

# Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská  
Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



## Zhodnocení dopadu tepelné úpravy na pevnost v tlaku dřeva jedle bělokoré a smrku ztepilého

Bakalářská práce

Autor: Barbora Lošťáková

Vedoucí práce: doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

2021

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Barbora Lošťáková

Dřevařství  
Dřevařství

Název práce

**Zhodnocení dopadu tepelné úpravy na pevnost v tlaku dřeva jedle bělokoré a smrku ztepilého**

Název anglicky

**Impact of Thermal Modification on Compression Strength of Silver Fir and Norway Spruce Wood**

---

### Cíle práce

Cílem práce je posoudit vliv tepelné úpravy na pevnost v tlaku dřeva jedle bělokoré (*Abies alba* Mill.) a smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) Karst.) z lokalit České republiky, a to zejména z pohledu užitných vlastností.

### Metodika

- 1) Zpracovat literární rešerši o zkoumaných dřevinách, procesu tepelné modifikace dřeva, posuzované vlastnosti a dalších faktorech, které ji ovlivňují.
- 2) Zajistit reprezentativní zkušební materiál smrku a jedle pro provedení laboratorních experimentů a na relevantní části provést tepelnou úpravu ve dvou stupních (180 °C a 200 °C).
- 3) Normalizovanými postupy stanovit pevnost v tlaku podél vláken a hustotu dřeva.
- 4) Zhodnotit především vliv dřeviny a tepelné úpravy, případně pozice v kmeni a dalších faktorů na zkoumanou vlastnost, a z toho vyplývající dopad na potenciální využití dřeva.
- 5) Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě. Dosažené hodnoty porovnat s údaji uvedenými v odborné literatuře.

harmonogram:

duben až říjen 2020 – zpracování literární rešerše

září až listopad – výroba zkušebních těles,

říjen až prosinec 2020 – měření a zpracování dat

leden až březen 2021 – tvorba vlastní práce

## Doporučený rozsah práce

40 – 50

## Klíčová slova

Thermowood, mechanické vlastnosti, Abies alba, Picea abies, variabilita

---

## Doporučené zdroje informací

- DINWOODIE, J. M. Timber: Its nature and behavior, Taylor & Francis New York, USA, 2000. 258 s.
- HILL, C. A. S. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes; John Wiley&Sons: London, UK, 2006. 260 s.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D, KURJATKO, S., BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání. Bratislava: Príroda, 1997. 485 s.
- REINPRECHT, L., VIDHOLOVÁ, Z. (2011). Termodrevo. Česká republika. 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.
- ZOBEL, B. J., VAN BUITENEN, J. P. Wood variation, its causes and control. Springer-Verlag. Berlin, 1989. 363 s.

---

## Předběžný termín obhajoby

2020/21 LS – FLD

## Vedoucí práce

doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

## Konzultant

Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

Elektronicky schváleno dne 14. 7. 2020

**Ing. Radek Rinn**

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 21. 10. 2020

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 11. 03. 2021

### **Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Zhodnocení dopadu tepelné úpravy na pevnost v tlaku dřeva jedle bělokoré a smrku ztepilého“ vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Aleše Zeidlera, Ph.D., a použila 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 16. 4. 2021

.....

**Poděkování:**

Chtěla bych poděkovat doc. Ing. Aleši Zeidlerovi, Ph.D., za odborné vedení mé bakalářské práce, za čas, který tomu obětoval, a za rady, které mi ochotně poskytoval. Dále bych ráda poděkovala Ing. Tomáši Holečkovi za zajištění zkušebních těles a pomoc při měření.

## **Abstrakt**

Tato práce posuzuje vliv tepelné úpravy na pevnost v tlaku podél vláken a s ní spojené fyzikální vlastnosti – hustotu a rovnovážnou vlhkost – u jedle bělokoré (*Abies alba* Mill.) a smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) Karst.). Tepelná úprava byla provedena podle metody Thermowood při teplotě 180 °C a 200 °C působící na vzorky 3 hodiny. Všechny vlastnosti byly určovány dle platných norem. Dále práce posuzuje závislost pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny na hustotě u referenčních a upravených vzorků a také její závislost na pozici ve kmeni. Výsledky se ve většině případů shodovaly s obecnými trendy. Pevnost v tlaku podél vláken rostla v důsledku snížení rovnovážné vlhkosti působením vyšších teplot. Mírně se snížila pouze u jedle bělokoré upravené 180 °C. Hustota se s rostoucí teplotou úpravy snižovala stejně jako obsah rovnovážné vlhkosti, který ale neklesl tolik jako u ostatních autorů. Výraznější změny všech vlastností se projeví u smrku ztepilého.

## **Klíčová slova**

Thermowood, mechanické vlastnosti, *Abies alba*, *Picea abies*, variabilita

## **Abstract**

This thesis monitors the effect of heat treatment on the compressive strength parallel to the grain and the related physical properties – density and equilibrium moisture content – of the European silver fir (*Abies alba* Mill.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). The heat treatment was performed according to the Thermowood method at 180 °C and 200 °C acting on samples for 3 hours. All characteristics were determined according to the standards. The thesis further assesses the dependence of the compressive strength parallel to the grain on the density of the reference and treated samples and also its dependence on the position in the trunk. The results were in most cases consistent with general trends. Compressive strength parallel to the grain increased due to the reduction of equilibrium moisture content caused by higher temperatures. It decreased slightly only for the 180 °C-treated European silver fir. The density decreased as the temperature of the treatment increased, as well as equilibrium moisture content, which did not decrease as much as the other authors mentioned. Significant changes in all characteristics occurred in the Norway spruce.

## **Keywords**

Thermowood, mechanical properties, *Abies alba*, *Picea abies*, variability

## Obsah

1	Úvod .....	9
2	Cíl práce.....	10
3	Rozbor problematiky .....	11
3.1	Smrk ztepilý ( <i>Picea abies</i> (L) Karst.) .....	11
3.1.1	Charakteristika a výskyt .....	11
3.1.2	Stavba dřeva.....	11
3.1.3	Vlastnosti dřeva a využití.....	12
3.2	Jedle bělokorá ( <i>Abies alba</i> Mill.).....	12
3.2.1	Charakteristika a výskyt .....	12
3.2.2	Stavba dřeva.....	13
3.2.3	Vlastnosti dřeva a využití.....	14
3.3	Pevnost dřeva .....	14
3.3.1	Pevnost dřeva v tlaku podél vláken .....	15
3.4	Faktory ovlivňující pevnost v tlaku podél vláken .....	15
3.4.1	Vlhkost dřeva .....	15
3.4.2	Hustota dřeva.....	17
3.4.3	Teplota dřeva .....	18
3.5	Termická úprava dřeva.....	18
3.5.1	ThermoWood .....	22
3.5.2	Jiné způsoby termické úpravy .....	25
4	Metodika .....	26
4.1	Příprava vzorků.....	26
4.2	Termická úprava vzorků a klimatizování.....	26
4.3	Měření a stanovení mechanických a fyzikálních vlastností .....	27
4.3.1	Měření pevnosti v tlaku podél vláken.....	27
4.3.2	Stanovení vlhkosti .....	28
4.3.3	Stanovení hustoty .....	28
4.3.4	Zpracování a vyhodnocení dat .....	28
5	Výsledky a diskuze.....	30
5.1	Pevnost v tlaku podél vláken .....	30
5.2	Hustota .....	36
5.3	Vlhkost .....	38
6	Závěr.....	40
7	Použité zdroje .....	42

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma výroby ThermoWood (ThermoWood Handbook, 2003) .....	23
Obrázek 2: Efekt procesu ThermoWood na některé vlastnosti měkkého a tvrdého dřeva upraveného podle klasifikační třídy Thermo-S a Thermo-D (ThermoWood Handbook, 2003).....	24
Obrázek 3: Schéma výroby vzorků z jedné latě.....	26
Obrázek 4: Čelisti trhačského stroje pro zkoušení pevnosti podél vláken.....	28
Obrázek 5: Vzorek po této zkoušce.....	28

## Seznam grafů

Graf 1: Úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě a času působení .....	19
Graf 2: Změna vlhkosti jedle bělokoré s rostoucí teplotou úpravy (Kol a kol., 2015) ....	20
Graf 3: Pokles pevnosti v tlaku smrkového dřeva v závislosti na teplotě.....	21
Graf 4: Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny pro neupravené a tepelně upravené dřevo smrku s průměrnou hustotou 420 kg/m <sup>3</sup> (ThermoWood Handbook, 2003).....	21
Graf 5: Změna pevnosti v tlaku podél vláken jedle bělokoré se zvyšující se teplotou úpravy (Kol a kol., 2015) .....	22
Graf 6: Pevnost v tlaku podél vláken v závislosti na tepelné úpravě jedle bělokoré .....	31
Graf 7: Pevnost v tlaku podél vláken v závislosti na tepelné úpravě smrku ztepilého ..	33
Graf 8: Závislost pevnosti v tlaku podél vláken na hustotě referenčního dřeva jedle bělokoré .....	34
Graf 9: Závislost pevnosti v tlaku podél vláken na hustotě tepelně upraveného dřeva jedle bělokoré při 180 °C .....	34
Graf 10: Závislost pevnosti v tlaku podél vláken na hustotě tepelně upraveného dřeva jedle bělokoré při 200 °C .....	35
Graf 11: Závislost pevnosti v tlaku podél vláken na pozici ve kmeni jedle bělokoré .....	36
Graf 12: Hustota jedle bělokoré v závislosti na tepelné úpravě.....	37
Graf 13: Hustota smrku ztepilého v závislosti na tepelné úpravě.....	38

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Statistické charakteristiky pevnosti v tlaku podél vláken [MPa] pro jedli bělokorou .....	31
Tabulka 2: Statistické charakteristiky pevnosti v tlaku podél vláken [MPa] pro smrk ztepilý.....	33
Tabulka 3: Statistické charakteristiky hustoty [kg/m <sup>3</sup> ] pro jedli bělokorou.....	37
Tabulka 4: Statistické charakteristiky hustoty [kg/m <sup>3</sup> ] pro smrk ztepilý .....	38



# 1 Úvod

Dřevo je přírodní materiál se spoustou výhodných vlastností, díky kterým má velmi široké uplatnění. Hlavními výhodami dřeva jsou jeho snadná opracovatelnost, nízká hmotnost a dobré mechanické vlastnosti. Zároveň má ale dřevo také negativní vlastnosti. Těmi jsou hlavně špatná odolnost vůči biotickým a abiotickým činitelům, hygroskopicitá a s tím spojená rozměrová nestabilita a anizotropní charakter. Tyto nevýhody se snažíme co nejvíce omezit, a to cestou biologickou, chemickou a v neposlední řadě také termickou, které je věnována tato práce.

Modifikace dřeva působením vyšších teplot se používá již mnoho let. V začátcích se dřevo pouze opalovalo či sušilo, než byla vynalezena průmyslová technologie, která se neustále zkoumá a vyvíjí. U jednotlivých technologií se liší teplota zpracování, doba jejího působení, ale také prostředí, ve kterém je úprava prováděna. Během tepelné úpravy dochází ke změně chemické struktury dřeva, což má za následek hned několik změn ve vlastnostech. Pomocí zvýšené teploty se mění některé vlastnosti dřeva kladně a některé záporně. Zvyšuje se rozměrová stabilita a odolnost proti biotickým činitelům, jako jsou např. dřevokazné houby nebo hmyz. Na úkor zlepšení těchto vlastností se ale zhoršují pevnostní vlastnosti a pružnost. Tyto změny doprovází také změna barvy, v případě jehličnatých dřevin zkoumaných v této práci ztmavnutí.

## **2 Cíl práce**

Cílem této práce bylo posoudit vliv tepelné úpravy na pevnost v tlaku podél vláken a s ní související hustotu a vlhkost pro dvě dřeviny – smrk ztepilý a jedli bělokorou. Sledované vlastnosti byly zjišťovány pro neupravené referenční vzorky a pro vzorky tepelně upravené při teplotě 180 °C a 200 °C podle finské metody ThermoWood. Tyto výsledky bylo třeba následně porovnat mezi sebou a také s literaturou a jinými výzkumy a na základě získaných dat zhodnotit dopady termické modifikace na užité vlastnosti jedle bělokoré a smrku ztepilého.

## 3 Rozbor problematiky

### 3.1 Smrk ztepilý (*Picea abies* (L) Karst.)

#### 3.1.1 Charakteristika a výskyt

*Picea abies* (L) Karst. (smrk ztepilý) řadíme podle systému BioLib do rodu *Picea* A. Dietr (smrk), podčeledi *Piceoideae* Frankis, čeledi *Pinaceae* Spreng. ex F. Rudolphi (borovicovité), řádu *Pinales* Gorozh. (borovicotvaré), třídy *Pinopsida* Burnett (jehličnany), oddělení *Pinophyta* Reveal (jehličnany), říše *Plantae* Haeckel (rostliny).

Smrk ztepilý je stálezelený jehličnatý strom, který dorůstá výšky 30–50 m, někdy až 70 m. Je nejvýše dorůstajícím domácím stromem v Evropě. Má pravidelně kuželovitou korunu, přeslenité větve, tmavozelené jehlice dlouhé 1–2 cm, na průřezu kosočtverečně čtyřhranné, přeslenovité nebo nezřetelně dvoustranně rozčísnuté. Kůra je hnědavě červená, jemně šupinatá a málo odlupčivá. Kveté v dubnu a květnu. Samčí květy mají karmínově červenou barvu a jsou dlouhé 1 cm. Podlouhlé samičí šištice jsou asi 12–16 cm dlouhé s hladkými okraji šupin (Kremer, 1995).

Je nenáročný na půdu a podloží. Roste ve všech typech půd, když nejsou příliš suché a chudé. Při dostatečné vlhkosti může růst i v mělkých skalnatých půdách, ale vždy potřebuje humus. Nedaří se mu v chudých písčitých a křemičitých půdách nebo v kyselých rašelinách. Má veliké ekologické rozpětí a zaujímá rozmanitá stanoviště. Snáší dobře přenos do jiných podmínek. Smrky z různých klimatických podmínek mají různou variabilitu morfologických znaků a fyziologických vlastností. Severský smrk roste od Norska až po východní Ural. Horský smrk tvoří porosty v subalpínských polohách hor střední a jižní Evropy. V Česku smrk osidluje všechny horské oblasti (Svoboda, 1953).

Smrk ztepilý je nejvíce rozšířeným stromem v ČR. Poleno (1996) uvádí pokles zastoupení smrku z 60,5 % v roce 1950 na 54,6 % v roce 1990. Jeho zastoupení bylo podle Zprávy o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2019 1 292 461 ha, což odpovídá 49,54 % z celkové plochy lesa a střední věk smrků byl 63 let.

#### 3.1.2 Stavba dřeva

##### Makroskopické znaky

Barva dřeva je nažloutlá nebo světle žlutavě hnědá, bělejší než u jedlového dřeva. Jádru není zřetelné. Ve středové části okolo dřeně se nachází nezbarvené vyzrálé dřevo, které má v čerstvě vytěžené kulatině výrazně nižší vlhkost než běl. Letokruhy jsou ostře vyznačené, jarní dřevo pozvolna přechází do letního. U jehličnatých dřevin pozorujeme nejvýraznější rozdíl mezi jarním a letním dřevem. Jarní dřevo je světlejší a měkčí než letní dřevo, které má až třikrát vyšší hustotu. Dřeňové paprsky jsou viditelné pouze pod

lupou, úzká dřeň má v průměru nejvýše 0,5 cm. Smrkové dřevo obsahuje veliké množství drobných žlutavých suků vybíhajících šikmo vzhůru. Drobné pryskyřičné kanálky jsou okem nezřetelné. Můžeme je pozorovat pomocí lupy na příčném řezu jako póry na rozhraní jarního a letního dřeva a na podélných řezech jako úzké trhlínky vyplněné pryskyřicí. Dřevo voní pryskyřicí a podélné řezy se slabě lesknou (Balabán, 1955; Požgaj a kol., 1993).

### **Mikroskopické znaky**

Dřeňové paprsky jsou jednovrstvé (ojediněle vícevrstvé), složené z parenchymu a příčných tracheid po obvodu. Stěny tracheid mohou být hladké nebo lehce zvlňené a dvojtečkované. Parenchymatické buňky dřeňového paprsku obsahují drobnější dvojtečky se šikmým štěrbinovým pórem. Tracheidy v pozdním dřevě mohou být vyztuženy šroubovicí. Dřevní parenchym chybí. Pryskyřičné kanálky jsou nejlépe viditelné na příčném řezu a mají tlustostěnné epitelové buňky (Balabán, 1955).

### **3.1.3 Vlastnosti dřeva a využití**

Smrkové dřevo je měkké a poměrně lehké. Díky své dlouhvláknitosti má dobrou houževnatost, pevnost a pružnost. Dá se snadno mořit a natírat, impregnační schopnost je však velmi malá. Značně sesychá a běl i zralé dřevo jsou málo trvanlivé. Výchřevnost má smrk o něco menší než borovice a jedle. Velmi dobře se štípe a opracovává, proto je naším nejdůležitějším užitkovým dřevem (Balabán, 1955).

Smrk zařazujeme do třídy trvanlivosti 4, tzn. málo trvanlivé, a do třídy hořlavosti C, D. Stupeň hořlavosti je C2 a hustota smrku je okolo 460 kg/m<sup>3</sup>. Podle impregnovatelnosti se běl řadí do třídy 3, tzn. těžko impregnovatelné, a zralé dřevo do třídy 4, tzn. extrémně těžko impregnovatelné (Reinprecht, 2008).

Používá se hlavně pro nadzemní stavby, střešní krovy, lešení, bednění, piloty aj. Je významnou surovinou pro výrobu celulózy, papíru a aglomerovaných materiálů. Také se využívá jako důlní dřevo, pro rozvodové sloupy, šindele, špejle. Hlavní užití má při výrobě nábytku a v truhlářství při výrobě oken, dveří, schodišť atd. Z horských smrků, které mají úzké pravidelné letokruhy, se vyrábí rezonanční prkénka a z nich hudební nástroje (Balabán, 1955).

## **3.2 Jedle bělokora (*Abies alba* Mill.)**

### **3.2.1 Charakteristika a výskyt**

*Abies alba* Mill. (jedli bělokora) řadíme podle systému BioLib do rodu *Abies* Mill. (jedle), podčeledi *Abietoideae* Lindl. Emend Pilger & Melchior (jedlové), čeledi *Pinaceae* Spreng. ex F. Rudolphi (borovicovitě), řádu *Pinales* Gorozh (borovicotvaré), třídy

*Pinopsida* Burnett (jehličnany), oddělení *Pinophyta* Reveal (jehličnany), říše *Plantae* Haeckel (rostliny).

Jedle Bělokorá je vždyzelený jednodomý jehličnatý strom dorůstající do výšky 50 m. V mládí má kuželovitou pravidelnou korunu, ve stáří zploštělou. Větve vodorovně odstávají, na vrcholu jsou vzpřímeny. Má 3 cm dlouhé ohebné jehlice s tupými konci. Jsou dvouřadě rozčísnuj oboustranně v několika vrstvách. Kůra je hladká, tmavošedá a stářím stále více puká, občas mívá mohutné pryskyřičné puchýřky. Kvete v dubnu a květnu. Má samčí kulovité, nažloutlé květy v úžlabí jehlic. Samičí šištice jsou 10 cm dlouhé vzpřímené, válcovité, zpočátku nazelenalé, později bleděhnědé. Šupiny se uvolňují jednotlivě již na stromě. Dožívá se věku 200–300 let (Kremer, 1995).

Tvoří porosty s bukem, borovicí a smrkem ve výškách 400–900 m v chladných středně hlubokých půdách. Roste především ve střední Evropě, ale také ve Francii, v pohoří Balkánu a na Korsice (Kremer, 1995).

Je to dřevina oceánického klimatu, kde jsou mírné zimy, ale přesto roste v horách. Roste na půdách, které vznikly z rozmanitých hornin, tj. pískovce, břidlice, vápence a dolomitu. Má vyšší nároky na živiny než smrk a potřebuje větší hloubku půd. Oproti smrku neničí půdu, ale chrání ji. Jedle byla vytlačena v období rozkvětu holosečného hospodářství, proto je její zastoupení výrazně nižší než dříve.

Česká jedle zaujímal Český les, Šumavu a vyplňovala jižní polovinu Čech včetně celé Českomoravské vysočiny. Na Šumavě dosahovala ohromných rozměrů a její útlum nebyl tak veliký jako ve francké oblasti. Hojně zastoupení měla také v Bavorském lese. Kromě oblasti Šumavy jedle postoupila své místo smrku. Dnes se díky podpoře kulturou nachází na Dražanské plošině, Litovelsku, Uničovsku, Plumlovsku a také v Moravském krasu (Svoboda, 1953).

Poleno (1996) uvádí pokles zastoupení jedle z 2,8 % v roce 1950 na 1 % v roce 1990. Podle Zprávy o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2019 bylo zastoupení jedle bělokoré pouhých 30 663 ha, což odpovídá 1,2 % z celkové plochy lesa a střední věk jedlí byl 62 let.

### **3.2.2 Stavba dřeva**

#### **Makroskopické znaky**

Barva dřeva je nažloutle bílá až červenavá, směrem ke dřeni má šedavý nebo modravě šedý nádech. Jarní dřevo je ostře oddělené od tmavě zbarveného letního dřeva. Dřeňové paprsky nejsou okem zřetelné. Tmavé kruhové suky nesrůstají se dřevem a po seschnutí snadno vypadávají. Pryskyřičné kanálky chybí a dřevo nevoní po

pryskyřici. Kolem dřeně je dřevo vyzrálé, jádro je nezřetelné. Podélné řezy jsou slabě lesklé (Balabán, 1955; Němec, 2005).

### **Mikroskopické znaky**

Jednovrstvé dřeňové paprsky se skládají pouze z parenchymatických buněk, které mají stěny s drobnými dvojtečkami s velkým šikmým vejčitým pórem. Dřeňové paprsky tvoří na tangenciálním řezu jednoduché řady o délce 15–40 parenchymatických buněk. Tracheidy mají hladké stěny s velkými dvojtečkami. Póry jsou kruhové a přesně uprostřed, na styčných plochách se dřeňovými paprsky jsou šikmé. Pryskyřičné kanálky chybí. Ve starším dřevě obsahují buňky dřeňových paprsků často krystalky šťavelanu vápenatého (Balabán, 1955).

### **3.2.3 Vlastnosti dřeva a využití**

Dřevo je měkké a poměrně lehké. Je velmi pružné, ale méně ohebné, málo sesychá a dobře se štípe. Je trvanlivější než smrkové dřevo, ale musí být uloženo v suchu, nebo pod vodou. Jedlové dřevo je méně oblíbené než smrkové z důvodu vysoké odlupčivosti, tmavší zašedlé barvy a velikého rozdílu tvrdosti jarního a letního dřeva. Je velmi vhodné pro vodní stavby, jako jsou mosty, hráze, jezy. Vyrábí se z něj šindele, luby a dužiny na sudy. Stejněměrně a pomalu rostlé dřevo má velmi dobré rezonanční vlastnosti (Balabán, 1955; Němec, 2005).

Jedli řadíme do třídy trvanlivosti 4, tzn. málo trvanlivé, a do třídy hořlavosti C, D. Stupeň hořlavosti je C2 a hustota jedlového dřeva je okolo 460 kg/m<sup>3</sup>. Bělové dřevo patří do třídy impregnovatelnosti 3, tzn. středně impregnovatelné, a zralé dřevo do třídy impregnovatelnosti 4, tzn. těžko impregnovatelné (Reinprecht, 2008).

Je alternativou smrku jako stavební dřevo. Používá se pro stavebně truhlářské výrobky, zahradní architekturu a také na střešní konstrukce. Dezintegrované dřevo má využití ve výrobě aglomerovaných materiálů, papíru a celulózy. Opracovává se hůře než smrk, ale stále snadno. Po hoblování má hedvábný a chlupatý povrch.

Jedle má velký význam jako meliorační a zpevňující dřevina porostu, protože má optimální poměr mezi pevností v tlaku, modulem pružnosti v ohybu a objemovou hmotností (Horáček, 2017).

## **3.3 Pevnost dřeva**

Pevností dřeva myslíme odpor proti jeho trvalému porušení. Vyjadřujeme ji pomocí napětí, při kterém se poruší soudržnost dřeva. Pevnost můžeme dělit podle způsobu zatížení na pevnost v tlaku, tahu, ohybu, krutu a smyku, nebo třeba podle časového průběhu zátěžové síly na statickou a dynamickou (Požgaj a kol., 1993).

### 3.3.1 Pevnost dřeva v tlaku podél vláken

Pevnost rozdělujeme podle směru působení síly na pevnost v tlaku podél vláken  $\sigma_L$ , kolmo na vlákna v radiálním směru  $\sigma_R$  a kolmo na vlákna v tangenciálním směru  $\sigma_T$ . Tlak rovnoběžně s vlákny má největší uplatnění (např. nosníky, piloty atd.).

Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken vypočteme podle tohoto vztahu:

$$\sigma_p = \frac{F_{max}}{a \times b} \quad [MPa]$$

Kde:  $\sigma_p$  je skutečná síla [MPa]

$F_{max}$  je maximální zatížení [N]

$a, b$  jsou příčné rozměry tělesa [mm]

Deformace se projevuje zkrácením délky tělesa. Průměrná hodnota meze pevnosti v tlaku ve směru vláken pro dřevo s vlhkostí 12 % se pohybuje okolo 50 MPa, pro smrk je to 44,4 MPa. Variační koeficient je pak 8–16 %. Mez úměrnosti je pro jehličnany asi 68 %, pro měkké listnáče asi 60 % a pro tvrdé listnáče asi 56 % z meze pevnosti (Gandelová, 2009).

## 3.4 Faktory ovlivňující pevnost v tlaku podél vláken

### 3.4.1 Vlhkost dřeva

Dřevo považujeme za hygroskopický materiál. Je schopno přijímat a odevzdávat vodu v plynném nebo kapalném stavu. Přizpůsobuje svoji vlhkost vlhkosti okolního prostředí. Voda je ze všech kapalin pro dřevo nejdůležitější a je podmínkou jeho existence. Vyšší obsah vody nepříznivě ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti. Také snižuje odolnost proti houbám a hmyzu.

Vlhkostí dřeva nazýváme přítomnost vody nebo jiných tekutin ve dřevě. Podle podílu vody ve dřevě rozlišujeme:

- Vlhkost suchého dřeva: Je to ustálený poměr hmotnosti vody ke hmotnosti sušiny při sušení dřeva teplotou kolem 103 °C, kdy ve dřevě není žádná vázaná ani volná voda. Tuto vlhkost vyjadřujeme vlhkostí absolutně suchého dřeva  $w_0 = 0$  %.
- Vlhkost při nasycení buněčných stěn: Mikrokapilární systém buněčné stěny je úplně vyplněn vodou. Tuto vlhkost vyjadřujeme mezí nasycení buněčných stěn (MNBS) nebo mezí hygroskopicity (MH), udává se kolem 22–35 % (u MNBS je voda v kapalném skupenství, u MH v plynném).

- Vlhkost při nasycení dřeva: Mikrokapilární i makrokapilární systém je zaplněn vodou a dřevo obsahuje maximální množství vody. Tuto vlhkost vyjadřujeme maximální vlhkostí dřeva  $w_{max} = 80-400 \%$ .

Podle uložení vody ve dřevě dělíme vodu na chemicky vázanou, vázanou (hygroskopickou) a volnou (kapilární) (Horáček, 1998).

Vlhkost dřeva vyjadřujeme podílem hmotnosti vody ke hmotnosti dřeva v suchém stavu, jedná-li se o vlhkost absolutní, nebo ke hmotnosti mokrého dřeva, jedná-li se o vlhkost relativní.

Absolutní vlhkost dřeva vypočítáme ze vztahu:

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

Relativní vlhkost dřeva vypočítáme ze vztahu:

$$w_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \times 100 \quad [\%]$$

Kde:  $m_w$  je hmotnost vlhkého dřeva [kg]

$m_0$  je hmotnost suchého dřeva [kg]

Absolutní a relativní vlhkost mezi sebou můžeme přepočítat podle vztahů:

$$w_{abs} = \frac{100 \times w_{rel}}{100 - w_{rel}} \quad w_{rel} = \frac{100 \times w_{abs}}{100 + w_{abs}}$$

Rozložení vlhkosti v kmeni stromu je nerovnoměrné, s výškou a po průběhu kmene se mění.

Se stoupající vlhkostí do meze hygroskopicity se pevnost dřeva snižuje. V intervalu 9–15 % lze považovat závislost změny pevnosti na změně obsahu vázané vody za lineární a můžeme ji nahradit přímkou. Do 9 % a od 15 % je závislost nelineární. Při změně vlhkosti o 1 % v rozsahu vody vázané se pevnost dřeva změní přibližně o 3–4 %.

K přepočtu na 12% vlhkost můžeme použít vztah:

$$\sigma_{12} = \sigma_w [1 + \alpha (w - 12)]$$

Kde:  $\sigma_w$  je pevnost dřeva při zkoušení [MPa]

$w$  je vlhkost dřeva v průběhu zkoušení [%]

$\alpha$  je opravný koeficient (pro tlak ve směru vláken je  $\alpha = 0,04$ )



Při zatížení tlakem ve směru vláken je při vlhkosti na mezi hygroscopicity mez pevnosti asi 3,5x menší a deformace asi 7x menší než při vlhkosti  $w = 0$  %. Jsou tedy namáhány i vazby, které jsou zeslabeny navázáním molekul vody (Gandelová a kol., 2009).

### 3.4.2 Hustota dřeva

Hustota dřeva je hmotnost jednotkového objemu dřeva při určité vlhkosti a vypočítáme ji pomocí vztahu:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [kg/m^3]$$

Kde:  $m_w$  je hmotnost dřeva při určité vlhkosti [kg]

$V_w$  je objem dřeva při určité vlhkosti [ $m^3$ ]

Kvůli porovnávání výsledků používáme hustotu dřeva v absolutně suchém stavu:

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

Kde:  $m_0$  je hmotnost při nulové vlhkosti [kg]

$V_0$  je objem při nulové vlhkosti [ $m^3$ ] (Požgaj a kol., 1993)

Podle hustoty dřeva při vlhkosti 12 % rozdělujeme dřeviny do tří skupin: dřeva s nízkou hustotou (pod  $540 \text{ kg/m}^3$ ), dřeva se střední hustotou ( $540\text{--}750 \text{ kg/m}^3$ ) a dřeva s vysokou hustotou (nad  $750 \text{ kg/m}^3$ ). Smrk i jedle patří do dřevin s nízkou hustotou (smrk:  $450 \text{ kg/m}^3$  a jedle:  $435 \text{ kg/m}^3$ ) (Horáček, 1998).

Pevnost dřeva závisí na množství dřevní substance i na anatomické stavbě dřeva. Vliv hustoty na pevnost dřeva se projevuje nejvíce u suchého dřeva. U vlhkosti nad mezi hygroscopicity už není patrný. Pevnost se s rostoucí hustotou zvyšuje, ale významnou roli hraje hlavně šířka letokruhů a podíl jarního a letního dřeva (Gandelová a kol., 2009).

Hustotu dřeva výrazně ovlivňuje stavba dřeva a šířka letokruhů. Např. zvýšením tloušťky stěn letních tracheid borovice o 36 % a modřínu o 20 % se zvýší hustota borovice o 18 % a modřínu o 20 % a jejich tlaková pevnost podél vláken se zvýší o 83 až 70 %. Jehličnany mají pravidelnější stavbu dřeva a dlouhá rovná vlákna jim zajišťují vyšší pevnost a pružnost, než mají listnáče o stejné hustotě. Čím je ve dřevě více letního dřeva, tím jsou jeho mechanické vlastnosti lepší. Každá dřevina má optimální šířku letokruhů, při které dosahuje nejvyšších pevností. Dále pevnost ovlivňuje přítomnost dřeňových paprsků nebo vad ve dřevě (Požgaj a kol., 1993).

### 3.4.3 Teplota dřeva

Při sušení, lisování nebo plastifikaci je dřevo vystaveno účinkům teplot, které ovlivňují mechanické vlastnosti. S rostoucí teplotou se pevnost dřeva snižuje. Do 70 °C jsou změny pevnosti vratné, po překročení 100 °C se dřevo trvale mění a degraduje lignino-sacharidový komplex. Při 200 °C začíná pyrolýza dřeva. Vysoké teploty ovlivňují hlavně rázovou houževnatost, více u listnáčů než jehličnanů. Spolupůsobením teploty a vlhkosti najednou se pevnost snižuje výrazněji než při působení každého zvlášť (Gandelová a kol., 2009).

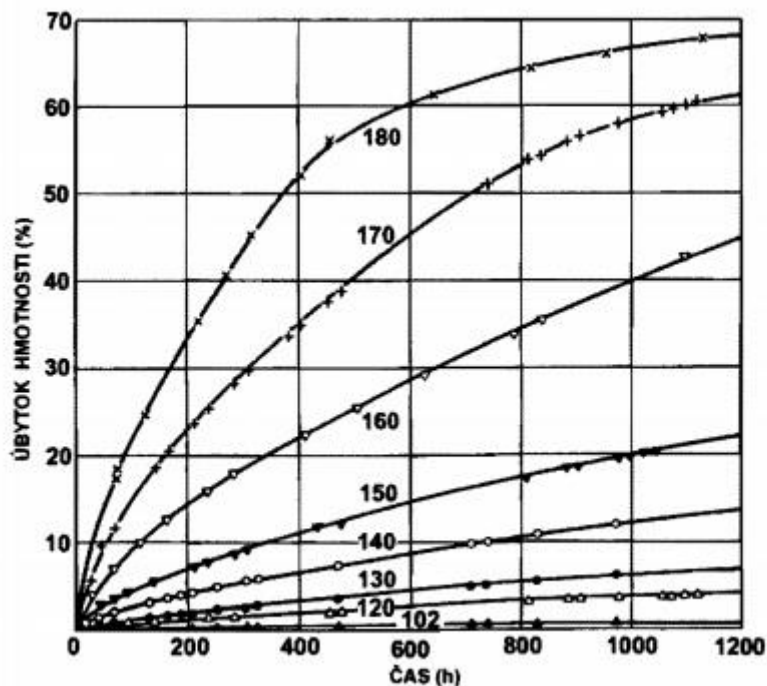
### 3.5 Termická úprava dřeva

Termickou úpravou dřeva myslíme modifikaci za zvýšené teploty. Již při teplotách nižších než 150 °C dochází k chemickým změnám ve struktuře dřeva. Teploty od 70 °C do 140 °C využíváme při paření a vaření dřeva za účelem plastifikace ligninu. Vyrábí se tak ohýbané dílce a dýhy. Při teplotách od 50 °C do 130 °C provádíme umělé sušení a při 100–150 °C kontaktní sušení. Tato teplota se využívá také při lisování kompozitních materiálů.

Se zvyšující se teplotou se chemické změny ve struktuře dřeva výrazně zrychlují. Kromě aktivační energie kovalentních vazeb a teploty prostředí jsou ovlivněny také dobou expozice, přítomností katalyzátorů, kyslíku a vody, druhem dřeviny, rozměry dřeva a počáteční vlhkostí. Dolní hranici, při které vznikají chemické změny struktury, nelze definovat.

Výraznější změny v chemické struktuře nastávají při překročení teplot 150–170 °C. Kromě plastifikace dochází k výraznějším chemickým změnám struktury polysacharidů, ligninu a doprovodných látek. Termicky modifikované dřevo ztrácí původní pevnost, stává se hydrofobnějším, odolnějším vůči biotickým činitelům a získá tmavší barvu. Při teplotách okolo 300 °C často dochází ke vznícení dřeva (Reinprecht, Vildholdová, 2011). Podle ThermoWood Handbook (2003) se také snižuje pH a zvyšují se tepelně izolační vlastnosti.

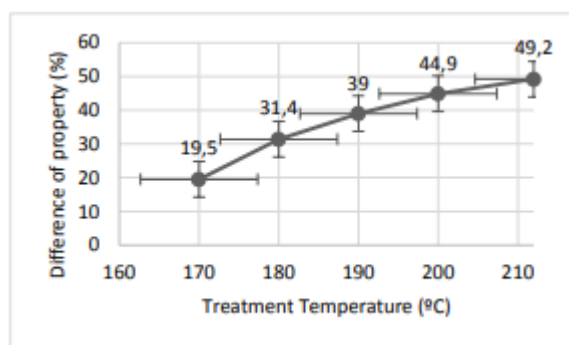
U termicky modifikovaného dřeva dochází také k úbytku hmotnosti. Se zvyšující se teplotou je úbytek vyšší. Při stejných podmínkách byl zjištěn větší úbytek hmotnosti u listnatých dřevin než u jehličnatých. Při vysokých teplotách může být úbytek hmotnosti až 75 %.



Graf 1: Úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě a času působení  
(Kačíková, Kačík, 2011)

Mění se také mikroskopická stavba dřeva. U jehličnatých dřevin bylo zjištěno, že do 100 °C si dřevo udržuje nativní strukturu. Při teplotách 100–180 °C se ojediněle vyskytovaly trhliny na okrajích dvůrkatých ztenčenin. Při 180–220 °C se tyto trhliny objevovaly více a po překročení 220 °C došlo k výrazné změně na porusech dvůrkatých ztenčenin, kde se vytvořily trhliny pod úhlem 0–30°, což odpovídá orientaci celulózových fibril ve vrstvě S2. Jehličnaté dřeviny jsou náchylné na vznik prasklin v tangenciálním směru.

Obsah rovnovážné vlhkosti dřeva se termickou úpravou při vysokých teplotách okolo 220 °C snižuje asi o polovinu oproti neupravenému dřevu. To způsobuje zvýšení rozměrové stability ovlivněné druhem dřeviny a anatomickým směrem. U termicky upraveného dřeva může být bobtnání až o 80 % nižší. Zvýšená hydrofobnost způsobuje obtížnost povrchové úpravy dřeva a jeho lepení. Znesnadňuje jí také výron pryskyřice při vyšších teplotách (Kačíková, Kačík, 2011).

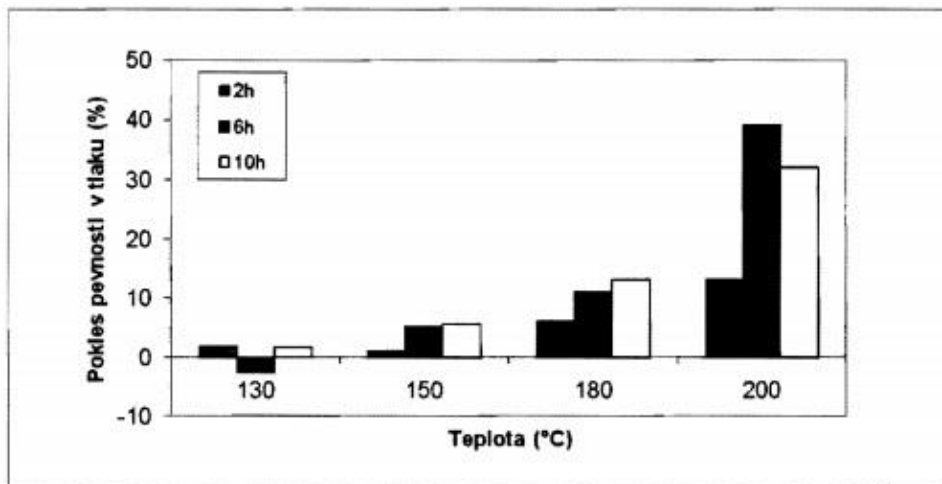


Graf 2: Změna vlhkosti jedle bělokoré s rostoucí teplotou úpravy (Kol a kol., 2015)

Vyšší odolnost vůči biotickým činitelům je způsobena hlavně změnami v chemické struktuře, a to snížením podílu -OH skupin (zvýší se hydrofobnost), snížením podílu hemicelulóz (jsou nejméně odolné biotickým činitelům) a vytvořením látek s biocidním účinkem (Kačíková, Kačík, 2011; Reinprecht, Vildholdová, 2011).

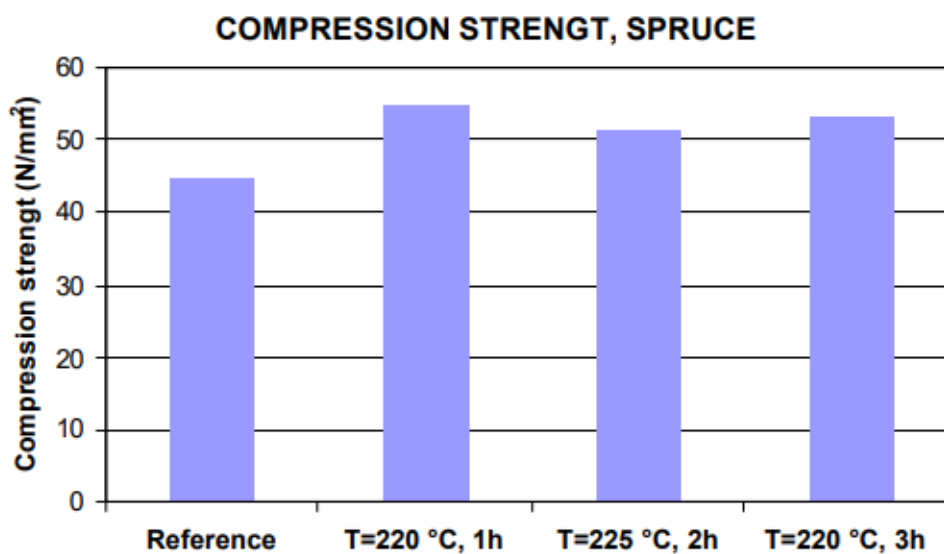
Nevýhodou termické úpravy dřeva je zhoršování mechanických vlastností. To ovlivňuje použití dřeva jako konstrukčního materiálu. Některé vlastnosti se zhoršují (rázová houževnatost, pevnost, tvrdost) a některé se mohou zlepšovat (modul pružnosti). Zhoršení pevnostních vlastností je nejvíce ovlivněno degradací hemicelulóz (Kačíková, Kačík, 2011). Na základě množství provedených experimentů se dají považovat za nejméně odolnou složku dřeva při termické úpravě hemicelulózy, naopak nejstabilnější je lignin (Reinprecht, Vildholdová, 2011).

Největší vliv na snížení mechanických vlastností při působení tepla, zejména pevnosti v ohybu a tahu, má degradace hemicelulóz, případně také krystalizace amorfni celulózy. Krystalická celulóza je ale silně anizotropní a může pozitivně ovlivňovat právě pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny. Dalším faktorem ovlivňujícím změnu mechanických vlastností může být lignin, který nedegraduje, ale repolymerizuje na nové polymery podobné ligninu. Repolymerizace ligninu může také způsobit další zesíťování ligninové sítě, což zvyšuje pevnost střední lamely. Výrazný anizotropní rozdíl u pevnosti v tlaku je způsoben rozdílnou pevností vazeb v podélném a příčném směru. Vazby v podélném směru jsou tuhé a silné, oproti tomu vazby v příčných směrech jsou slabé a měkké. Také orientace polymerních molekul a pravidelnost struktury ligninové sítě zapříčiňuje anizotropii v různých směrech. Výrazný pokles radiální pevnosti v tlaku Boonstra vysvětluje vznikem radiálních trhlin během působení tepla (Boonstra a kol., 2007).

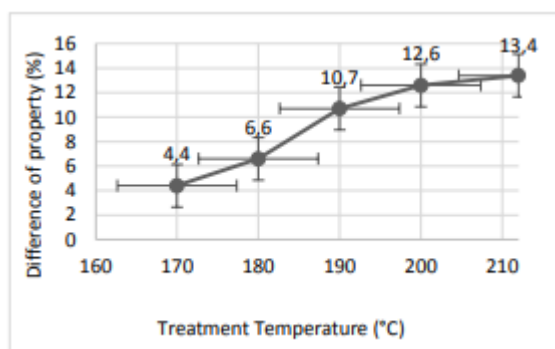


Graf 3: Pokles pevnosti v tlaku smrkového dřeva v závislosti na teplotě (Kačíková, Kačík, 2011)

Spousta autorů uvádí naopak rostoucí pevnost v tlaku podél vláken se zvyšující se teplotou úpravy. To je způsobeno snížením množství vody obsaženém v termicky upraveném dřevě (Boonstra a kol., 2007).



Graf 4: Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny pro neupravené a tepelně upravené dřevo smrku s průměrnou hustotou 420 kg/m<sup>3</sup> (ThermoWood Handbook, 2003)



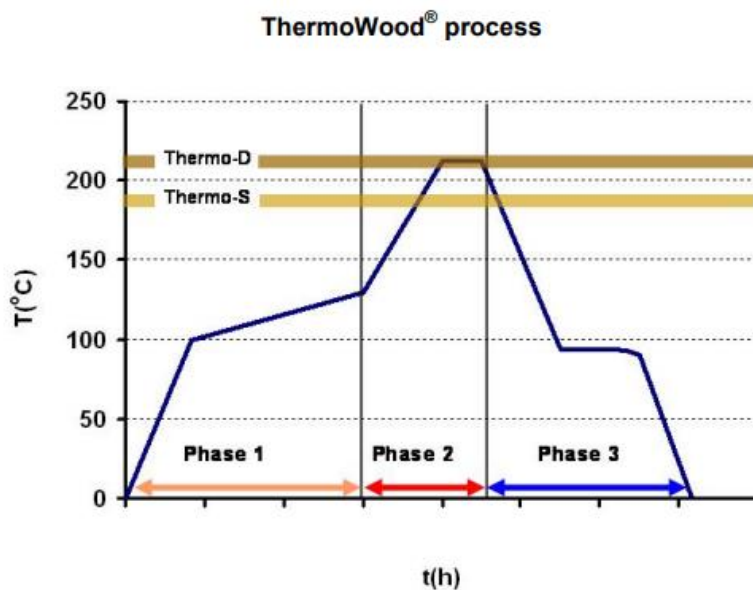
Graf 5: Změna pevnosti v tlaku podél vláken jedle bělokoré se zvyšující se teplotou úpravy (Kol a kol., 2015)

Termicky modifikované dřevo nachází uplatnění zejména na obklady fasád, podlahy, oplocení, okna a dveře, nábytek, protihlukové bariéry, dětská hřiště, sauny aj. (Reinprecht, Vildholdová, 2011).

### 3.5.1 ThermoWood

ThermoWood proces je metoda termické modifikace dřeva vynalezená ve Finsku. V Evropě ThermoWood zastává přibližně 90 % z celkového termicky modifikovaného dřeva. Skládá se ze tří etap:

- **Zvýšení teploty a sušení:** Teplota v sušárně se zvyšuje na teplotu 100 °C za působení vodní páry, následně teplota stoupá na 130 °C. Jako sušící médium používáme horký vzduch nebo páru s obsahem kyslíku 3–5 % bez zvýšeného tlaku a s rychlostí proudění minimálně 10 m/s. Na konci této etapy má dřevo přibližně nulovou vlhkost. Etapa trvá až 48 hodin. Vodní pára ovlivňuje kvalitu tepelně zpracovaného dřeva a působí také jako ochranná atmosféra proti spálení materiálu.
- **Tepelná úprava:** Teplota se zvyšuje na 185–215 °C (2–3 hodiny). Teplota a čas působení jsou dané klasifikační třídou (Thermo-S nebo Thermo-D).
- **Chlazení a úprava vlhkosti:** Dřevo se postupně ochlazuje a při teplotě 80–90 % se vlhkostně upravuje na konečnou vlhkost 4–7 %. Etapa trvá až 24 hodin (ThermoWood Handbook, 2003; Reinprecht, Vildholdová, 2011; Kačíková, Kačík, 2011; Rapp, 2001).



Obrázek 1: Schéma výroby ThermoWood (ThermoWood Handbook, 2003)

**Thermo-S:** Klíčovou vlastností je stabilita (proto písmeno S = stability). Průměrné tangenciální bobtnání a sesychání je 6–8 %. Spadá do třídy odolnosti 3. Pro jeho výrobu je použita nižší teplota a je světlejší. Je určeno především do interiéru.

**Thermo-D:** Klíčovou vlastností je trvanlivost (proto písmeno D = durability). Průměrné tangenciální bobtnání a sesychání je 5–6 %. Spadá do třídy odolnosti 2. Pro jeho výrobu jsou použity vyšší teploty a je tmavší. Je určeno do interiéru i exteriéru.

Surovinou může být zelené nebo sušené dřevo. Zelené dřevo je možné sušit rychle za vysoké teploty. Proces musí být optimalizován pro každou dřevinu zvlášť (ThermoWood Handbook, 2003).

Softwoods (pine and spruce)

	Thermo-S	Thermo- D
Treatment temperature	190 °C	212 °C
Weather resistance	+	++
Dimensional stability	+	++
Bending strength	no change	-
Colour darkness	+	++

Hardwoods (birch and aspen)

	Thermo-S	Thermo- D
Treatment temperature	185 °C	200 °C
Weather resistance	no change	+
Dimensional stability	+	+
Bending strength	no change	-
Colour darkness	+	++

Obrázek 2: Efekt procesu ThermoWood na některé vlastnosti měkkého a tvrdého dřeva upraveného podle klasifikační třídy Thermo-S a Thermo-D (ThermoWood Handbook, 2003)

Nejčastěji používanými dřevinami jsou borovice a smrk. V borovém dřevě může docházet k uvolnění suků a výtoku pryskyřice, což ztěžuje následné opracování. Využívá se nejčastěji v exteriéru (ploty, obklady stěn, okna aj.). U smrku, který se také využívá v exteriéru, se suky uvolňují mnohem častěji než u borovice a hrozí jejich roztrhnutí. Dále se takto upravuje bříza, která se používá v interiéru (např. nábytek, parkety), je lehčí než smrk nebo borovice. Nejdůležitějšími vlastnostmi jsou barva a dobrá kvalita povrchu. Největší problém představuje kroucení, nemůžeme předvídat chování při ošetřování březového dřeva. Tepelně ošetřená osika se využívá v interiéru (např. sauny). Je u ní veliký rozdíl barevností a také vysoké riziko vzniku trhlin. Obvykle se měkké dřevo ošetřuje silněji než dřevo tvrdé.

Důležitá je kvalita dřeva před tepelnou úpravou, nemělo by obsahovat suché nebo naprasklé suky. Veliký vliv má také způsob řezání kulatiny. Ideálně by měly být letokruhy k povrchu alespoň pod úhlem 45°. Potom dosáhneme menších deformací a kvalitnějšího povrchu (Rapp, 2001).



### 3.5.2 Jiné způsoby termické úpravy

#### PlatoWood

PLATO proces je holandská metoda termické úpravy dřeva prováděná v prostředí vodní páry za zvýšeného tlaku. Skládá se ze 4 etap:

- Hydrotermolýza: Hydrotermická úprava při teplotě 150–190 °C za zvýšeného tlaku 0,6–1 MPa se provádí 4–5 hodin v horké páře nebo v horkém vzduchu. Vlhkost zůstává přibližně stejná.
- Sušení: V sušárně se dřevo suší po dobu 3–5 dní na vlhkost 8–10 %.
- Vytvrzování: Stabilizace dřeva je prováděna při teplotě 150–190 °C při tlaku 0,1 MPa za omezeného přístupu vzduchu po dobu 12–16 hodin. Vlhkost klesá pod 1 %.
- Klimatizování: Zvlhčení dřeva na konečnou vlhkost 4–6 % probíhá asi 3 dny.

Pro výrobu PlatoWood se nejčastěji používá smrk, borovice, douglaska, topol nebo bříza. Rozměrová stabilita se zvyšuje asi o 50 %, hygroscopicita se snižuje o 30–40 %, zlepšuje se trvanlivost, ale zároveň klesá ohybová pevnost o 5–20 %, modul pružnosti se může i mírně zvýšit (Reinprecht, Vildholdová, 2011).

#### OHT-Wood

Pro tuto německou metodu se jako médium využívá horký rostlinný olej o teplotě 200–220 °C. Horký olej postupně dřevo ohřívá. Uprostřed ohřívání materiálu by měla být po dobu 2–4 hodin teplota 180–200 °C. Je třeba udržovat malé množství kyslíku, aby nedošlo k termooxidační reakci. Celý proces s chladnutím trvá asi 18 hodin. Takto upravené dřevo zapáchá po oleji a má mastný povrch. Olej také způsobuje vzrůst hmotnosti o 50–70 % (Reinprecht, Vildholdová, 2011; Kačíková, Kačík, 2011).

#### RetificatedWood

Tato metoda pochází z Francie a spočívá v postupném zvyšování teploty na 210–260 °C v inertním prostředí dusíku, množství kyslíku musí být pod 2 %. Při tak vysoké teplotě dochází k mírné pyrolýze. Před termickou úpravou je třeba dřevo vysušit na vlhkost 12 % (Reinprecht, Vildholdová, 2011).

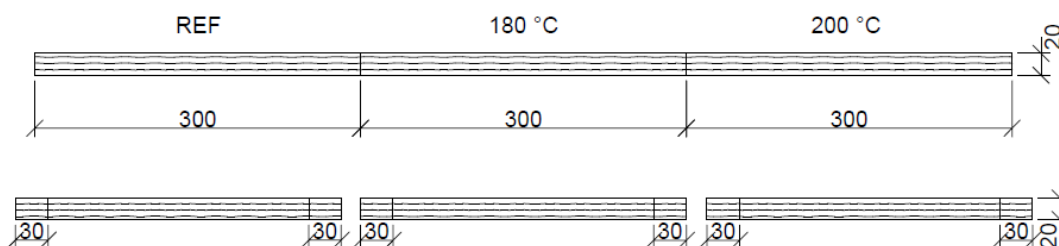
Další způsoby termické modifikace jsou Bois Perdure (Francie), WWT (Dánsko) a HüberHolz (Rakousko) (Kačíková, Kačík, 2011).

## 4 Metodika

### 4.1 Příprava vzorků

Vzorky pochází ze dvou lokalit. První část vzorků pochází z Rožmitálu pod Třemšínem, kde byly odebrány 3 sekce z každého stromu (tři smrků ztepilých a tři jedlí bělokorých), které byly získány z báze stromu, z 1/3 výšky stromu a ze 2/3 výšky stromu. Lokalita Rožmitálu pod Třemšínem poskytla stromy ve věku 116 let z nadmořské výšky 590 m n. m. Střední tloušťky stromů byly 42,9 cm pro jedli bělokorou a 45,2 cm pro smrk ztepilý. Střední výšky stromů byly 36,9 m pro jedli bělokorou a 37,1 m pro smrk ztepilý. Druhá část vzorků pochází z Kostelce nad Černými lesy. Zde byly odebrány 2 sekce z každého stromu (tři smrků ztepilých a tři jedlí bělokorých), první z báze a druhá z výšky cca 6 m. Stromy z této lokality byly 55 let staré a rostly v nadmořské výšce 400 m n. m. Střední tloušťka jedlí bělokorých byla 17 cm a smrků ztepilých 19 cm. Střední výška pak byla pro jedle bělokoré 17 m a pro smrky ztepilé 21 m.

Z těchto sekcí bylo vyrobeno řezivo, které bylo děleno na fošny. Po jejich rozřezání vznikly latě o průměru 20 × 20 mm, jejichž krácením na délku 300 mm byly získány vzorky pro zkoušení ohybové pevnosti. K výrobě referenčních i upravených vzorků stejného čísla byla kvůli podobnému průběhu vláken použita jedna lať. Tak vznikl z jedné latě jeden vzorek pro každý typ úpravy. 1/3 vzorků byla ponechána neupravená a 2/3 vzorků byly termicky upraveny. Po odzkoušení ohybové pevnosti byly odřezány konce vzorků o rozměrech 20 × 20 × 30 mm určených na zkoušení pevnosti v tlaku podél vláken a bobtnání.



Obrázek 3: Schéma výroby vzorků z jedné latě

### 4.2 Termická úprava vzorků a klimatizování

Zkušební tělesa byla klimatizována při teplotě  $20 \pm 2$  °C a při relativní vlhkosti vzduchu  $65 \pm 5$  %. Následně byla 1/3 vzorků termicky upravena při 180 °C, 1/3 při 200 °C

a 1/3 zůstala termicky neupravená v podobě referenčních vzorků. Termická úprava byla prováděna podle metody ThermoWood (popsané v podkapitole 3.5.1 ThermoWood) v termokomoře S400/03 od firmy Katres, která se nachází na školním pracovišti v Kostelci nad Černými lesy. Vzorky byly vystaveny vysoké teplotě po dobu 3 hodin. Kontrola teploty uvnitř komory byla provedena pomocí teplotních sond umístěných v otvorech vyvrtaných do těles, a to ve spodní i horní části komory, aby byla v celém prostoru termokomory dodržena stejná teplota úpravy. Bližší informace o průběhu termické úpravy uvádí ve své diplomové práci Kanát (2020), který zkoumal pro shodně upravené vzorky shodných dřevin odlišné vlastnosti, a můj výzkum na něj navazuje. Po tepelné modifikaci se vzorky znovu klimatizovaly při teplotě  $20 \pm 2$  °C a relativní vlhkosti vzduchu  $65 \pm 5$  %, aby se vyrovnala vlhkost všech vzorků před začátkem měření.

#### **4.3 Měření a stanovení mechanických a fyzikálních vlastností**

Všechna měření byla prováděna v laboratořích dřevařského pavilonu Fakulty lesnické a dřevařské, která spadá pod Českou zemědělskou univerzitu v Praze, podle příslušných norem.

##### **4.3.1 Měření pevnosti v tlaku podél vláken**

Měření pevnosti v tlaku podél vláken probíhalo na připravených klimatizovaných vzorcích o přibližných rozměrech  $20 \times 20 \times 30$  mm. Tyto rozměry bylo třeba přeměřit posuvným měřítkem Kinex 6040-27-150 s přesností 0,01 mm, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Vzorek byl umístěn mezi stlačovací čelisti trhacího stroje UTS-50, který se nachází v laboratoři dřevařského pavilonu. Pomocí systému TIRA-test se po zahájení zkoušky vzorek začal konstantně zatěžovat ve směru rovnoběžném s vlákny tak, aby měření probíhalo asi 1 minutu. Konec zkoušky nastal, když došlo k poklesu síly. Systém následně vyhodnotil maximální zatížení, které zapříčinilo porušení tělesa. Tato síla byla dosazena do vzorce pro výpočet pevnosti v tlaku podél vláken dle normy ČSN 49 0110.



Obrázek 4: Čelisti trhacího stroje pro zkoušení pevnosti podél vláken



Obrázek 5: Vzorek po této zkoušce

#### 4.3.2 Stanovení vlhkosti

Klimatizované vzorky byly před zkoušením pevnosti v tlaku podél vláken zváženy na digitální váze KERN PCB 2500-2 s přesností 0,01 g. Tyto vzorky byly přemístěny do sušárny a sušeny na vlhkost 0 %, což odpovídá absolutně suchému stavu. Takto připravené vzorky byly znovu zváženy. Absolutní vlhkost byla vypočítána jako rozdíl hmotností pomocí vztahu dle normy ČSN 49 0103.

#### 4.3.3 Stanovení hustoty

Vzorky připravené na zkoušku pevnosti v tlaku podél vláken byly změřeny posuvným měřítkem a zváženy na digitální váze. Z naměřených rozměrů byl vypočten objem těles. Hustota byla zjištěna dosazením hmotnosti a objemu do vztahu dle normy ČSN 49 0108.

#### 4.3.4 Zpracování a vyhodnocení dat

K dosazení naměřených dat do vzorců podle norem a výpočtu pevnosti v tlaku podél vláken, hustoty a vlhkosti byl použit tabulový software Microsoft Excel. V tomto softwaru byly výsledky pevnosti v tlaku podél vláken a hustoty také zpracovány pomocí krabicových grafů a popisné statistiky zapsané v tabulkách, které tyto grafy doplňují o další charakteristiky, jako je maximum, minimum, směrodatná odchylka a variační koeficient. Výsledky byly zpracovány zvláště pro neupravené vzorky a zvláště pro vzorky

tepelně upravené při 180 °C a při 200 °C, aby se mezi sebou daly hodnoty porovnat. Pro vyhodnocení závislosti pevnosti v tlaku podél vláken na hustotě byly použity lineární regresní modely, rovnice regresních přímk a koeficienty determinace, a to pro všechny typy úprav. Aby se projevil vliv vlhkosti na pevnost v tlaku podél vláken u tepelně upravených vzorků, nepřepočítávala se na 12% vlhkost. Další faktor, poloha vzorků ve kmeni, byl znázorněn pomocí krabicového grafu. Střední část (obdélník) krabicového grafu ohraničuje první (zespodu) a třetí (shora) kvartil, mezi nimi je vyznačen vodorovnou čárkou medián a křížkem průměr, ze střední části vybíhají vousy, které vyjadřují minimum a maximum.

## 5 Výsledky a diskuze

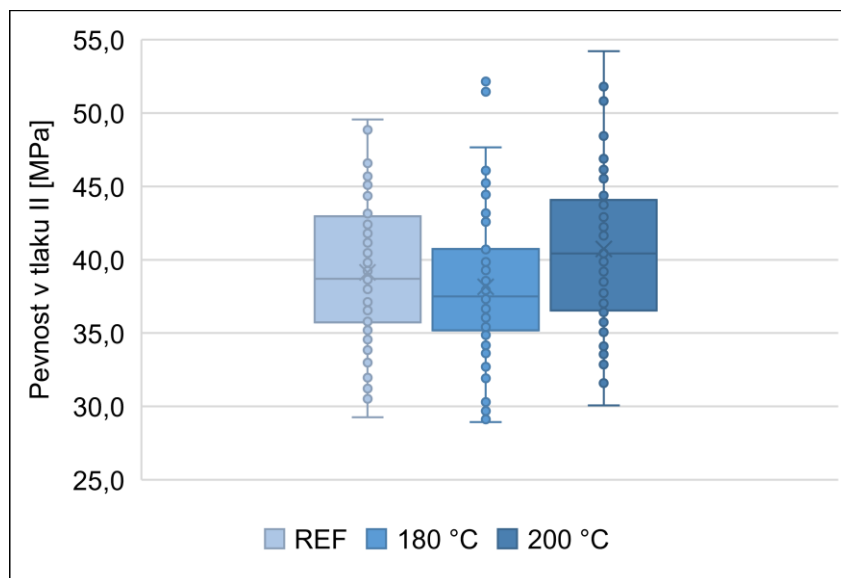
V následujících kapitolách je postupně rozebrán vliv termické úpravy na pevnost v tlaku podél vláken, hustotu a vlhkost. Mnou naměřené hodnoty jsou porovnány mezi sebou a následně také s výsledky jiných autorů zabývajících se stejnou problematikou. Dále je zde také zhodnocen vliv hustoty, vlhkosti a pozice ve kmeni na tlakovou pevnost podél vláken.

### 5.1 Pevnost v tlaku podél vláken

Zjistila jsem průměrnou hodnotu pevnosti v tlaku podél vláken referenčních vzorků jedle bělokoré 39,1 MPa. Požgaj a kol. (1993) uvádí velmi podobnou hodnotu této vlastnosti pro stejnou dřevinu při 10–12 % vlhkosti, a to 39,2 MPa. Podobnou hodnotu 40 MPa uvádí také Horáček (2017). O něco vyšší hodnota 44,2 MPa je uvedena ve Wood Handbook (1999) a také Wagenführ (2007) uvádí vyšší hodnotu 47 MPa. Naopak nižší hodnotu 33 MPa uvádí Tsoumis (1991).

Z grafu 6 pro jedli bělokorou můžeme vidět, že se pevnost v tlaku podél vláken oproti referenčním vzorkům v případě úpravy při 180 °C snížila, a to asi o 2,3 % na 38,2 MPa. V případě vzorků upravených při 200 °C se zvýšila asi o 4,1 % na 40,7 MPa.

Kol a kol. (2015) zkoumali vliv termické úpravy na různé vlastnosti jedlového dřeva. Použili teploty 170–210 °C a zjistili, že se zvyšující se teplotou úpravy se pevnost v tlaku podél vláken zvyšovala. Hodnoty sledované vlastnosti byly pro referenční vzorky průměrně 49,8 MPa, pro 180 °C 53,1 MPa a pro 200 °C 56,0 MPa, tedy o dost vyšší než mnou naměřené hodnoty. Zaznamenali zvýšení oproti referenčním vzorkům o 6,6 % při 180 °C a o 12,6 % při 200 °C. Nejvyšší hodnotu pevnosti v tlaku rovnoběžně s vláknou naměřili při 212 °C, kdy se zvýšila o 13,4 %. V mém případě změna nebyla tak výrazná a při úpravě za teploty 180 °C se tlaková pevnost podél vláken dokonce lehce snížila.



Graf 6: Pevnost v tlaku podél vláken v závislosti na tepelné úpravě jedle bělokoré

Tabulka 1: Statistické charakteristiky pevnosti v tlaku podél vláken [MPa] pro jedli bělokorou

	Reference	180 °C	200 °C
<b>Maximum</b>	49,5	52,1	54,2
<b>Minimum</b>	29,3	28,9	16,9
<b>Směrodatná odchylka</b>	4,7	4,7	6,0
<b>Variační koeficient [%]</b>	12,1	12,4	14,7
<b>Počet vzorků</b>	74	73	69

Ve Wood Handbook (1999) jsou uvedeny hodnoty tlakové pevnosti podél vláken amerických druhů smrků okolo 40 MPa. Mnou naměřená hodnota 41,8 MPa pro referenci smrku ztepilého je dost podobná. Naproti tomu Požgaj a kol. (1993) uvádí hodnotu 34,1 MPa a Tsoumis (1991) hodnotu 30 MPa, které jsou výrazně nižší. Nejvyšší hodnotu tlakové pevnosti rovnoběžně s vlákny 50 MPa uvádí Wagenführ (2007).

Z grafu 7 pro smrk ztepilý vidíme, že se pevnost v tlaku podél vláken zvýšila v obou případech. Vzorky upravené při 180 °C měly pevnost v tlaku podél vláken 44,4 MPa, což je asi o 6,2 % vyšší než vzorky referenční. Vzorky upravené při 200 °C měly tlakovou pevnost podél vláken 46,3 MPa, tedy o 10,8 % vyšší než referenční vzorky. Z těchto výsledků vyplývá, že termická modifikace nemá na pevnost v tlaku podél vláken negativní dopad. Naopak se tato pevnost zvyšovala se zvyšující se teplotou úpravy. Dospěla jsem tedy ke stejnému závěru jako pracovníci ve finském výzkumném centru VTT, kteří prováděli termickou úpravu při teplotě 195 °C po dobu 3 hodin a výsledná pevnost v tlaku podél vláken takto upraveného dřeva byla o 30 % vyšší než u neupravených vzorků (ThermoWood Handbook, 2003).

Podle Boonstra a kol. (2007), kteří se zabývali změnou mechanických vlastností po tepelné úpravě dřeva, se pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny zvýšila o 28 %, tangenciální pevnost v tlaku se zvýšila o 8 % a naopak radiální pevnost v tlaku se snížila o 43 %. Zvýšení pevnosti v tlaku podél vláken je pravděpodobně způsobeno snížením množství vody obsaženém v termicky upraveném dřevě. Negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti zejména degradace hemicelulóz, jak jsem již zmiňovala v rozboru problematiky tepelné úpravy. Naopak pozitivně ovlivňuje právě tlakovou pevnost rovnoběžně s vlákny anizotropní krystalická celulóza a stejně tak ji zvyšuje repolymerizace ligninu a jeho zesíťování (Boonstra a kol., 2007).

Gerhards (1980) uvádí, že se při relativní změně vlhkosti z 12 % na 6 % zvýší pevnost v tlaku podél vláken o 35 %. Naopak, když se vlhkost zvýší na 20 %, tato pevnost se sníží o 35 %. Je zde tedy vidět výrazný vliv vlhkosti na mechanické vlastnosti, z nichž se podle Gerhardse nejvíce mění právě pevnost v tlaku podél vláken. Následně tvrdí, že se dřevu vystavenému teplotě minus 50 °C zvýší pevnost v tlaku podél vláken o 20 % při nulové vlhkosti a o 50 % při vlhkosti 12–45 %. Při teplotě 50 °C se sníží o 10 % při nulové vlhkosti a o 25 % při vlhkosti 12–45 % vůči dřevu vystavenému teplotě 20 °C. U mě ani u ostatních autorů se ale tak razantní pokles pevnosti v tlaku podél vláken již při tak nízké teplotě neprokázal.

Pevnost v tlaku podél vláken se tedy snižuje při působení vyšších teplot, jak je všeobecně známo, zároveň se však výrazně zvyšuje při snížení relativní vlhkosti. Proto i mně vyšly hodnoty sledované vlastnosti vyšší se zvyšující se teplotou úpravy.

Faktorem, který podle Gerhardse (1980) může ovlivnit vlhkosní a teplotní účinky, jsou některé růstové charakteristiky, např. jarní ve srovnání s letním dřevem nebo reakční ve srovnání s normálním dřevem, a to kvůli rozdílům v teplotní roztažnosti a koeficientu bobtnání.

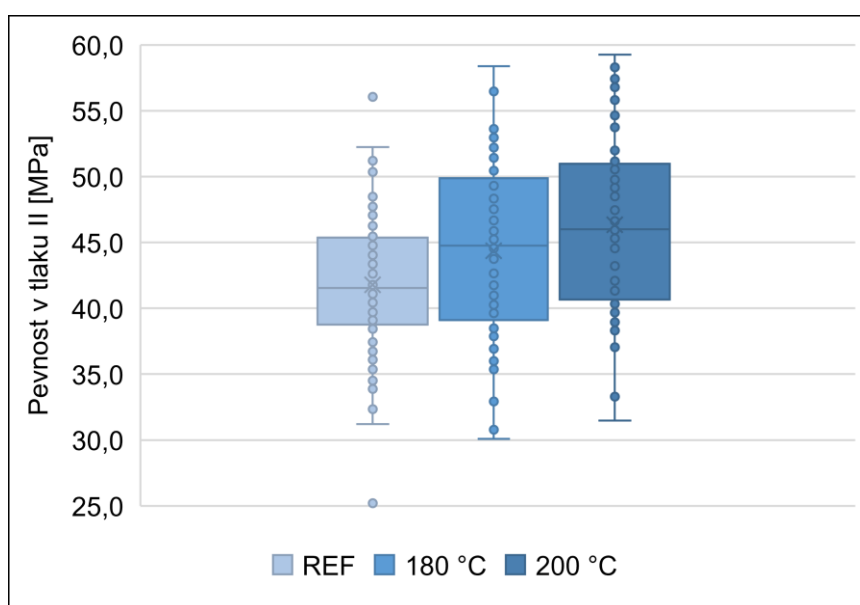
Yildiz a kol. (2006) porovnávali vliv teploty 130–200 °C na změnu tlakové pevnosti podél vláken smrkového dřeva. Při 130 °C činil pokles pouhá 2 %, po překročení teploty 150 °C již pozorovali výrazné snížení. Nejnižší hodnoty získali pro úpravu při 200 °C po dobu 6–10 hodin. Ztráty při této úpravě byly 39,14 % a 32,44 % s tím, že ztráta při šesti hodinách byla vyšší než při deseti. Jako příčinu poklesu uvádí stejně jako Boonstra a kol. (2007) degradaci hemicelulóz, které mají ve srovnání s celulózou málo krystalinity. Dále také zmiňují zvýšení obsahu ligninu se zvyšující se teplotou a dobou jejího působení.

Jebrane a kol. (2018) nechali působit na smrkové dřevo teplotu 212 °C po dobu 3 hodin za takových podmínek, aby vyloučili vliv vlhkosti. Došli k výsledné pevnosti v tlaku



rovnoběžně s vlákny pro neupravené vzorky 50,1 MPa a pro vzorky po termické úpravě 41,5 MPa. Z jejich výsledků je zřejmé, že se působením vyšších teplot pevnostní vlastnosti snižují, což odpovídá všeobecnému trendu.

Pevnost v tlaku podél vláken v závislosti na teplotě u smrku ztepilého zkoumal také Icel a kol. (2015). Dřevo vystavili teplotě 212 °C po dobu 2 hodin. Pro 12% vlhkost referenčního dřeva zjistili tlakovou pevnost podél vláken 50,16 MPa, pro stejnou vlhkost upraveného dřeva už jen 31,6 MPa, kde směrodatné odchylky byly velmi malé. Výsledky Icela a kol. (2015) potvrzují, že při stejné vlhkosti mechanické vlastnosti dřeva klesají. Vidíme tedy rozdílnost výsledků u různých autorů, kteří sledovanou vlastnost uvažují s různou vlhkostí.



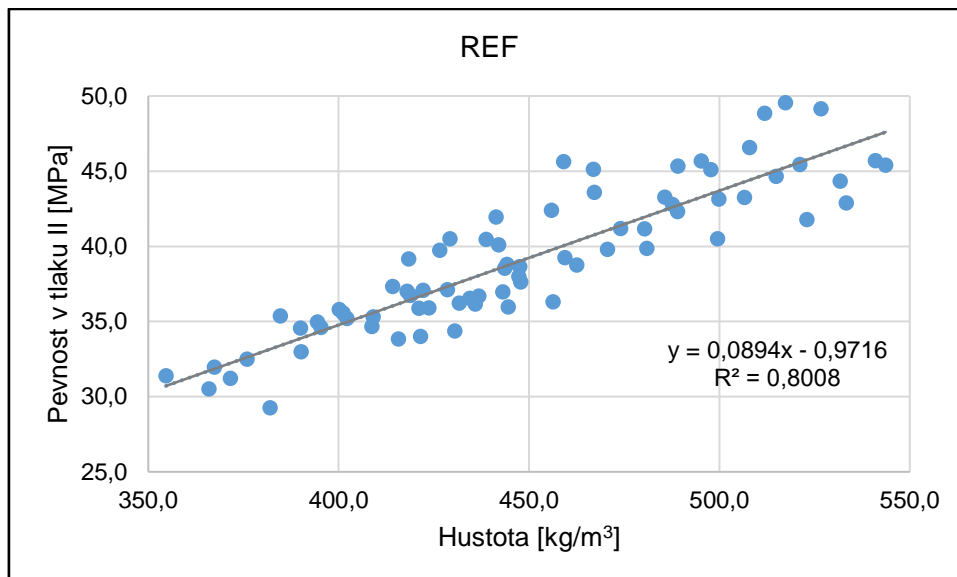
Graf 7: Pevnost v tlaku podél vláken v závislosti na tepelné úpravě smrku ztepilého

Tabulka 2: Statistické charakteristiky pevnosti v tlaku podél vláken [MPa] pro smrk ztepilý

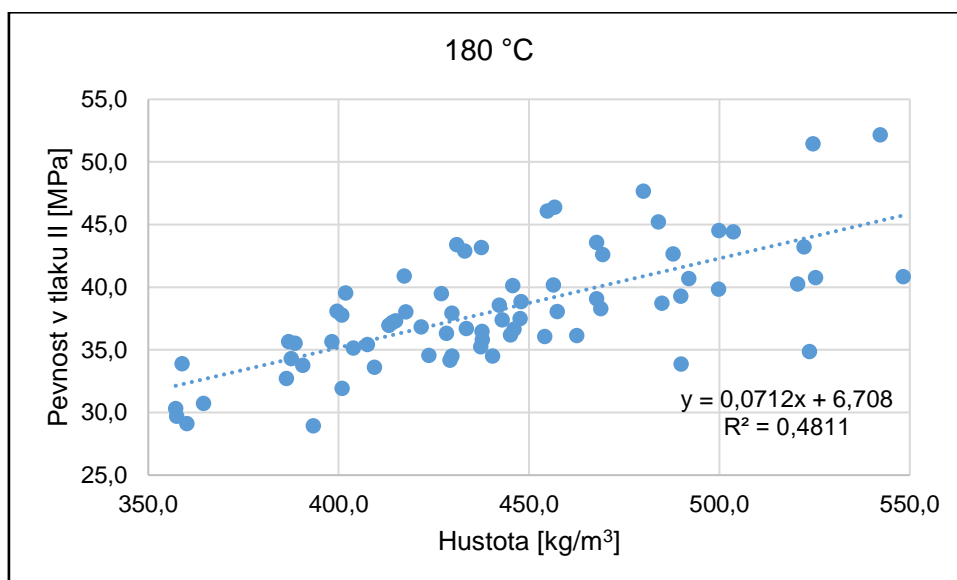
	Reference	180 °C	200 °C
<b>Maximum</b>	56,1	58,4	59,3
<b>Minimum</b>	25,2	30,1	31,5
<b>Směrodatná odchylka</b>	5,1	6,4	6,6
<b>Variační koeficient [%]</b>	12,2	14,5	14,3
<b>Počet vzorků</b>	77	72	72

Z grafů 8, 9 a 10 je patrná lineární závislost pevnosti v tlaku na hustotě s rostoucí tendencí. Také z nich vidíme, že referenční vzorky se blíží spojnici trendu, zatímco tepelně upravené vzorky jsou daleko více rozptýleny. S rostoucí teplotou úpravy se výrazně zmenšuje hodnota spolehlivosti. Vypadá to tedy, že s tepelnou úpravou vznikají

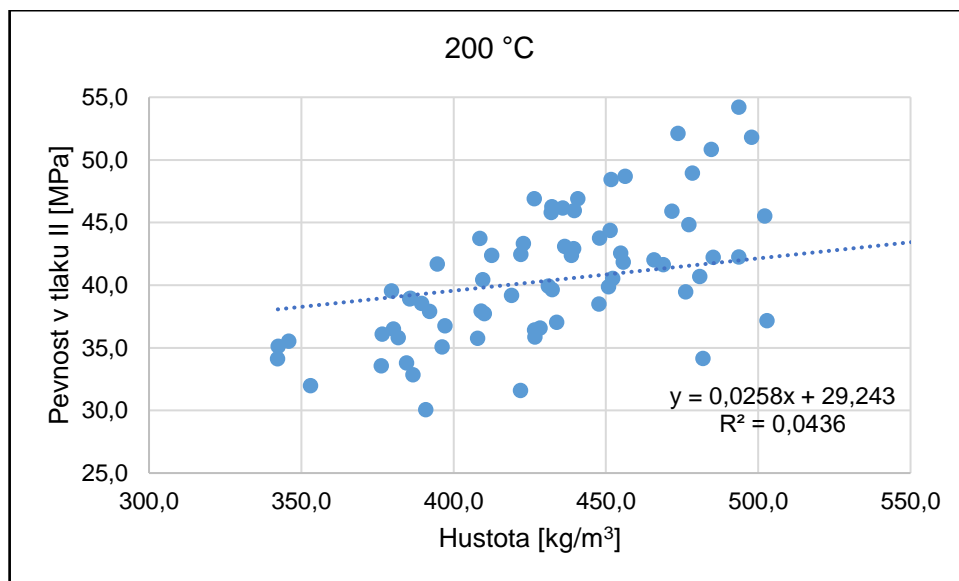
odchyly od trendu, který platí pro neupravené vzorky. Zawadski a kol. (2013) se zabývali závislostí pevnosti v tlaku na hustotě borového dřeva při tepelné úpravě 160 °C a 200 °C a zjistili lineární závislost s nejvyšším korelačním koeficientem pro 160 °C a nejkratší dobu úpravy. Jejich výsledky jsou shodné s mými.



Graf 8: Závislost pevnosti v tlaku podél vláken na hustotě referenčního dřeva jedle bělokoré



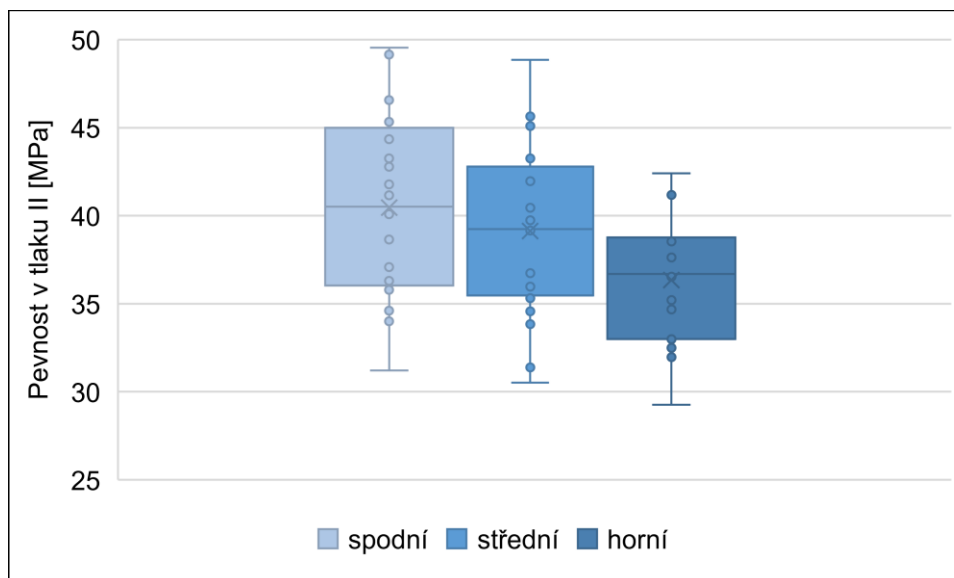
Graf 9: Závislost pevnosti v tlaku podél vláken na hustotě tepelně upraveného dřeva jedle bělokoré při 180 °C



Graf 10: Závislost pevnosti v tlaku podél vláken na hustotě tepelně upraveného dřeva jedle bělokoré při 200 °C

Pozice ve kmeni je dalším faktorem, který ovlivňuje mechanické vlastnosti. Porovnávala jsem tlakovou pevnost referenčních vzorků jedle bělokoré rovnoběžně s vlákny odebraných ze spodní, střední a horní části stromu. Z grafu 11 je zřejmé, že se hodnoty této pevnosti snižují od spodní k vrchní části. Vzorky ze spodní části kmene měly průměrnou pevnost v tlaku podél vláken  $40,5 \pm 4,9$  MPa, ze střední části  $39,1 \pm 4,6$  MPa a z horní už jen  $36,3 \pm 3,6$  MPa. To znamená pokles vůči bázi ve střední části o 3,5 % a v horní části o 10,4 %.

Závislost pevnosti v tlaku podél vláken na poloze ve kmeni *Abies alba* Mill. zkoumal González-Rodrigo a kol. (2013). Podle nich hodnoty klesaly směrem od báze ke koruně, ale s odchylkou menší než 7 %, což neukazuje žádné rozdíly v kvalitě v podélném směru.



Graf 11: Závislost pevnosti v tlaku podél vláken na pozici ve kmeni jedle bělokoré

## 5.2 Hustota

Kavina (1932) uvádí průměrnou hodnotu hustoty na vzduchu vyschlého dřeva jedle  $450 \text{ kg/m}^3$  a smrku  $480 \text{ kg/m}^3$ . Stejnou hodnotu pro jedli bělokorou s vlhkostí 12 % zmiňuje Horáček (2017). V případě Wagenführa (2007) je hustota jedle  $450 \text{ kg/m}^3$  a smrku  $470 \text{ kg/m}^3$ . Tyto hodnoty se mým dosti podobají. Stejnou hodnotu hustoty smrku i jedle  $440 \text{ kg/m}^3$  uvádí Tsoumis (1991).

Z grafů 12 a 13 vidíme, že se hustota s rostoucí teplotou použitou při modifikaci snižuje. Proti referenci, kdy byla hustota  $449 \text{ kg/m}^3$ , se jedlovým vzorkům upraveným při  $180 \text{ °C}$  hustota snížila o 1,6 % na  $442 \text{ kg/m}^3$  a při  $200 \text{ °C}$  přibližně o 3,6 % na  $433 \text{ kg/m}^3$ . Smrkovým vzorkům vystaveným teplotě  $180 \text{ °C}$  se snížila hustota asi o 1,9 % na  $477 \text{ kg/m}^3$  a vzorkům vystaveným teplotě  $200 \text{ °C}$  o 4,9 % na  $462 \text{ kg/m}^3$  oproti referenčním vzorkům s hustotou  $486 \text{ kg/m}^3$ . Rozdíl úbytku jedlového a smrkového dřeva je jen nepatrný. Snižování hustoty je zapříčiněno úbytkem hmoty během tepelné úpravy, který vzniká vlivem změn v chemické struktuře, a to hlavně degradací hemicelulóz.

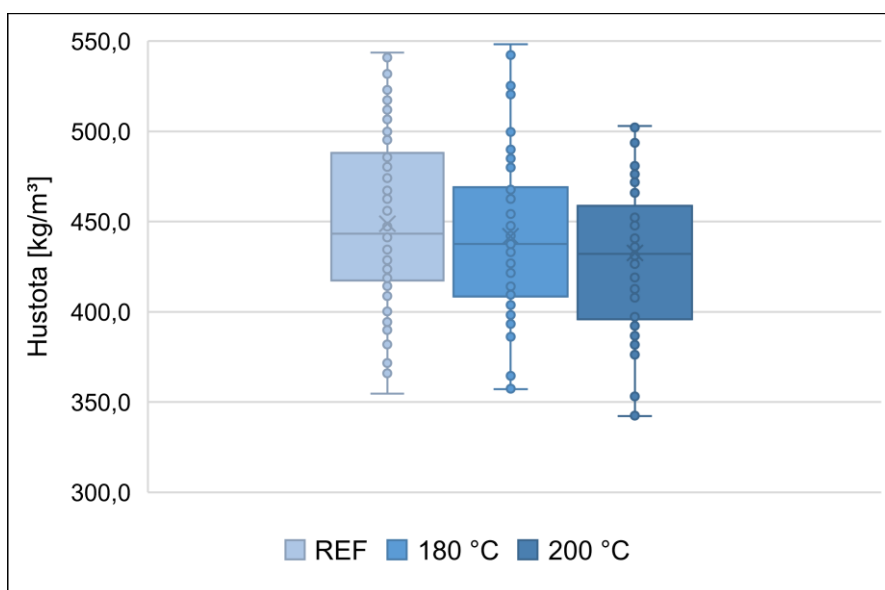
Od mnou naměřených hodnot pro jedli se příliš neliší výsledky výzkumu Kola a kol. (2015). Stanovili minimální úbytek hmotnosti při  $170 \text{ °C}$  1,7 % a maximální při  $212 \text{ °C}$  5,4 %. I jejich závěry vykazují klesající trend hustoty vlivem rostoucích teplot. Stejný závěr je popsán také v ThermoWood Handbook (2003).

Pokud se podíváme na směrodatné odchylky v tabulkách 3 a 4, vidíme, že jsou vysoké. To značí vysokou rozdílnost hustot u jednotlivých vzorků, což nám ukazuje i minimální a maximální hodnota. Hustota je podmíněna spoustou faktorů, které ji

významně mění. Může to být např. tloušťka letokruhů a podíl jarního a letního dřeva. Proto je hustota každého vzorku odlišná a průměrná hodnota ji nedokáže přesně popsat.

Alén a kol. (2002) studovali úbytek hmoty smrkového dřeva při teplotě 180 °C a 225 °C působící 4-8 hodin. Získali hodnoty minimálního hmotnostního úbytku 1,5 % pro 180 °C (4 hodiny) a maximálního 12,5 % pro 225 °C (6 hodin). Lze tedy říct, že hmotnostní úbytek je ovlivněn jak teplotou, tak dobou působení teploty.

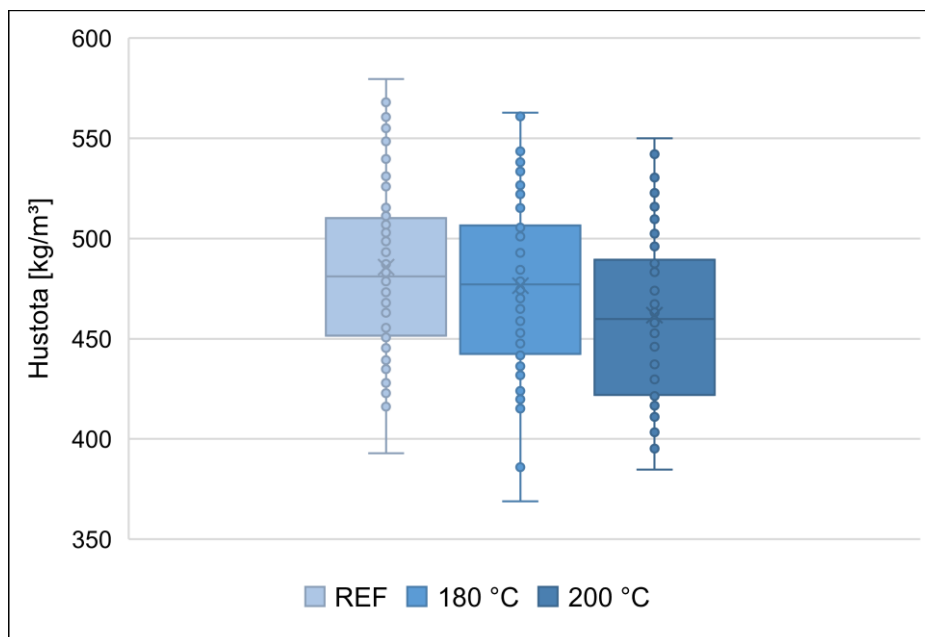
Icel a kol. (2015) uvádí ve svém výzkumu ztrátu hmotnosti 7,6 % pro smrk ztepilý vystavený po dobu 2 hodin teplotě 212 °C. Dále zmiňují snížení hustoty tepelně upravených vzorků o 2,56 %.



Graf 12: Hustota jedle bělokoré v závislosti na tepelné úpravě

Tabulka 3: Statistické charakteristiky hustoty [kg/m<sup>3</sup>] pro jedli bělokorou

	Reference	180 °C	200 °C
<b>Maximum</b>	544	548	652
<b>Minimum</b>	355	357	342
<b>Směrodatná odchylka</b>	47,4	46,0	48,4
<b>Variační koeficient [%]</b>	10,6	10,4	11,2
<b>Počet vzorků</b>	74	73	70



Graf 13: Hustota smrku zteplého v závislosti na tepelné úpravě

Tabulka 4: Statistické charakteristiky hustoty [kg/m<sup>3</sup>] pro smrk ztepilý

	Reference	180 °C	200 °C
<b>Maximum</b>	670	609	606
<b>Minimum</b>	393	369	385
<b>Směrodatná odchylka</b>	47,5	43,9	43,6
<b>Variační koeficient [%]</b>	9,8	9,2	9,4
<b>Počet</b>	77	72	72

### 5.3 Vlhkost

Projevilo se zřetelné snížení vlhkosti se zvyšující se teplotou působení. Obsah rovnovážné vlhkosti jedle bělokoré klesl o 12 % při 180 °C a o 28,9 % při 200 °C vůči neupravenému dřevu. U smrku zteplého je rovnovážná vlhkost při teplotě 180 °C asi o 23,8 % nižší než u reference, při teplotě 200 °C pak o 39,1 % nižší než reference. U smrku zteplého nastalo razantnější snížení vlhkosti než u jedle bělokoré. Značné snížení vlhkosti se projevuje zvýšením pevnosti v tlaku podél vláken, přestože vlivem vysokých teplot se tato pevnost snižuje. Výsledná pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny je pak vyšší u tepelně modifikovaných vzorků než u vzorků referenčních. Toto tvrzení je doloženo naměřenými hodnotami tlakové pevnosti podél vláken.

Tepelná modifikace způsobuje snížení hygroskopicity. Boonstra a kol. (2007) uvádí, že hlavní příčinou je degradace hemicelulóz a tím snížení počtu hydroxylových skupin, které jsou nezbytné k navázání vlhkosti. Ke snížení adsorpce vody také přispívá krystalizace celulózy a křížové zesíťování ligninu, který zamezuje přístupu vody k volným hydroxylovým skupinám. Vlhkost je tedy ovlivněna stejnými faktory jako jsem již

zmiňovala výše u pevnosti v tlaku podél vláken. Lze tedy pozorovat souvislost mezi vlhkostí a pevností dřeva. Je známo, že s narůstající vlhkostí se snižují mechanické vlastnosti. V tomto ohledu tedy termická úprava pomáhá pevnostním vlastnostem.

Podle Sandberga (2017) se průměrný obsah rovnovážné vlhkosti termicky ošetřeného dřeva při vyšších teplotách (220 °C) sníží asi na polovinu obsahu rovnovážné vlhkosti dřeva neošetřeného. Ke stejnému závěru došel také Icel a kol. (2015), Kačíková a Kačík (2011) a také se o tom zmiňuje ThermoWood Handbook (2003). Znamená to tedy výrazně nižší bobtnání a sesychání dřeva a vyšší rozměrovou stabilitu. V ThermoWood Handbook (2003) je uvedeno, že čím vyšší je relativní vlhkost, tím větší je rozdíl v hodnotách rovnovážného obsahu vlhkosti.

Kol a kol. (2015) zaznamenali mnohem větší pokles rovnovážné vlhkosti v jedlových vzorcích. Při 180 °C se vlhkost snížila o 31,4 % a při 200 °C o 44,9 %. Minimální pokles při 170 °C byl 19,5 %, naopak maximální při 212 °C 49,2 %. Kolovy hodnoty se více blíží tvrzení Sandberga, Icela, a také Kačíkové a Kačíka popsanému výše.

Také Esteves a kol. (2007), kteří se věnovali této problematice, uvedli, že rovnovážný obsah vlhkosti v termicky upravených borových vzorcích se snížil, a to i při méně intenzivním dvouhodinovém ošetření teplotou 190 °C. Také uvedli, že snižování rovnovážného stavu vlhkosti souviselo s úbytkem hmoty do 6–8 %. Při vyšších ztrátách hmoty se už obsah vlhkosti příliš neměnil.

## 6 Závěr

V této práci byla pro dvě dřeviny – jedle bělokorou a smrk ztepilý – zjišťována mechanická vlastnost pevnost v tlaku podél vláken a dále fyzikální vlastnosti hustota a vlhkost, které tuto mechanickou vlastnost ovlivňují. Byl posuzován vliv tepelné úpravy na zmíněné vlastnosti. Tepelná úprava byla provedena podle finské metody ThermoWood při teplotách 180 °C a 200 °C, kterým byly jedlové a smrkové vzorky vystaveny po dobu 3 hodin. Dále byl posouzen vliv hustoty, vlhkosti a také pozice ve kmeni na pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny. Jednotlivé výsledky byly porovnány mezi sebou a s výsledky výzkumů jiných autorů.

Zatímco u jedle bělokoré se při úpravě nižší teplotou 180 °C pevnost v tlaku podél vláken mírně snížila, při úpravě vyšší teplotou 200 °C se zvýšila. U smrku ztepilého se zvyšovala tlaková pevnost podél vláken v obou případech, a to výrazněji než u jedle bělokoré. Mé výsledky neodpovídají všeobecně známému tvrzení, že s rostoucí teplotou úpravy se pevnostní vlastnosti dřeva zhoršují. To bylo dokázáno mnoha výzkumy, kde byl obsah vlhkosti u ošetřených i neošetřených vzorků stejný. Tepelnou úpravou se snižuje obsah rovnovážné vlhkosti ve vzorcích, což bylo v této práci potvrzeno. Tepelná úprava 180 °C způsobila u jedle pokles rovnovážné vlhkosti o 12 %, což mělo za následek mírný pokles pevnosti v tlaku o 2,3 %. U smrku se pokles vlhkosti o 23,8 % projevil zvýšením tlakové pevnosti o 6,2 %. Pokles rovnovážné vlhkosti jedle o 28,9 %, ke kterému došlo tepelnou úpravou při 200 °C, způsobil nárůst pevnosti v tlaku o 4,1 %. U smrku nastal při stejné teplotě nárůst o 10,8 % při poklesu rovnovážné vlhkosti o 39,1 %. Hlavní příčinou poklesu vlhkosti je snížení počtu hydroxylových skupin v důsledku degradace hemicelulóz. Hned několik autorů uvádí pokles vlhkosti až o 50 %, v mém případě tak vysoký nebyl. Zároveň je známo, že se pevnostní vlastnosti dřeva zhoršují se stoupajícím obsahem vlhkosti. Došla jsem k závěru, že v tomto případě má termická úprava na pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny pozitivní vliv. Autoři věnující se stejné problematice uvádí shodný závěr.

Bylo potvrzeno, že v důsledku degradace chemických složek dřeva se hustota s rostoucí teplotou úpravy mírně snižovala u jedle i smrku. Také byla zjištěna lineární závislost pevnosti v tlaku podél vláken na hustotě. Se zvyšující se hustotou stoupá tlaková pevnost podél vláken. Zároveň u různě upravených vzorků bylo pozorováno, že čím vyšší je teplota úpravy, tím menší je hodnota spolehlivosti.

Při zkoumání vedlejšího faktoru pozice ve kmeni bylo zjištěno, že se pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny snižuje směrem ke koruně stromu, kde byla o 10,8 % nižší.



V České republice je smrk ztepilý nejhojněji zastoupenou dřevinou, proto se pro termickou úpravu používá nejčastěji. Jedle bělokora je zastoupena velice málo a v podobě termicky upraveného dřeva se s ní neseťkáváme. Výraznější změny u všech zkoumaných vlastností byly pozorovány u smrkového dřeva. Na základě zjištěných výsledků lze tedy říct, že tepelná úprava má na smrkové dřevo větší vliv než na jedlové.

Protože s rostoucí teplotou úpravy klesá hustota dřeva, klesá s ní také tlaková pevnost dřeva paralelně k vláknům. Z toho důvodu se termicky upravené dřevo neužívá v konstrukcích. Zároveň ale v této práci bylo dokázáno zvýšení pevnosti v tlaku podél vláken způsobené snížením rovnovážné vlhkosti vlivem působení vyšších teplot. S ohledem na to, že byla zjištěna vyšší pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny u upravených vzorků než u referenčních, lze říct, že snížení rovnovážného obsahu vlhkosti se projevuje více než snížení hustoty. Pokud by tedy smrkové a jedlové dřevo bylo upraveno při správné teplotě a mělo pravidelnou strukturu bez odklonu vláken, mohlo by se začít používat i pro určité prvky nosných konstrukcí. Výhodou by byla také vyšší životnost a rozměrová stabilita, kvůli kterým se tepelná úprava začala provádět. Dosud se termicky modifikované dřevo využívalo zejména tam, kde bylo třeba vyšší odolnosti vůči vlhkosti, ale nebylo příliš zatěžováno vnějšími silami (sauny, vnější obklady staveb aj.). Tato práce by mohla být přínosem pro zjištění jeho dalšího možného uplatnění.

## 7 Použité zdroje

### Literatura

- BALABÁN, K. *Nauka o dřevě: první část Anatomie dřeva*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1955.
- GANDELOVÁ, L.; HORÁČEK, P.; ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. Třetí. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. ISBN 978-80-7375-312-2.
- HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 1998. ISBN 80-7157-347-7.
- KAČÍKOVÁ, D.; KAČÍK, F. *Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011. 71 s. ISBN 978-80-228-2249-7.
- KANÁT, V. *Porovnání tepelně upraveného dřeva jedle a smrku z pohledu jeho užitkových vlastností*. Praha, 2020. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D.
- KAVINA, K. *Anatomie dřeva*. Praha: Ministerstvo zemědělství, 1932. 296 s.
- KREMER, B. *Stromy: V Evropě zdomácnělé a zavedené druhy*. Praha: Knižní klub, 1995. ISBN 80-7176-184-2.
- NĚMEC, J. *Dřevo – historický lexikon*. Praha: Grada Publishing, 2005. 80 s. ISBN 80-247-1187-7.
- POLENO, Z. *Sustainable management of forests in the Czech Republic*. Praha: Ministry of Agriculture of the Czech Republic, 1996. 62 s.
- POŽGAJ, A. *Náuka o dreve: Metódy zjisťovania mechanických vlastností dreva a drevných veľkoplošných kompozitných materiálov*. Zvolen: Vysoká škola lesnícka a drevárska vo Zvolene v edičnom stredisku, 1987.
- POŽGAJ, A.; CHOVANEC D.; KURJATKO, S.; BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1993. 486 s. ISBN 80-07-00600-1.
- REINPRECHT, L. *Ochrana dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6.
- REINPRECHT, L.; VILDHOLDOVÁ, Z. *Termodrevo*. Zvolen: SMIRA – PRINT, 2011. ISBN 978-80-87427-05-7.
- SANDBERG, D.; KUTNAR, A.; MANTANIS, G. Wood modification technologies - a review. *i-Forest Biogeosciences and Forestry*. SISEF, 2017.
- SVOBODA, P. *Lesní dřeviny a jejich porosty část I*. Praha: SZN, 1953.
- TSOUMIS, G. *Science and technology of wood – structure, properties, utilization*. New York: Chapman and Hall, 1991. 497 s. ISBN 0-412-07851-1.
- WAGENFÜHR, R. *Holzatlas*. Leipzig: Fachbuchverlag, 2007. 816 s. ISBN 978-3-446-40649-0.

## Elektronické zdroje

ALÉN, R.; KOTILAINEN, R.; ZAMAN, A. Thermochemical behavior of Norway spruce (*Picea abies*) at 180–225 °C [online]. *Wood Science and Technology* 36, 2002 [cit. 2021-04-07]. 163–171. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00226-001-0133-1>

*Biolib.cz* [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.biolib.cz/cz/taxonposition/id2360/> a <https://www.biolib.cz/cz/taxonposition/id2371/>

BOONSTRA, M. J.; VAN ACKER, J.; TJEERDSMA, B. F.; KEGEL E. V. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Annals of Forest Science*. Springer Verlag/EDP Sciences [online], 2007 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00884121/document>

ESTEVEZ, B.; VELEZ MARQUES, A.; DOMINGOS, I.; PEREIRA, H. Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood [online]. *Wood Science and Technology*, 2007 [cit. 2021-04-07]. DOI 10.1007/s00226-006-0099-0. Dostupné z: <https://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/1075/1/Influence%20of%20steam%20heating%20on%20the%20properties%20of%20pine%20and%20eucalypt%20RIPV.pdf>

GERHARDS, C. C. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects [online]. 1980 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1982/gerha82a.pdf>

GONZÁLEZ-RODRIGO, B.; ESTEBAN, L. G.; DE PALACIOS, P.; GARCÍA-FERNÁNDEZ, F.; GUINDEO, A. Variation throughout the tree stem in the physical-mechanical properties of the wood of *Abies alba* Mill. from the Spanish Pyrenees [online]. *Madera y Bosques*. Xalapa, México: Instituto de Ecología, A.C., 2013 [cit. 2021-04-07]. ISSN 1405-0471. Dostupné z: <https://www.redalyc.org/pdf/617/61728317007.pdf>

GREEN, D. W.; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. Chapter 4 - Mechanical Properties of Wood. *Wood handbook—Wood as an engineering material* [online]. Madison: Forest Products Laboratory, 1999, 463 p. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr113/ch04.pdf>

HORÁČEK, Petr. Jedle bělokorá: Vlastnosti dřeva a použití v lesnictví a dřevařství. *Lesnická práce* [online]. Lesnická práce, 2017, duben 2017 [cit. 2021-03-07]. ISSN 0322-9254. Dostupné z: <http://prosilvabohemica.cz/wp-content/uploads/2017/12/2017-LP-4-Horacek.pdf>

ICEL, B.; GULER, G.; ISLEYEN, O.; BERAM, A.; MUTLUBAS, M. Effects of Industrial Heat Treatment on the Properties of Spruce and Pine Woods [online]. *BioResources*. 2015 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effects-of-industrial-heat-treatment-on-the-properties-of-spruce-and-pine-woods/>

JEBRANE, M.; POCKRANDT, M.; CUCCUI, I.; ALLEGRETTI, O.; UETIMANE, E.; TERZIEV, N. Comparative study of two softwood species industrially modified by Thermowood® and thermoVacuum process [online]. *BioResources*, 2018 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/comparative-study-of->

[two-softwood-species-industrially-modified-by-thermowood-and-thermo-vacuum-process/](#)

KOL, H. S.; SEFIL, Y.; KESKIN, S. A. Effect of heat treatment on the mechanical properties, and dimensional stability of fir wood. *Proceedings of the 27th International Conference* [online]. Karabuk, Turkey, 2015 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: [http://www.furnituredesign2015.org/assets/icrfi\\_tr\\_138.pdf](http://www.furnituredesign2015.org/assets/icrfi_tr_138.pdf)

RAPP, A.O. Review on heat treatments of wood: Proceeding of Special Seminar held in Antibes, France on 9 February 2001. Antibes, France: European commission research directorate [online], 2001 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: [http://www.westwoodcorporation.com/worldwide/review\\_heat.pdf](http://www.westwoodcorporation.com/worldwide/review_heat.pdf)

*ThermoWood Handbook* [online]. Helsinki: International ThermoWood Association [online], 2003 [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://www.thermowood.fi/esitteet-ja-kirjat>

YILDIZ, S.; GEZER, E. D.; YILDIZ, U. C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. Building and environment [online]. *Elsevier*, 2006 [cit. 2021-04-07]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.07.017. Dostupné z: [https://www.academia.edu/12292612/Mechanical\\_and\\_chemical\\_behavior\\_of\\_spruce\\_wood\\_modified\\_by\\_heat](https://www.academia.edu/12292612/Mechanical_and_chemical_behavior_of_spruce_wood_modified_by_heat)

ZAWADZKI, J.; RADOMSKI, A.; GAWRON, J. The effect of thermal modification on selected physical properties of wood of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) [online]. *Wood Research*, 58(2), 2013 [cit. 2021-04-07]. 243-250. Dostupné z: <http://www.woodresearch.sk/wr/201302/09.pdf>

*Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2019* [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2020 [cit. 2021-04-07]. ISBN 978-80-7434-571-5. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/lesy/lesnictvi/zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho/zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-2019.html>

## **Normy**

ČSN 49 0110 Drevo. Medza pevnosti v tlaku v smere vláken. 1980

ČSN 49 0103 Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškách. 1979

ČSN 49 0108 Drevo. Zisťovanie hustoty. 1993