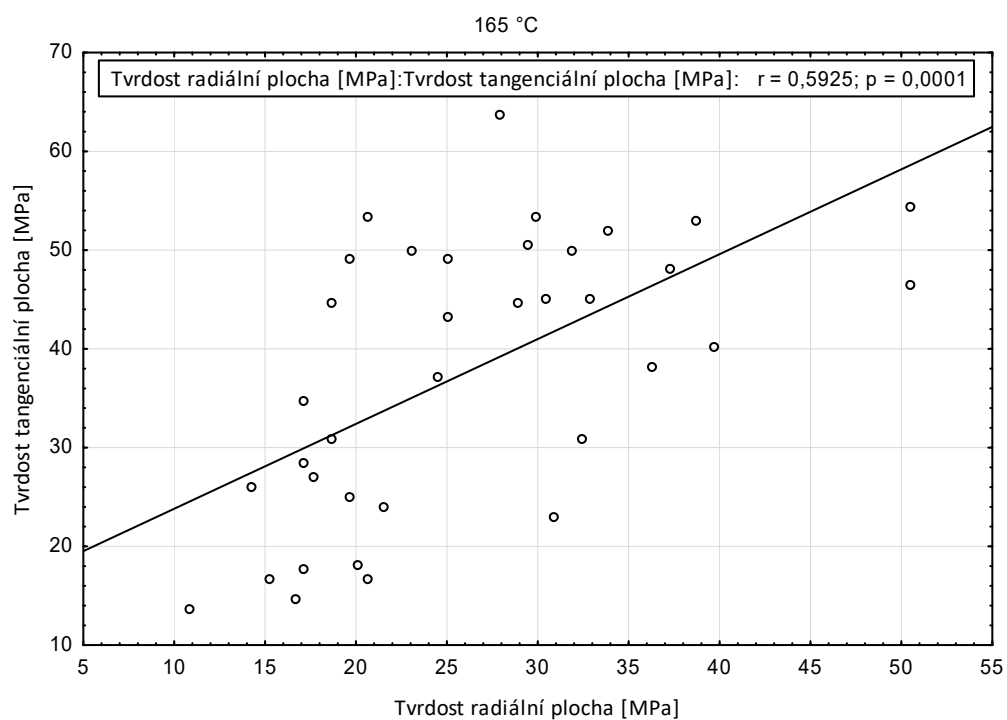
**Příloha 7:** Korelace dynamického modulu pružnosti a statického modulu pružnosti neupraveného dřeva



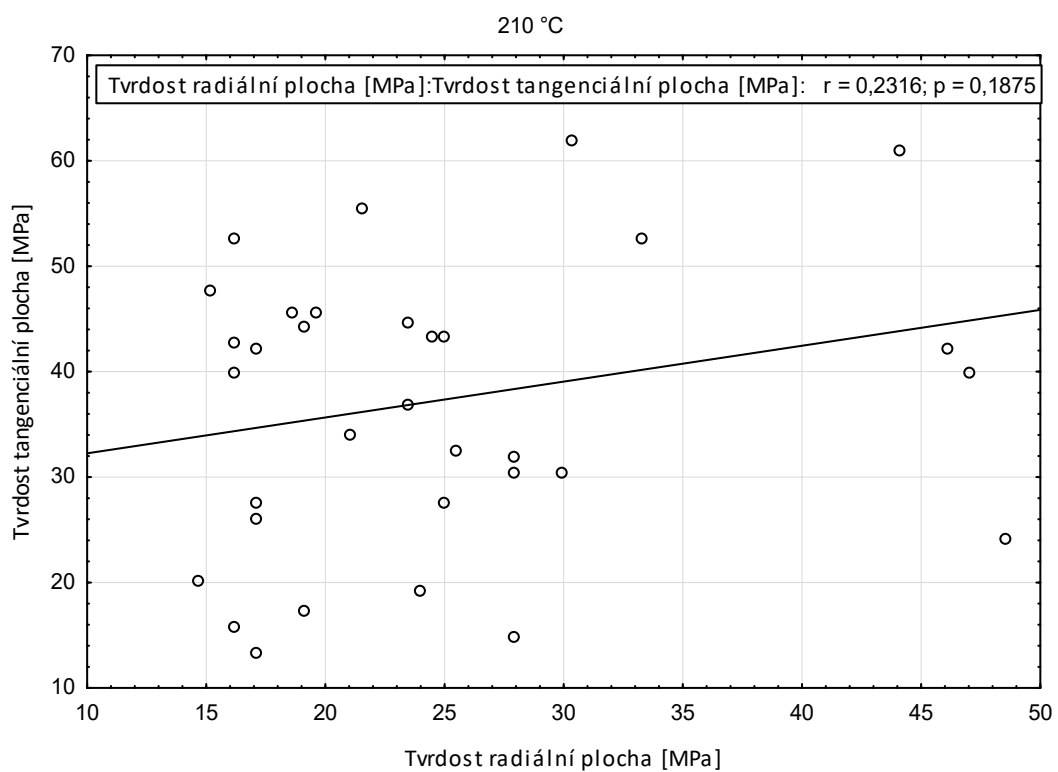
**Příloha 8:** Korelace dynamického modulu pružnosti a statického modulu pružnosti dřeva upraveného při 210 °C



**Příloha 9:** Korelace tvrdosti na radiální ploše a tvrdosti na tangenciální ploše neupraveného dřeva



**Příloha 10:** Korelace tvrdosti na radiální ploše a tvrdosti na tangenciální ploše dřeva upraveného při 165 °C



**Příloha 11:** Korelace tvrdosti na radiální ploše a tvrdosti na tangenciální ploše dřeva upraveného při 210 °C