

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra základního zpracování dřeva



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

Bakalářská práce

Autor: Šimon Hačeký

Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D.

2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Šimon Haček

Dřevařství

Název práce

Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva olše

Název anglicky

Assessment of elasticity and strength of untreated and thermally modified alder wood

Cíle práce

1. Zhodnotit rázovou houževnatost, dynamický a statický modul pružnosti, pevnost v ohybu dřeva olše 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 (termodřeva), hodnocených vlastnostech a o faktorech ovlivňujících jejich proměnlivost.
2. Zajistit reprezentativní vzorky dřeva olše 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, 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, termická úprava, vlastnosti, dynamický a statický modul pružnosti, rázová houževnatost, pevnost v ohybu

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

2015/16 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Konzultant

doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 31. 3. 2015

Ing. Milan Gaff, Ph.D.
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 10. 2015

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.
Děkan

V Praze dne 04. 11. 2016

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva olše“ 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 111/1998 Sb. O vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne: 20. 4. 2017

Podpis autora

Poděkování

Mé velké díky patří vedoucímu bakalářské práce Ing. Vlastimilu Borůvkovi, Ph.D. za možnost nahlédnout do procesu vědeckého bádání, poskytnutí věcných rad a připomínek a za trpělivost při zpracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Tomáši Holečkovi za přípravu zkušebních vzorků a pomoc při získávání dat.

Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva olše

Abstrakt

Tato práce se zabývá termickou úpravou dřeva a jejím vlivem na vybrané vlastnosti dřeva olše. Součástí práce je teoretický rozbor problematiky vybraných vlastností dřeva, termické úpravy a rešerše o zkoumané dřevině. Jsou zde stručně popsány chemické změny způsobené termickou úpravou a jejich vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a jeho trvanlivost.

V praktické části je zkoumán vliv teploty při termické úpravě na pružnostní a pevnostní vlastnosti dřeva olše. Mezi posuzované vlastnosti patří vlhkost, hustota, dynamický a statický modul pružnosti, pevnost v ohybu a rázová houževnatost. Stanovení vlastností podléhalo standardizovaným postupům podle norem ČSN. Termická úprava zkušebních vzorků byla provedena procesem ThermoWood při 165 °C a 210 °C, k porovnání slouží neupravená referenční sada. Ukazuje se, že nejvíce byla dotčena rázová houževnatost a pevnost v ohybu. I přes nižší rovnovážnou vlhkost došlo ke zhoršení u obou stupňů úpravy. Pozitivní vliv termické úpravy při 165 °C se projevil u statického i dynamického modulu pružnosti. Pro vyšší teplotní stupeň došlo k navýšení jen dynamického modulu pružnosti. Závislost mezi mechanickými vlastnostmi a hustotou se prokázat nepodařilo.

Klíčová slova: dřevo, termická úprava, vlastnosti, dynamický a statický modul pružnosti, rázová houževnatost, pevnost v ohybu

Assessment of elasticity and strength of untreated and thermally modified alder wood

Summary

This thesis is dealing with heat treatment of alder wood and its influence on elastic and strength properties. The paper includes a theoretical analysis of selected properties of wood, heat treatment and literature search concerning the researched wood species. Chemical changes caused by heat treatment and its influence on physical and mechanical properties of wood and its durability are briefly described.

In the practical part the effect of temperature during heat treatment on elastic and strength properties of alder wood is examined. The evaluated properties include moisture, density, dynamic and elastic modulus of elasticity, bending strength and impact toughness. Determination of properties was done according to standardized ČSN methods. ThermoWood proses using 165 °C and 210 °C temperatures was used for heat treatment of the tested specimen, an untreated set of reference specimens served for comparison. It was found out that impact toughness and bending strength are the most influenced properties. Although the equilibrium moisture of specimens was lower, both levels of heat treatment resulted in decrease of these properties. The positive effect of heat treatment using 165 °C temperature was determined for dynamic and static modulus of elasticity. At the higher temperature level only an incensement of dynamic modulus of elasticity was observed. I was not able to find a relation between mechanical properties and density.

Key words: wood, thermal modification, properties, dynamic and static modulus of elasticity, impact strength, bending strength

Obsah

1 Úvod.....	12
2 Cíle práce	13
3 Rozbor problematiky	14
3.1 Popis dřeviny Olše lepkavá (<i>Alnus glutinosa</i>).....	14
3.1.1 Dendrologická charakteristika	14
3.1.3 Využití dřeva.....	15
3.1.3 Stavba dřeva.....	16
3.2 Vybrané vlastnosti dřeva	18
3.2.1 Vlhkost dřeva	18
3.2.2.1 Faktory ovlivňující vlhkost dřeva	19
3.2.2 Hustota dřeva	19
3.2.1.4 Faktory ovlivňující hustotu dřeva	21
3.2.3 Pružnost dřeva.....	22
3.2.3.2 Faktory ovlivňující pružnost dřeva	22
3.2.4 Pevnost dřeva v ohybu	23
3.2.4.1 Faktory ovlivňující pevnost dřeva v ohybu	24
3.2.6 Rázová houževnatost	24
3.2.6.1 Faktory ovlivňující rázovou houževnatost.....	24
3.3 Termická úprava	25
3.3.1 Výroba ThermoWood	26
3.3.2 Chemické změny.....	27
3.3.3 Fyzikální vlastnosti	28
3.3.4 Mechanické vlastnosti.....	30
3.3.5 Trvanlivost a odolnost	31
3.3.6 Práce s termicky upraveným dřevem	32
4 Metodika	33
4.1 Příprava vzorků.....	33
4.2 Stanovení hustoty.....	35
4.3 Stanovení dynamického modulu pružnosti.....	35
4.4 Stanovení statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu.....	37

4.5 Stanovení rázové houževnatosti.....	38
4.3 Stanovení vlhkosti a šířky letokruhů	38
5 Výsledky a diskuze	40
5.1 Vlhkost.....	42
5.2 Hustota a šířka letokruhů	42
5.3 Dynamický modul pružnosti.....	43
5.4 Statický modul pružnosti	44
5.5 Pevnost v ohybu.....	45
5.6 Rázová houževnatost	47
6 Závěr	49
7 Použité zdroje	51
9 Přílohy.....	54

Seznam obrázků

Obr. 1 Makroskopická struktura: příčný, tangenciální a radiální řez (Zeidler 2012)	16
Obr. 2 Příčný řez (http://fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev/)	17
Obr. 3 Tangenciální řez (http://fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev/).....	17
Obr. 4 Radiální řez (http://fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev/)	17
Obr. 5 Fáze výroby ThermoWood (ThermoWood Handbook 2000)	26
Obr. 6 Úbytek hmoty při různých teplotách v závislosti na čase úpravy (Esteves 2009)	28
Obr. 7 Graf změn rovnovážné vlhkosti smrku (ThermoWood Handbook 2000).....	29
Obr. 8 Graf vlivu tepelné úpravy na pevnost v ohybu (ThermoWood Handbook 2000)	30
Obr. 9 Schématické znázornění způsobu výroby a značení vzorků	34
Obr. 10 Vzorky v termokomoře po úpravě (foto Tomáš Holeček)	34
Obr. 11 Průběh termické úpravy při 210 °C (foto Tomáš Holeček).....	35
Obr. 12 Vzorky po zkoušce rázové houževnatosti	38

Seznam tabulek

Tab. 1 Základní výsledky, referenční sada	40
Tab. 2 Základní výsledky, termická úprava při 165 °C	41
Tab. 3 Základní výsledky, termická úprava při 210 °C	41

Seznam grafů

Graf 1 Rovnovážná vlhkost po aklimatizaci při 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %	42
Graf 2 Hustota dle stupně úpravy	43
Graf 3 Dynamický modul pružnosti dle stupně úpravy	44
Graf 4 Závislost mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti, 210 °C	44
Graf 5 Statický modul pružnosti dle stupně úpravy	45
Graf 6 Pevnost v ohybu dle stupně úpravy	46
Graf 7 Závislost mezi pevností v ohybu a statickým modulem pružnosti, 210 °C a 165 °C	47
Graf 8 Závislost mezi pevností v ohybu a statickým modulem pružnosti, referenční sada	47
Graf 9 Rázová houževnatost dle stupně úpravy.....	48

Seznam příloh

Příloha 1 Zadávací tabulka tepelné úpravy při 210 °C (foto Tomáš Holeček).....	54
Příloha 2 Závislost hustoty na šířce letokruhů, referenční sada	54
Příloha 3 Závislost hustoty na šířce letokruhů, 165 °C.....	55
Příloha 4 Závislost hustoty na šířce letokruhů, 210 °C.....	55
Příloha 5 Závislost mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti, referenční sada	55
Příloha 6 Závislost mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti, 165 °C.....	56
Příloha 7 Závislost statického modulu pružnosti na hustotě, referenční sada	56
Příloha 8 Závislost statického modulu pružnosti na hustotě, 165 °C	56
Příloha 9 Závislost statického modulu pružnosti na hustotě, 210 °C	57
Příloha 10 Závislost pevnosti v ohybu na hustotě, referenční sada	57
Příloha 11 Závislost pevnosti v ohybu na hustotě, 165 °C	57
Příloha 12 Závislost pevnosti v ohybu na hustotě, 210 °C	58
Příloha 13 Závislost rázové houževnatosti na hustotě, referenční sada.....	58
Příloha 14 Závislost rázové houževnatosti na hustotě, 165 °C.....	58
Příloha 15 Závislost rázové houževnatosti na hustotě, 210 °C.....	59

1 Úvod

Dřevo jako přírodní materiál doprovází člověka od nepaměti. Díky svým jedinečným a nenahraditelným vlastnostem a širokému rozsahu uplatnění si vždy najde místo v různorodých odvětvích lidské činnosti. Dřevo má mnoho nezanedbatelných výhod, které ho řadí mezi nejvýznamnější materiály používané člověkem. Jedná se o přírodní, obnovitelný materiál s trvale udržitelnou produkcí, má vynikající poměr mezi hmotností a pevností, jeho zpracování je energeticky málo náročné, vyznačuje se nenahraditelnými estetickými vlastnostmi, je plně recyklovatelné a pozitivně působí na smyslové vnímání jedince. Přírodní původ dřeva zároveň předurčuje jeho negativní vlastnosti. Mezi ně můžeme zařadit velikou variabilitu a anizotropii vlastností, hygroskopicitu, rozměrovou nestabilitu, hořlavost a nízkou odolnost vůči biologickým škůdcům. Tyto nevýhody jsou známé a je možné je do jisté míry omezit. Za tímto účelem bylo vyvinuto mnoho technologických a modifikačních postupů.

Jedním ze způsobů je modifikace dřeva kontrolovaným působením tepla, který se nazývá tepelná úprava dřeva. Tato úprava se provádí ve specializovaném technologickém zařízení. Tepelným působením dochází ke změnám v chemické struktuře dřeva, které se promítnou do vlastností takto upraveného dřeva. Snahou je dosáhnout omezení hygroskopicity, zlepšení rozměrové stability, trvanlivosti a odolnosti vůči biologické degradaci a zároveň neponížit mechanické vlastnosti dřeva. Míra ovlivnění vlastností závisí zejména na teplotě a čase trvání úpravy a použité dřevině. Výhodou termické úpravy oproti ostatním modifikačním postupům je, že nevyžaduje žádné chemické látky a přírodní charakter dřeva je zachován. Termicky upravené dřevo lze uplatnit v interiéru i exteriéru. Tepelnou úpravou méně trvanlivých dřevin a aplikací v exteriéru je možné nahradit cenné odolné tropické dřeviny. Díky tomu je možné používat dřevo ve stále náročnějších podmínkách a zároveň omezovat jeho neuváženou spotřebu.

2 Cíle práce

Cílem práce je zhodnotit rázovou houževnatost, dynamický a statický modul pružnosti, pevnost v ohybu dřeva olše, 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), a posoudit vliv termické úpravy na dané vlastnosti. Dále posoudit i vliv hustoty a šířky letokruhů na posuzované vlastnosti. Porovnat zjištěné hodnoty s dostupnými údaji v odborné literatuře.

3 Rozbor problematiky

3.1 Popis dřeviny Olše lepkavá (*Alnus glutinosa*)

3.1.1 Dendrologická charakteristika

Olše lepkavá je listnatý strom nížinných až podhorských lokalit se slabými větvemi a nepravidelnou korunou. Jednotlivé větévky mají žlázky, které vylučují lepkavý povlak, odtud název Olše lepkavá. Dorůstá výšky 20-35 metrů a tloušťky až 1 metr a dožívá se věku 100-200 let. Mladý strom má hladkou lesklou kůru, která se mění v hluboce zbrázděnou šupinovitou borku temně šedé barvy. Kořenový systém je srdcovitý, na postranních větvích s korálkovitými nádory, jež vznikají činností symbiotických aktinomycetů z rodu *Frankia* – schopných vázat vzdušný dusík ve formě přístupné rostlinám. Zvláště v močálech jsou hojné zpětné kořeny (Úradníček 1995; Musil 2005).

Pupeny jsou stopkaté, vejčité, kryté dvěma ojíněnými šupinami. V mládí lepkavé listy jsou okrouhlé až obvejčité, tupě až vykrojeně ukončené, s nepravidelným okrajem, vespod světle zelené s rezavými chomáčky chloupků. Plodnosti olše dosahuje ve věku 12- 20-ti let, v hustém zápoji 30- 40-ti let. Semenné roky se dostavují každé 2- 3 roky. Samičím i samčím květenstvím jsou fialově hnědé, později zelené jehnědy. Větrosnubné květy rozkvétají 2 až 3 týdny před vyrašením listů. Samičí jehnědy se přetvářejí na hnědé, kulovité šištice, na stromě zůstávají celou zimu. Tupě hranatá 2-3 cm velká semena běžně vypadávají v únoru a březnu, jsou opatřena vzdušným pletivem, usnadňující jejich šíření vodou a vzduchem. Klíčivost 20-40 % si udržují po dobu jednoho roku. (Uradníček 1995).

Olše je světlomilná dřevina, v raném věku rychle rostoucí, v 15- ti letech může dosáhnout až 13 m výšky. Růst polevuje od šedesátého roku. Vykazuje neobyčejnou pařezovou výmladnost. Doba obmýti je 50–60 let. Vyžaduje hodně vláhy v půdě a snáší i dvoutýdenní záplavy, prospívá na humózních provzdušněných půdách. Hojně roste v blízkosti vodních toků, v močálech, prameništích, na březích rybníků a v oblasti

lužních lesů. V místech přechodu nížin do horských oblastí je střídána olší šedou (Musil 2005)

Areál olše lepkavé zaujímá celou Evropu, vyjma teplých oblastí středozevního moře, na sever sahá až k polárnímu kruhu. Výskyt je vázán na živiny bohaté mokré humózní půdy, kde může tvořit i souvislý porost. Nedaří se jí na místech s nízkou hladinou spodních vod a rašeliništích. Olše vytváří různé klimatypy a při jejím pěstování je nutné respektovat původ semen, a to i ve vztahu k původnímu stanovišti (Úradníček 1995; Musil 2005).

Olše je dřevinou nížin a pahorkatin, stoupá do maximální nadmořské výšky 700m n. m. Je světlomilná a mrazu odolná. Olšiny často vznikají jako závěrečné sukcesní společenstvo v bažinách po porostech vrby ušaté a krušiny. Je také častou dřevinou lužních lesů. Velký význam má jako meliorační dřevina. Zastoupení olše v dřevinné skladbě ČR kolísá v závislosti na vodním hospodářství. S obnovou rybníků a revitalizací toků její podíl stoupá. (Uradníček 1995). Její přirozené zastoupení v ČR je 0,6 %, současné 1,6 % a doporučené 0,6 % (Slávik 2004)

3.1.3 Využití dřeva

Dřevo olše je středně tvrdé, lehké a často se využívá v řezbářství a soustružnictví. Je typickým dřevem pro výrobu dřeváků. Při výrobě nábytku se používá jako imitace mahagonu, ebenu a palisandru. Díky vysokému obsahu tříslovin se hodí pro vodní stavby, kde trvale pod vodou je velmi trvanlivé (Johánek a kol. 1970; Peschel a kol. 2002)

Dřevo olše je všestranně využitelné v sériové výrobě masivních nábytkových dílců. Stejně jako k výrobě násad, držadel, forem na klobouky, hraček a soustružených předmětů, tužek, knoflíků, zápalek, zátek do sudů, kopyt, mlýnských složení, překližek i beden (Němec 2005).

Dřevo se dobře řeže i frézuje, ovšem z důvodu vláknité povahy je při opracování třeba dbát na ostrost nástrojů, zejména při frézování profilů. Dobře se lepí, snadno se moří a přijímá nátěrové látky (Gibbs 2005).

3.1.3 Stavba dřeva

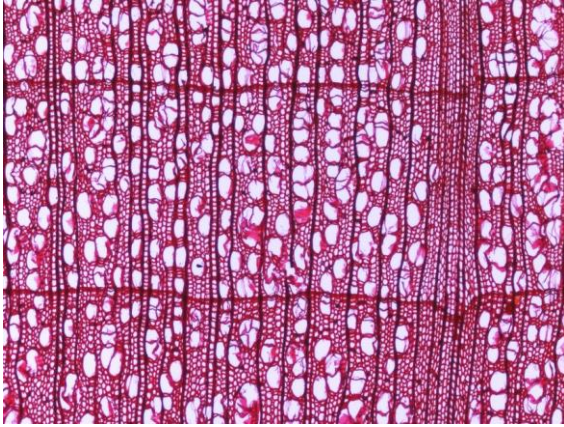
Olše patří mezi roztroušeně pórovité dřeviny, bez barevně odlišeného jádra. Letokruhy jsou zřetelné, letní dřevo je tmavší a úzké. Cévy na příčném řezu nezřetelné. Dřeňové paprsky tvoří na radiálním řezu zrcátka, na tangenciálním jsou rozeznatelné jako slabé čárky pouze sdružené paprsky. Často se objevují dřeňové skvrny. Barva se mění od bělavé, narůžovělé po oranžovou (Němec 2005). Typický je výskyt dřeňových skvrn. Může se objevit nepravé jádro. Čerstvé dřevo má výraznou oranžovou barvu. Dřeň je na rozdíl od většiny dřevin trojúhelníkového tvaru (Zeidler 2012).

Textura dřeva je stejnoměrná, jemná, nevýrazná, málo dekorativní. Vzácně rýglovaná nebo kořenicová (Gibbs 2005).

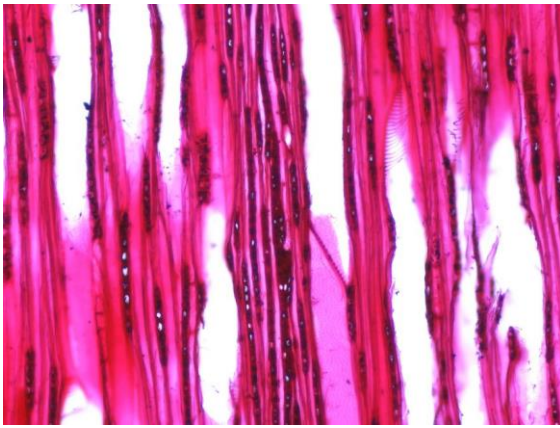


Obr. 1 Makroskopická struktura: příčný, tangenciální a radiální řez (Zeidler 2012)

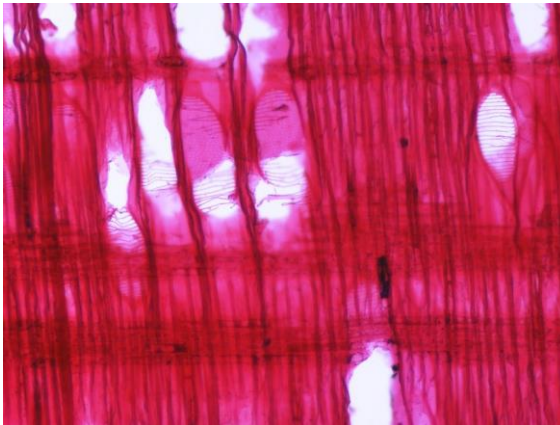
Na mikroskopické úrovni lze na příčném řezu pozorovat cévy jednotlivé, nebo sdružené do radiálních skupin do počtu čtyř a nepravé dřeňové paprsky. Dobrým rozlišovacím znakem jsou žebříčkovité perforace pozorovatelné na radiálním i tangenciálním řezu. Dále na radiálním řezu můžeme rozlišit homogenní dřeňový paprsek, tracheidy a axiální apotracheální parenchym. Na všech řezech jsou přítomné dřeňové skvrny.



Obr. 2 Příčný řez (http://fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev/)



Obr. 3 Tangenciální řez (http://fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev/)



Obr. 4 Radiální řez (http://fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev/)

3.2 Vybrané vlastnosti dřeva

3.2.1 Vlhkost dřeva

Vlhkost dřeva je chápána jako přítomnost vody ve dřevě. Dřevo je hygroskopický materiál schopný přijímat vodu z okolí nebo jí do okolí odevzdávat. Obsah vody ve dřevě je různý, ale dřevo vždy nějakou obsahuje. Obsah vody ve dřevě zásadně ovlivňuje vlastnosti dřeva a často je zhoršuje. Změna obsahu vody ve dřevě je spojena se změnami hustoty, rozměrů, odolnosti biotickým činitelům, mechanických a fyzikálních vlastností i technologických postupů (Požgaj 1993; Gandelová 2009).

Rozlišujeme vlhkost absolutní, vyjádřenou podílem hmotnosti vody k hmotnosti absolutně suchého dřeva a vlhkost relativní, vyjádřenou podílem hmotnosti vody k hmotnosti mokrého dřeva. Absolutní i relativní vlhkost vyjadřujeme v %. Absolutní vlhkost se používá pro charakteristiku fyzikálních a mechanických vlastností dřeva (Gandelová 2009).

Vodu nacházející se ve dřevě dělíme na volnou a vázanou. Voda volná (kapilární) vyplňuje lumény buněk a mezibuněčné prostory. Přítomnost vody volné je podmíněna plným nasycením buněčných stěn vodou vázanou. Voda vázaná (hygroskopická) je vázaná vodíkovými můstky na volné OH skupiny v buněčných stěnách. Její množství se pohybuje od 0 % do bodu nasycení vláken. Má zásadní vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva. Hranice mezi vodou volnou a vázanou je stanovena na základě určení bodu nasycení vláken. Bod nasycení vláken se pohybuje v rozmezí vlhkosti 22–35 % (Požgaj 1993; Gandelová 2009).

Pro stanovení vlhkosti dřeva existuje řada metod, které dělíme na metody přímé a nepřímé. Přímé metody zahrnují separaci vlhkosti a udávají skutečný obsah vody ve dřevě. Nepřímé metody využívají měření veličiny, jejíž hodnota úzce souvisí s vlhkostí dřeva (Tsoumis 1991)

Mezi nejpoužívanější přímé metody řadíme metodu gravimetrickou (těž váhovou), která vychází z definičního vztahu pro vlhkost. Postup spočívá ve zjištění hmotnosti vlhkého a absolutně suchého vzorku dřeva. Sušení vzorku probíhá v sušárně při teplotě 103 +/- 2 °C. Jedná se o metodu velice přesnou a podle ní se i posuzuje přesnost metod

ostatních. Nevýhodou je její časová náročnost a nezbytnost přípravy vzorku (Gandelová 2009).

Mezi nepřímé metody patří hygrometrická metoda, elektrické a optické metody. Nepřímé metody lze s dostatečnou přesností použít pro vlhkosti pod 30 %. Jejich výhodou je jednoduchost a rychlost, terénní použití a možnost použití k automatické kontrole při výrobě. Nevýhodou je jejich nízká přesnost, v rozmezí 5–26 % a nutnost korekce dle dřeviny. Měření je též ovlivněno nerovnoměrným rozložením vlhkosti v průřezu vzorku (Požgaj 1993).

3.2.2.1 Faktory ovlivňující vlhkost dřeva

Vlhkost dřeva závisí na prostředí, kterému je dřevo vystaveno. Umístíme-li dřevo na dostatečně dlouhou dobu do prostředí s konstantními parametry, dosáhne tzv. rovnovážné vlhkosti. Rovnovážná vlhkost se pro různé dřeviny liší a je ovlivněna i úpravami dřeva proti navlhání, např. acetylace, termická úprava, nátěrové hmoty, impregnace (Požgaj 1993).

Rozložení vlhkosti v rostoucím stromě je nerovnoměrné a je ovlivněno druhem dřeviny, polohou v kmeni a ročním obdobím. Maximální vlhkost obsahuje strom v zimním období. U jehličnanů je velký rozdíl mezi vlhkostí jádra (vyzrálého dřeva) a běle (běl až třikrát vlhčí). U listnatých stromů není rozdíl tak markantní (Tsumis 1991).

S výškou kmene jehličnanů se vlhkost běle zvyšuje, vlhkost jádra zůstává téměř neměnná. U jádrových listnáčů se vlhkost jádra ve směru ke koruně snižuje, vlhkost běle se nemění. U bezjádrových listnáčů se vlhkost naopak zvyšuje (Požgaj 1993).

3.2.2 Hustota dřeva

Hustota dřeva je fyzikální veličina, která udává podíl hmotnosti dřeva a jeho objemu. Vyjadřuje se jednotkou $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ nebo $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Hustota dřeva je základní charakteristikou, která významně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva (Požgaj 1993; Gandelová 2009).

Hustota ovlivňuje vlastnosti dřeva jako hygroskopicitu, sesychání a bobtnání, mechanické vlastnosti, tepelné, akustické a elektrické vlastnosti. Je důležitá i z hlediska procesů při zpracování dřeva (Tsoumis 1991). Dále má význam pro mechanické a chemické zpracování, kde je nutné znát hmotnostní množství dřevní hmoty (Požgaj 1993).

Rozlišujeme hustotu dřevní substance, hustotu dřeva a redukovanou hustotu (Požgaj 1993; Gandelová 2009).

Hustotou dřeva se rozumí jeho hustota při určité vlhkosti. Pro porovnání výsledků při teoretických výpočtech se používá hustota v absolutně suchém stavu ρ_0 . Vypočítá se jako podíl hmotnosti a objemu absolutně suchého dřeva. Dále rozlišujeme hustotu dřeva vlhkého, která je charakterizována poměrem hmotnosti objemu dřeva při dané vlhkosti.

Podle platné normy se hustota udává při vlhkosti 12 %, protože této rovnovážné vlhkosti dosáhne dřevo vystavené běžným podmínkám při teplotě 20 °C, a při relativní vlhkosti vzduchu 62 %. Za dřevo s největší hustotou je považován guajak s hustotou v absolutně suchém stavu $\rho_0 = 1360 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, naopak nejnižší hustotu má dřevo balzy s hustotou $\rho_0 = 130 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Známe-li hustotu dřeva v absolutně suchém stavu, můžeme pro stanovení hustoty vlhkého dřeva použít nomogram (Gandelová 2009).

Hustotu dřeva nejčastěji stanovujeme přesným změřením objemu a hmotnosti vzorku při určité vlhkosti a následným výpočtem. Další možností je stanovit hustotu na základě Archimedova zákona, ponořením aklimatizovaných vzorků do odměrného válce s vodou a odečtením hustoty na stupnici předem vyznačené na vzorku. Jedná se spíše o zkoušku orientační, protože vzorek okamžitě po ponoření začne přijímat vodu, čímž se zvyšuje jeho hmotnost a zjištěná hustota je vyšší. Pro vzorky nepravidelného tvaru je možné použít rtuťový objemometr.

Pro nedestruktivní zkoušky na základě absorpce a průniku záření se využívá radioaktivního, nebo rentgenového záření (Tsoumis 1991; Požgaj 1993).

3.2.1.4 Faktory ovlivňující hustotu dřeva

Hustota dřeva je ovlivněna vlhkostí, šířkou letokruhů, podílem letního dřeva, polohou v kmeni, věkem stromu, přítomností reakčního dřeva, nebo přítomností extraktivních látek (Tsoumis 1991; Požgaj 1993).

Hustota dřeva se zvyšuje s vlhkostí. Hmotnost dřeva se zvyšuje s vlhkostí až do úplného nasycení dřeva, objem dřeva se zvyšuje pouze do meze hygroskopicity a dále se nemění (Požgaj 1993).

Vliv šířky letokruhů na hustotu je závislý na podílu letního a jarního dřeva v letokruhu. Protože je letní dřevo tvořeno tlustostěnnými buňkami a má vyšší hustotu než dřevo jarní, lze říci, že s rostoucím podílem letního dřeva roste i hustota. U jehličnatých dřevin se s rostoucí šířkou letokruhu snižuje podíl letního dřeva, a tedy se snižuje i jeho hustota. Naopak u listnatých kruhovitě pórovitých dřevin podíl letního dřeva roste se zvětšující se šířkou letokruhu. V případě roztroušeně pórovitých dřevin je stanovení této závislosti obtížné (Tsoumis 1991).

Rozdíly v hustotě jsou patrné mezi jednotlivými stromy stejného druhu, ale liší se i v rámci jediného kmene. Je to důsledek odlišných fyziologických a mechanických funkcí jeho jednotlivých částí a různých růstových podmínek během života stromu. Variabilitu v horizontálním směru způsobuje především měnící se šířka letokruhů. Uvádí se, že hustota se zvyšuje od dřeně k periferní části kmene a od určité hranice může opět klesat. Ve vertikálním směru je proměnlivost hustoty značná a tendence se s výškou mění různě. Všeobecně převládá pokles hustoty s rostoucí výškou. To je způsobeno zejména nižším podílem letního dřeva a přítomností juvenilního dřeva ve vyšších částech kmene. Ovšem u olše je trend spíše opačný (Tsoumis 1991; Požgaj 1993).

Odlišná struktura reakčního dřeva a větví hustotu všeobecně zvyšuje. Naopak hustota kořenů je nižší než u kmenového dřeva. Stejně tak lze pozorovat pokles hustoty s přibývajícím věkem stromu (Požgaj 1993).

3.2.3 Pružnost dřeva

Pružností nazýváme schopnost pevných látek, deformovaných vnějšími silami, nabýt po uvolnění působících sil původního stavu (tvaru, rozměrů). Namáháme-li těleso vnějšími silami, dochází k pružné (elastické) deformaci pouze do určité meze. Nad touto mezí dochází k deformacím trvalým neboli plastickým. Tuto mez nazýváme mez pružnosti, též mez úměrnosti. Základní zákon popisující pružnou deformaci materiálu je zákon Hookeův (Lexa 1952).

Pružnost lze popsat pomocí charakteristik pracovního diagramu: modulu pružnosti, Poissonovými čísly, mezí úměrnosti, energií pružné deformace.

Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím větší je namáhání potřebné pro deformaci tělesa. Rozlišujeme moduly pružnosti při normálovém namáhání (tah, tlak, ohyb) a tangenciálním namáhání (smyk, krut). Moduly pružnosti mají velký význam při statických výpočtech dřevěných konstrukcí (Požgaj 1993, Gandelová 2009).

Modul pružnosti ve statickém ohybu se udává a zkouší v tangenciálním směru. Normálové namáhání je způsobeno ohybovým momentem. Výpočet modulu pružnosti vychází z ohybového momentu a deformace.

Dynamický modul pružnosti využívá charakteristiky šíření vlnění v materiálu, z nichž lze určit vztah mezi napětím a deformací. K určení dynamického modulu pružnosti se nejčastěji využívá zvuku. Ten se v daném prostředí šíří rychlostí, která je závislá na hustotě a modulu pružnosti materiálu, teplotě a vlhkosti prostředí. Změříme-li rychlost šíření zvuku ve vzorku a jeho hustotu, jsme schopni modul pružnosti dopočítat. Jednotkou modulu pružnosti je Pascal (Tsoumis 1991, Požgaj 1993, Gandelová 2009).

3.2.3.2 Faktory ovlivňující pružnost dřeva

Na pružnost dřeva má největší vliv hustota, vlhkost, teplota, doba a směr zatěžování, vady dřeva (zejména suky, odklon vláken, trhliny, reakční dřevo). Například změna vlhkosti o 1 % sníží nebo zvýší modul pružnosti při statickém ohybu dřeva o 2 %. Se zvyšující se hustotou dřeva se obecně zlepšují mechanické vlastnosti. Nízké teploty

zvyšují modul pružnosti, zatímco teploty nad 20 °C mají vliv negativní. Vliv nízké teploty se projeví i nad bodem nasycení vláken. Rostoucí teplota snižuje modul pružnosti tím více, čím je větší vlhkost dřeva. Tlakové dřevo vykazuje nižší modul pružnosti (Tsoumis 1991).

3.2.4 Pevnost dřeva v ohybu

Ohybová pevnost dřeva je poměrně vysoká, a i díky tomu se dřevo často uplatní pro konstrukční prvky ohybem namáhané. Jedná se o jednu z nejdůležitějších mechanických vlastností dřeva. S ohledem na průběh vláken a letokruhů rozlišujeme pevnost dřeva v ohybu na:

- a) pevnost v ohybu kolmo na vlákna v tangenciálním nebo radiálním směru, vlákna rovnoběžná s podélnou osou tělesa,
- b) pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa, příčný řez orientován ve směru zatěžující síly, nebo kolmo na zatěžující sílu.

První případ je velmi běžný a sledovaný. Rozdíl ohybové pevnosti v radiálním a tangenciálním směru je významný pouze u jehličnatých dřevin. Druhý případ se prakticky nevyskytuje. Mez pevnosti je v tomto případě jen asi 5–10 % meze pevnosti v ohybu kolmo na vlákna. Při trojbodovém ohybu se v tělese vyskytuje tlakové namáhání (na konkávní straně) a tahové namáhání (na konvexní straně). Mezi těmito zónami je neutrální nedeformovaná vrstva. Hodnoty namáhání dosahují maxima v povrchových vlákních (nejdál od neutrální vrstvy). S nárůstem napětí k mezi pevnosti dochází nejprve k trvalým deformacím vláken od povrchu směrem k neutrální vrstvě a nakonec k porušení tělesa. Protože pevnost dřeva v tlaku podél vláken je mnohem menší než pevnost v tahu, porušení tělesa začíná v tlakové zóně. Ke konečnému porušení dojde v zóně tahové, nejprve vytrháním vláken a pak zlomem. Zlom je tupý pro křehká dřeva, nebo vláknitý pro pevná a houževnatá dřeva. Průměrné hodnoty pevnosti v ohybu se pro naše dřeviny pohybují od 50 do 130 MPa (Požgaj 1993).

3.2.4.1 Faktory ovlivňující pevnost dřeva v ohybu

Pevnost dřeva v ohybu je ovlivněna vlhkostí a hustotou. Přírůstek vlhkosti o 1 % může způsobit pokles pevnosti až o 4 %. Dalším faktorem jsou rozměry tělesa. Při zkouškách se dodržuje štíhlostní poměr, podíl vzdálenosti podpěr k výšce tělesa, na hodnotě l/h větší nebo roven čtrnácti. Při vyšší štíhlosti pevnost stoupá. Vliv na pevnost v ohybu mají vady dřeva, zejména suky, které pevnost snižují, jejich vliv stoupá, pokud se nacházejí v povrchových vrstvách. Při ohýbání dřeva se využívá snížení pevnosti v ohybu, respektive zlepšení plastičnosti, zvýšením vlhkosti a teploty dřeva (Lexa 1952, Požgaj 1993).

3.2.6 Rázová houževnatost

Rázová houževnatost dřeva vyjadřuje jeho schopnost odolat rázovým zatížením, schopnost absorbovat práci vynaloženou na přeražení. Vyjadřuje se prací spotřebovanou na přeražení vzorku daných rozměrů, jednotkou je $J.cm^{-2}$. Čím více dřevo odolává rázové síle, tím je houževnatější. Dřevo s velkou houževnatostí vytváří vláknitý lom, křehké dřevo lom tupý. Některé dřeviny mohou mít velkou pevnost, ale jsou křehké.

Rázová houževnatost se stanovuje pro ohyb napříč vláken v tangenciálním směru. Na zjištění rázové houževnatosti se používají přerážecí kladiva, např. Charpyho kladivo. Energie spotřebovaná na přeražení vzorku je vyjádřena rozdílem potenciálních energií kyvadla. Tento rozdíl je pak ekvivalentem vynaložené přerážecí práce (Požgaj 1993, Gandelová 2009).

3.2.6.1 Faktory ovlivňující rázovou houževnatost

Pro dřeviny s výrazným jádrem a kruhovitě pórovité vykazují značný rozdíl spotřebované práce při rázu v radiálním a tangenciálním směru. V radiálním směru je rázová houževnatost větší (Požgaj 1993). Z hlediska vlhkosti je rázová houževnatost výjimečná. Dynamická pevnost se zvyšující se vlhkostí roste. Síla odporu sice klesá, ale zvyšuje se průhyb. Při poklesu vlhkosti o 1 % může rázová houževnatost poklesnout o 0,5 – 1 % (Lexa 1952, Tsoumis 1991)

3.3 Termická úprava

Působením tepla na dřevo dochází ke změnám vlastností dřeva. Je známo, že opalováním konců dřevěných kůlů se zlepšuje jejich trvanlivost a odolnost. V průběhu 20. století bylo působení tepla na dřevo podrobena mnoha výzkumům. A byly vytvořeny různé postupy pro tepelnou modifikaci dřeva s cílem zlepšit některé jeho vlastnosti.

Regulovaným působením vysoké teploty od 180 do 280 °C po dobu od 15 minut až 24 hodin dochází ke změnám molekulární struktury. Mění se hygroskopicitu, odolnost biologická, povětrnostní, protipožární, stejně tak barva, vůně, tepelné a akustické vlastnosti i vlastnosti technické a pevnostní. Výsledkem je zlepšení odolnosti dřeva proti biologickým škůdcům, snížení rovnovážné vlhkosti, rozměrová stabilizace, změna barvy, zlepšení tepelně-izolačních vlastností. Na druhou stranu dochází ke zhoršení vlastností jako pevnosti v ohybu a rázové houževnatosti. Výhodou termické modifikace je nepoužívání dodatečných chemických látek a poměrně nízká energetická náročnost, oproti umělému sušení dřeva je spotřeba energie o 25 % větší. Pro termickou úpravu se používají méně odolné druhy dřevin (smrk, borovice, buk, osika, jasan, olše, bříza). Typ a rozsah změn struktury a vlastností je kromě teploty ovlivněn i prostředím (složení atmosféry) a vstupní vlhkostí a druhem dřeva. V Evropě se v průmyslovém měřítku uplatňují technologie:

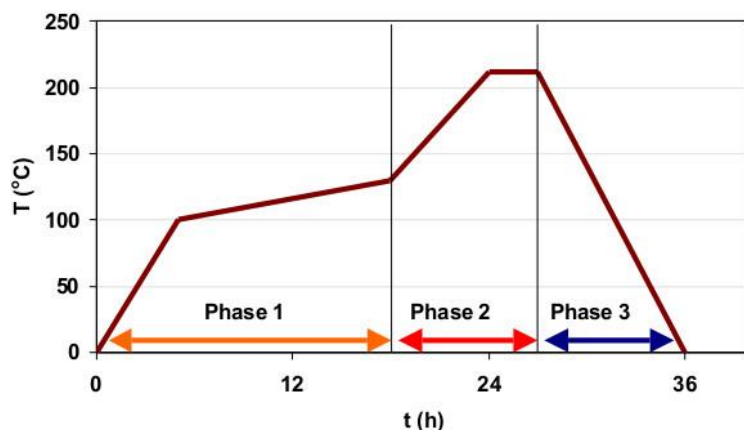
- ThermoWood proces– v prostředí vzduchu
- Plato proces– v prostředí páry, za zvýšeného tlaku
- OHT proces– v horkém oleji
- Royal proces– v oleji za sníženého tlaku a nižší teploty
- Retifikačním proces– v prostředí inertních plynů

(ThermoWood Handbook 2003, Reinprecht 2008).

Pro výzkum, který je součástí této práce, byl zvolen finský ThermoWood proces.

3.3.1 Výroba ThermoWood

Způsob výroby ThermoWood pochází z Finska. Metoda se používá pro listnaté i jehličnaté dřeviny. Výsledná kvalita termodřeva závisí na kvalitě vstupního materiálu. Výroba probíhá v termo komoře ve třech fázích.



Obr. 5 Fáze výroby ThermoWood (ThermoWood Handbook 2000)

V první fázi dochází k sušení dřeva téměř na nulovou vlhkost. Působením tepla a páry se komora rychle ohřeje na 100 °C, pak se pomalu zvyšuje a udržuje na 130 °C. Doba trvání závisí na druhu dřeviny, vlhkosti vstupního materiálu, a rozměrech materiálu. Sušením se minimalizuje výskyt trhlin.

Ve druhé fázi dochází k vlastní tepelné modifikaci a strukturálním změnám. Teplota komory se zvýší na 185–215 °C. Po dosažení požadované teploty, ohřívání pokračuje 2–3 hodiny dle požadovaného použití. Do komory se pouští plyny jako ochrana proti vznícení.

Konečnou fází je kontrolované ochlazování a stabilizace vlhkosti. Při poklesu teploty na 80–90 °C se vstříkuje do komory voda, aby došlo k nárůstu vlhkosti na 4–7 %. Snížení teploty je nezbytné pro předcházení tepelnému šoku při vystavení dřeva vnějšímu prostředí, který může způsobit popraskání materiálu. Aklimatizace trvá od 5 do 15 hodin v závislosti na původní teplotě a rozměrech materiálu.

ThermoWood se vyrábí ve dvou standardních třídách označovaných S a D. Rozlišují se na základě teploty úpravy. Třída Thermo-S znamená zejména rozměrovou stabilitu. Průměrné tangenciální sesychání v této třídě je mezi 6 a 8 procenty a přirozenou odolností proti poškození vnějšími vlivy se řadí do třetí třídy trvanlivosti dřeva.

Doporučuje se použití pro zahradní nábytek, saunové lavičky, prvky dveří a oken a podlahy. Třída Thermo-D znamená odolnost a předurčuje jeho použití v případech, kdy se požaduje vysoká odolnost biotické degradaci dřeva. Průměrné tangenciální sesychání je v rozmezí 5–6 % a řadí se do druhé třídy trvanlivosti dřeva. Doporučuje se pro aplikaci v saunách a koupelnách, pro zahradní nábytek a ostatní venkovní prvky (ThermoWood Handbook 2003).

3.3.2 Chemické změny

Tepelnou modifikací jsou ovlivněny všechny chemické komponenty dřeva, celulóza, lignin, hemicelulózy i extraktivní látky. Rozsah změn je závislý na teplotě a čase trvání tepelné úpravy a na dřevině. Nejvýznamnější změny probíhají v rozmezí teploty 180–250 °C, při vyšších teplotách dochází k pyrolýze a uhelnatění dřeva (ThermoWood Handbook 2003, Reinprecht 2008).

Ze stavebních struktur degradaci nejnáze podléhají hemicelulózy. Nejprve dochází hydrolýzou k deacetylaci a vznikající kyselina octová působí jako katalyzátor a urychluje depolymerizační reakce hemicelulóz a rozpad polysacharidů. Produktem degradačních reakcí jsou formaldehyd, furfural a další aldehydy. Zároveň dochází ke snížení počtu hydroxylových skupin. Kyselina octová působí i na amorfni část celulózy, dochází k hydrolytickému štěpení polymeru na kratší řetězce a zvýšení obsahu krystalické celulózy. Výsledkem je menší množství a přístupnost hydroxylových skupin pro molekuly vody, což má za následek pokles rovnovážné vlhkosti dřeva.

Po tepelné úpravě obsahuje dřevo méně hemicelulóz i volných vodu-vázajících hydroxylových skupin, čímž se vysvětluje jeho nižší atraktivita pro dřevo-degradující organismy a nárůst rozměrové stability. Protože dochází k rozpadu zejména hemicelulóz, pevnostní vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva by neměly být příliš dotčeny (ThermoWood Handbook 2003, Esteves 2009).

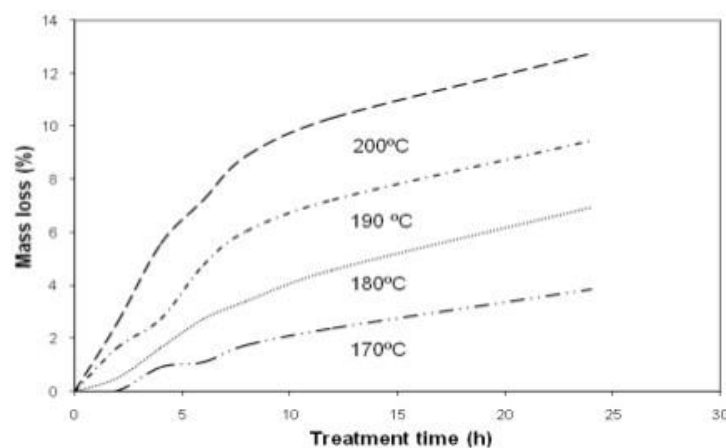
Lignin vykazuje největší odolnost vůči teplenému působení. Bylo zjištěno, že obsah ligninu se během tepelné úpravy zvyšuje. Například u dřeviny *Pinus Pinaster* se obsah ligninu zvýšil z 28 % až na 84 % během 4 hodin při teplotě 260 °C. V počátku tepelné úpravy lignin degraduje, dochází k rozpadu části etherových vazeb mezi fenol-

propanovými jednotkami. Vznikají tak volné fenol-hydroxylové a α - a β - karboxylové skupiny, které umožňují polykondenzační reakce s ostatními složkami buněčných stěn, výsledkem je další zesíťování polymeru a zjevný nárůst obsahu ligninu.

Většina extraktivních látek se během termické úpravy vypaří, ale mohou vznikat i látky nové jako produkt degradace strukturálních komponent buněčných stěn. (Esteves 2009).

3.3.3 Fyzikální vlastnosti

Významnou fyzikální vlastností dřeva dotčenou tepelnou úpravou je hustota. Termodřevo má menší hustotu než dřevo neupravené. Je to způsobeno úbytkem hmoty při úpravě a souvisejícím poklesem hmotnosti (ThermoWood Handbook 2003). Při stejných parametrech tepelné úpravy vykazují větší pokles hmoty dřeviny listnaté než jehličnaté. Úbytek hmoty je tím větší, čím vyšší je působící teplota a delší čas působení. Například pro břízu byl zjištěn úbytek hmoty 10,2 % při 200 °C po dobu 8 hodin (Esteves 2009).

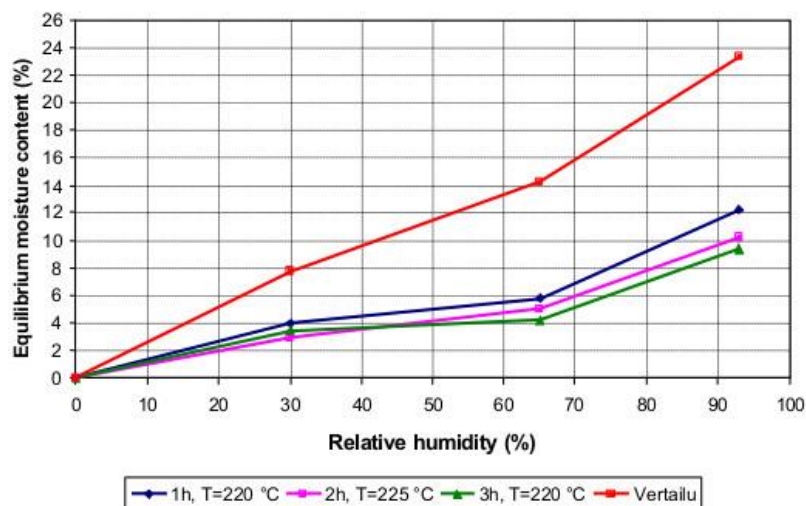


Obr. 6 Úbytek hmoty při různých teplotách v závislosti na čase úpravy (Esteves 2009)

Klíčovou vlastností termicky modifikovaného dřeva je pokles rovnovážné vlhkosti oproti dřevu neupravenému. Tento efekt se objevuje už při teplotách nad 100 °C a je znám už od roku 1920, stal se tak základem pro tepelnou modifikaci. Závisí na druhu dřeviny, teplotě, času a způsobu tepelné úpravy (Esteves 2009). Při vysokých teplotách (220 °) může být rovnovážná vlhkost až poloviční. Výraznější rozdíly v rovnovážné vlhkosti lze sledovat při vyšší relativní vlhkosti okolí. Důvodem pro pokles rovnovážné

vlhkosti jsou chemické změny popsané výše, které snižují množství vazebných míst pro vodu (ThermoWood Handbook 2003).

Se snížením rovnovážné vlhkosti termicky upraveného dřeva souvisí i jeho rozměrová stabilita a odolnost proti biotickému poškození. Tangenciální a radiální sesychání a bobtnání termodřeva se značně snižuje, respektive se zlepšuje rozměrová stabilita. Díky tomu termodřevo tolik netrpí na vnitřní napětí při změnách vlhkosti nebo dělení materiálu, např. při výrobě nábytkových dílců (ThermoWood Handbook 2003). Anizotropní charakter sesychání je zachován, ovšem v tangenciálním směru je stabilizace značnější. Například pro buk lesní se celkové bobtnání může snížit ze 7,3 % na 5,7 %, znamenající 22 % zlepšení, pro borovici za stejných podmínek ze 4,7 % na 2,8 % s efektivitou 40 % (Esteves 2009).



Obr. 7 Graf změny rovnovážné vlhkosti smrku (ThermoWood Handbook 2000)

Termická úprava má za následek změnu barvy dřeva, dřevo tmavne. Toho lze využít při konečné aplikaci termodřeva s ohledem na estetické a vizuální požadavky zákazníka. Obecně platí, že při vyšší teplotě a delším čase dřevo ztmavne víc. U jehličnanů se změna barvy projeví různě pro jarní a letní dřevo. Tmavnutí je způsobeno zbarvujícími produkty degradačních reakcí (ThermoWood Handbook 2003, Esteves 2009). Zajímavostí je charakteristická vůně dřeva po termické úpravě. Je cítit po spáleném dřevě a karamelu (Reinprecht 2008).

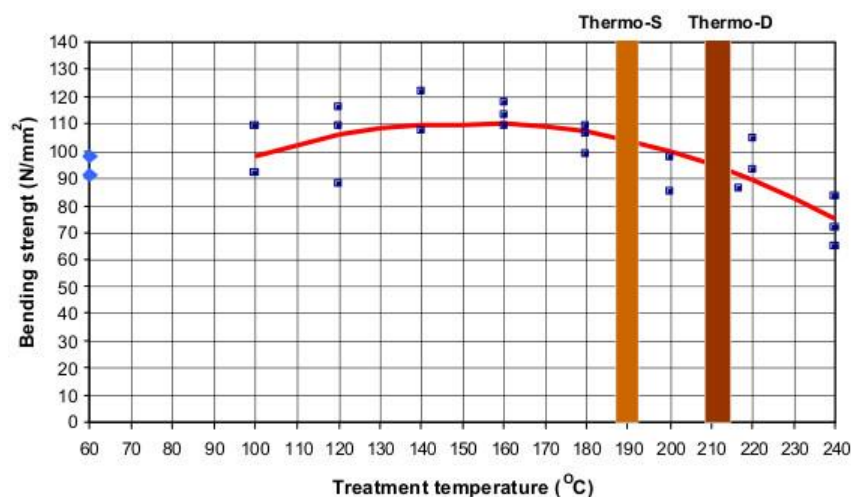
Teplotní vodivost dřeva po termické úpravě je přibližně o 20–25 % nižší. Dochází i ke změně akustických vlastností. Při nižších teplotách úpravy se akustické vlastnosti

termodřeva přiblíží k dlouho skladovanému dřevu, čehož lze využít při restaurování hudebních nástrojů (Reinprecht 2008).

3.3.4 Mechanické vlastnosti

Hustota a vlhkost jsou faktory významně ovlivňující mechanické vlastnosti dřeva. Termickou úpravou ztrácí dřevo hmotu a snižuje se jeho hustota, na druhou stranu dosahuje nižší rovnovážné vlhkosti. Výsledkem je zhoršení, nebo v některých případech zlepšení mechanických vlastností. Uvádí se, že pozitivní vliv nižší rovnovážné vlhkosti termicky upraveného dřeva je převýšen vlivem strukturálních změn, které mechanické vlastnosti zhoršují. Nejvíce jsou ovlivněny ohybové vlastnosti (pevnost v ohybu, modul pružnosti, rázová houževnatost) (Esteves 2009).

Ukazuje se, že při mírnější termické úpravě (teploty přibližně pod 200 °C, kratší čas) dochází k mírnému nárůstu modulu pružnosti. Při teplotách nad 220 °C modul pružnosti drasticky klesá. Pevnost v ohybu je ovlivněna významněji. Průměrný pokles pevnosti v ohybu smrku a borovice byl 50 %, respektive 47 % při teplotě úpravy 220 °C. Přičemž s vyšší teplotou úpravy je její vliv významnější (Esteves 2009). Což potvrzuje i ThermoWood Handbook (2003) tvrzením, že pro borovici dojde k značnému poklesu pevnosti v ohybu při teplotách nad 220 °C. Zaleží také na použité technologii úpravy, dřevině a vstupní vlhkosti materiálu (Esteves 2009).



Obr. 8 Graf vlivu tepelné úpravy na pevnost v ohybu (ThermoWood Handbook 2000)

Rázová houževnatost termicky upraveného dřeva se také zhoršuje. Při testech se smrkem upraveným při teplotě 220 °C a 3 hodin došlo k poklesu houževnatosti o 25 % (ThermoWood Handbook 2003).

Pevnost v tlaku ve směru vláken termickou úpravou dřeva roste, a to i při vyšších teplotách. Rozpad vzorků na menší kusy při maximálním zatížení potvrzuje horší pružností vlastnosti termodřeva (ThermoWood Handbook 2003). Naproti tomu Esteves (2009) uvádí, že někteří autoři zjistili pokles pevnosti v tlaku. Také Brinellova tvrdost ve směru vláken je vyšší a narůstá s rostoucí teplotou úpravy. Kolmo na vlákna je nárůst menší. Smyková pevnost v tangenciálním i radiálním směru klesá. Čím je vyšší teplota úpravy, tím je pokles znatelnější.

Z uvedeného vyplývá, že termická úprava má spíše negativní vliv na mechanické vlastnosti dřeva. Také většina výzkumů byla prováděna testováním vzorků s minimem vad. Proto se termicky upravené dřevo nedoporučuje pro konstrukční účely (ThermoWood Handbook 2003).

3.3.5 Trvanlivost a odolnost

V závislosti na procesu termické úpravy dřeva se zvyšuje jeho odolnost vůči degradačním činitelům. Zlepšuje se odolnost jak vůči biologickým škůdcům, tak i povětrnostním vlivům. Zvýšená odolnost je připisována zejména nižší rovnovážné vlhkosti, které termodřevo dosahuje. Dále chemickým změnám, díky kterým enzymatický systém dřevokazných hub nerozpozná dřevo jako živnou půdu a degradační komponent dřeva jež jsou pro škůdce snadno napadnutelné.

Termicky upravené dřevo odolává bílé i hnědé hnilobě, přičemž úbytek hmotnosti je velmi malý, a to zejména při tvrdších režimech úpravy. Při teplotách úpravy nad 220 °C lze u dřev obecně málo trvanlivých dosáhnout 1. třídy trvanlivosti. Ovšem při kontaktu se zemí je účinek tepelné úpravy nedostatečný a použití termodřeva zabudovaného do země se nedoporučuje. Stejně tak odolnost vůči napadení dřevokazným hmyzem (*Hylotrupes bajulus*, *Annobium punctatum*, *Lyctus brunus*) je výrazně lepší, zatímco proti termitům je neprokazatelná (ThermoWood Handbook 2003, Esteves 2009).

Díky větší rozměrové stabilitě se na termicky upraveném dřevě po vystavení povětrnostním vlivům objevuje méně povrchových trhlin. Působením slunečního záření, srážek, kyslíku a emisí mění termodřevo barvu z přirozeně hnědé na šedou. Šednutí se dá částečně zabránit aplikací nátěrové látky s UV filtrem (ThermoWood Handbook 2003).

3.3.6 Práce s termicky upraveným dřevem

V principu se s termicky upraveným dřevem pracuje stejně, jako s dřevem neupraveným. Vzhledem k jeho křehkosti je třeba být při práci opatrný. Pádem nebo nárazem se snadno poškodí hrany nebo ulomí rohy. Je nezbytné používat ostré nástroje. Problém působí jemný prach vznikající při opracování.

Procesem termické úpravy jsou odstraněna vnitřní napětí v materiálu, díky tomu dochází k menšímu borcení dřeva při řezání. Hoblováním lze dosáhnout hladkého povrchu, nepřítomnost pryskyřice umožňuje hladký posuv. Je doporučeno používat úzké podávací válce s nižším přítlakem a menší posuvové rychlosti. Při frézování kolmo na vlákna vzniká riziko vytrhání vláken. Stejně tak broušení je možné obvyklými metodami.

Pro lepení termodřeva lze použít všechna běžná lepidla se stejnou pevností spoje jako u neupraveného dřeva. Při použití PVAc lepidel je třeba brát v úvahu nižší schopnost termodřeva absorbovat vodu z lepidla. Což znamená delší vytvrzování. Stejně tak povrchová úprava se provádí běžnými postupy a nátěrovými látkami.

K mechanickému spojování lze použít samořezné vruty se zápusťnou hlavou, eventuálně předvrtat otvory. Pro zatloukání hřebíků je lepší používat pneumatické pistole a dbát správného tlaku (ThermoWood Handbook 2003).

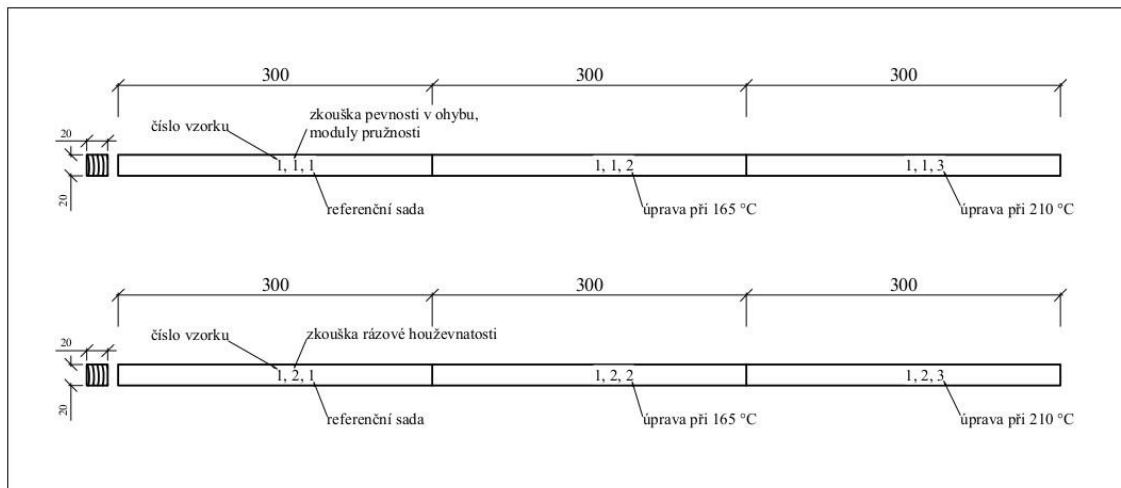
4 Metodika

K posouzení vybraných vlastností dřeva olše bylo připraveno celkem sto osmdesát zkušebních vzorků, z nichž dvě třetiny byly podrobeny tepelné úpravě, zbývající neupravená třetina sloužila jako referenční sada. Na zkušebních tělesech byly provedeny zkoušky pro stanovení: dynamického a statického modulu pružnosti, pevnosti v ohybu, rázové houževnatosti, hustoty, vlhkosti a šířky letokruhů. Zkoušky probíhaly v prostorách laboratoře na Fakultě lesnické a dřevařské České zemědělské univerzity dle standardizovaných postupů v souladu s normami ČSN. Před každou zkouškou byla zkušební tělesa aklimatizována v prostředí o teplotě 20 ± 2 °C a relativní vzdušné vlhkosti 65 ± 5 %.

4.1 Příprava vzorků

Materiál pro přípravu vzorků pochází ze Školního lesního podniku ČZU v Kostelci nad Černými Lesy. Z olšové fošny byly nejprve nařezány latě o rozměru 25 mm x 50 mm x 1000 mm (rad. x tang. x ax.), poté hoblovány na pravoúhlý průřez 20 mm x 50 mm, následně podélně rozmítnuty na průřez 20 mm x 22 mm a opět hoblovány na rozměr 20 mm x 20 mm x 1000 mm. Takto vzniklé lišty se příčně rozdělily na tělesa o rozměrech 20 mm x 20 mm x 300 mm, zaručující podélnou paralelnost vzorků v sadě dle stupně úpravy. Vzorky byly rozděleny do dvou skupin pro vykonání rozdílných zkoušek, tak aby se zachovala příčná paralelnost mezi skupinami umožňující vzájemné porovnání. Vzniklo tak šedesát těles do každé sady dle stupně úpravy, z nichž třicet bylo určeno pro zjištění modulů pružnosti a pevnosti v ohybu a třicet pro zjištění rázové houževnatosti. Vlhkost, hustota a šířka letokruhů byla zjišťována na každém vzorku.

Vzorky byly vybrány, tak aby neobsahovaly suky, trhliny, reakční dřevo a odklon vláken v zatěžované rovině byl minimální. Každý vzorek byl řádně označen trojicí číslic, první značí číslo vzorku, druhá vykonanou zkoušku a třetí stupeň úpravy.

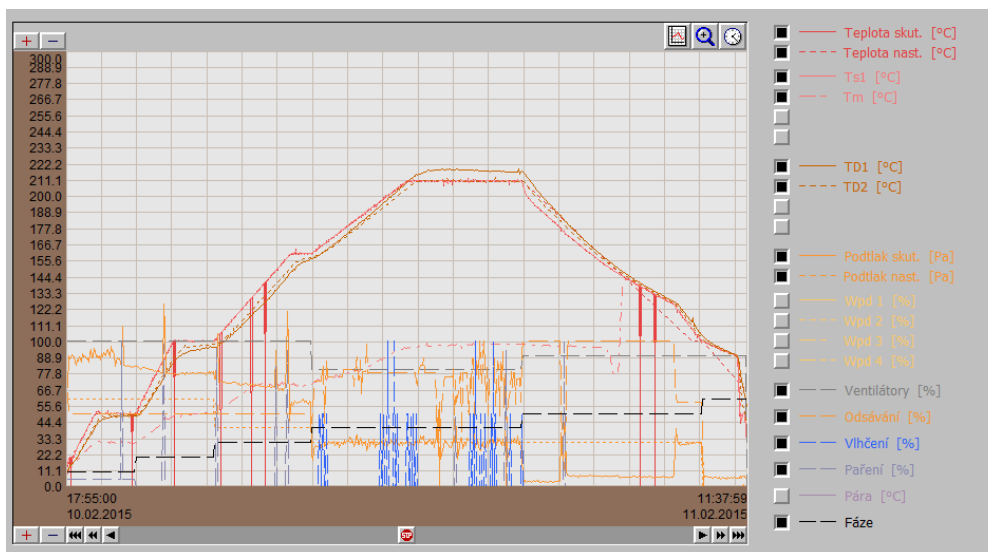


Obr. 9 Schématické znázornění způsobu výroby a značení vzorků

Termická úprava byla provedena v termokomoře firmy KATRES ve výzkumném středisku Truba u Kostelce nad Černými Lesy finskou metodou v prostředí vzduchu. Třetina vzorků byla podrobena úpravě při 165 °C, třetina při 210 °C během tří hodin. Před i po úpravě byly vzorky aklimatizovány v aklimatizační komoře při teplotě 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 ± 5 %.



Obr. 10 Vzorky v termokomoře po úpravě (foto Tomáš Holeček)



Obr. 11 Průběh termické úpravy při 210 °C (foto Tomáš Holeček)

4.2 Stanovení hustoty

Pro účely stanovení hustoty v době zkoušky bylo všech sto osmdesát vzorků zváženo na laboratorních vahách s přesností 0,01 g. Posuvným měřítkem s přesností 0,01 mm byly změřeny příčné rozměry (uprostřed tělesa), podélný rozměr byl měřen pravítkem s přesností na 1 mm. Výsledná hustota byla vypočtena podle definičního vzorce:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$$

kde ρ_w – hustota dřeva při dané vlhkosti, m_m – hmotnost dřeva při dané vlhkosti (kg), V_w – objem dřeva při dané vlhkosti (m^{-3}) (Požgaj 1993).

4.3 Stanovení dynamického modulu pružnosti

Stanovení dynamického modulu pružnosti bylo založeno na měření rychlosti šíření zvuku ve dřevě a její závislosti na hustotě a modulu pružnosti dřeva. Použitý přístroj FAKKOP Ultrasonic Timer má dvě přítlačné sondy, první vysílá ultrazvukový impuls, který je po průchodu materiálem zachycen druhou sondou a čas průchodu v μs je zobrazen na displeji přístroje. Měření probíhalo na radiální ploše. Při známé vzájemné vzdálenosti sond není problém vypočítat rychlost šíření zvuku vzorkem.

Pro přesnost měření je nutné provést korekci na konkrétní dřevinu, protože korekce je výrobcem stanovena pouze pro jedli a vzdálenost sond 6–47 cm. Korekce času byla provedena na každém pátém vzorku měřením ve vzdálenostech sond 22, 18, 14, 10 a 6 cm. Naměřené hodnoty byly vyneseny do grafu a proloženy přímkou. Z rovnice přímky vyšla korekce v mikrosekundách, znamenající čas průchodu při nulové vzájemné vzdálenosti sond. Průměr těchto korekcí byl odečten od naměřeného času ve vzdálenosti sond 14 cm. Rychlost průchodu zvuku vzorkem pak určíme ze vzorce:

$$c = \frac{1000 \cdot d}{t - korekce} \quad (m \cdot s^{-1})$$

kde d – vzájemná vzdálenost sond (mm), t – naměřený čas průchodu zvuku (μs) (FAKKOP Ultrasonic Timer user's guide).

Rychlost šíření zvuku materiálem je definována vztahem:

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

kde E – modul pružnosti (MPa), ρ – hustota ($kg \cdot m^{-3}$).

Jelikož hustotu zkušebních vzorků a rychlost šíření zvuku dřevem již známe, pro výpočet dynamického modulu pružnosti dřeva v MPa vztah upravíme na tvar:

$$E_{dyn} = \frac{\rho_w \cdot c^2}{10^6} \quad (MPa)$$

kde ρ_w – hustota dřeva při dané vlhkosti ($kg \cdot m^{-3}$), c – rychlost šíření zvuku dřevem ($m \cdot s^{-1}$).

4.4 Stanovení statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu

Po měřeních nezbytných ke stanovení dynamického modulu pružnosti následovaly destruktivní zkoušky statickým trojbodovým ohybem v tangenciálním směru na trhacím stroji UTS 50 modernizovaným softwarem TIRA. Zkouška podléhala normě ČSN 0115 a ČSN 0116. Statický modul pružnosti byl určen zároveň se zkouškou pevnosti v ohybu, a to v rozmezí 10 % a 40 % z meze úměrnosti. Příslušná norma pro stanovení statického modulu pružnosti uvažuje nikoliv trojbodový ohyb, ale čtyřbodový ohyb. Toto bylo zohledněno ve výpočtovém vzorci.

Ze změny zaznamenaného průhybu a zatěžující síly a známých rozměrů byl vypočítán statický modul pružnosti dle vztahu:

$$E = \frac{\Delta F \cdot l_0^3}{4bh^3 \Delta y} \quad (MPa)$$

kde ΔF – změna zatěžující síly (N), l_0 – vzdálenost podpěr (mm), b – šířka zkušebního tělesa (mm), h – výška zkušebního tělesa (mm), Δy – změna průhybu tělesa (mm) (Požgaj 1993).

Pevnost v ohybu byla stanovena až na mez pevnosti, kdy nastal lom zkušebního tělesa a odpovídá maximálnímu napětí ve vrstvách vzdálených od neutrální zóny způsobenému ohybovým momentem. Při jednoduchém trojbodovém ohybu pro pravoúhlý průřez tělesa, kdy zatěžující síla působí uprostřed mezi podpěrami lze maximální napětí vypočítat pomocí vzorce:

$$\sigma_{max} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l_0}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (MPa)$$

kde F_{max} – maximální působící síla (N), l_0 – vzdálenost podpěr (mm), b – šířka tělesa (mm), h – výška tělesa (mm) (Požgaj 1993).

4.5 Stanovení rázové houževnatosti

Stanovení rázové houževnatosti podléhalo normě ČSN 49 0117. Zkouška byla vykonána pomocí Charpyho kladiva v tangenciálním směru. Prvním krokem zkoušky bylo změření příčných rozměrů ve středu tělesa. Po přeražení byla na stupnici odečtena spotřebovaná (absorbovaná) práce v Joulech s přesností na 1 J. Rázová houževnatost je definována vztahem:

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

kde A_w – rázová houževnatost při vlhkosti v době zkoušky, W – práce spotřebovaná na přeražení (J), b , h – příčné rozměry tělesa (cm) (Gandelová 2009).



Obr. 12 Vzorky po zkoušce rázové houževnatosti

4.3 Stanovení vlhkosti a šířky letokruhů

Po vykonání destruktivních zkoušek bylo z každého vzorku odříznuto normalizované těleso rozměrů 20 mm x 20 mm x 30 mm pro účely stanovení vlhkosti v době zkoušky. Byla použita norma ČSN 49 0103. Po aklimatizaci byla tělesa zvážena na laboratorních vahách s přesností 0,01 g, poté vysušena v laboratorní sušárně při teplotě 103 ± 2 °C na nulovou vlhkost a opětovně zvážena. K výpočtu vlhkosti byl použit následující vzorec:

$$w_{abs} = \frac{m_v}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (\%)$$

kde m_w – hmotnost vlhkého dřeva (kg, g), m_0 – hmotnost absolutně suchého dřeva (kg, g), m_v – hmotnost vody (kg, g) (Gandelová 2009).

Před sušením byla na stejných tělesech měřena šířka letokruhů. Šířka letokruhů má význam jako faktor ovlivňující hustotu. Vzorky byly naskenovány do počítače a pomocí softwaru obrazové analýzy NIS Elements AR 4.11 (Laboratory Imaging) byla měřena šířka letokruhu v pixelech s následným přepočtem na milimetry dle vzorce:

$$d = \frac{2,54 \cdot d_p}{DPI} \cdot 10 \quad (mm)$$

kde d – šířka letokruhu, d_p – šířka letokruhu v pixelech, DPI – rozlišení skeneru.

5 Výsledky a diskuze

Výsledky zpracované na základě naměřených dat jsou uvedeny v grafické a tabelární podobě a porovnány s dostupnými výsledky v odborné literatuře. Jednotlivé vlastnosti jsou prezentovány pomocí krabicových grafů, které znázorňují vliv termické úpravy na danou vlastnost. Pro každou vlastnost a každý stupeň úpravy byl posouzen vliv hustoty vycházející z grafu lineární regresi. Korelační koeficient pak určuje míru závislosti proměnných. Samotná hustota byla podrobena korelaci se šířkou letokruhů, jakožto faktorem hustotu ovlivňujícím.

Výsledky jsou uváděny v hodnotách odpovídajících rovnovážné vlhkosti zkušebních těles v době zkoušky (tj. aklimatizované při teplotě 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 ± 5 %), přestože dosažená rovnovážná vlhkost se pro jednotlivé stupně úpravy lišila. Účinkem termické úpravy je pokles dosažené rovnovážné vlhkosti, což má obecně za následek zlepšení mechanických vlastností dřeva. Přepočtem na jednotnou vlhkost by byly termicky upravené vzorky připraveny o svou výhodu a došlo by ke zkreslení vlivu tepelné úpravy. Základní statistiky jsou uvedeny v tabulkách 1–3.

Tab. 1 Základní výsledky, referenční sada

	Počet měření	Průměr	Maximum	Minimum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Hustota (kg. m ⁻³)	60	570	642	507	32	5,6
Dynamický modul pružnosti (MPa)	30	8289	11522	5489	1641	19,8
Statický modul pružnosti (MPa)	30	8034	10158	5222	1212	15,1
Pevnost v ohybu (MPa)	30	78,2	107,6	36,9	15	18,9
Rázová houževnatost (J. cm ⁻²)	30	3,7	6,5	0,7	1,5	39,0
Vlhkost (%)	60	11,6	12,5	11,2	0,3	2,5

Tab. 2 Základní výsledky, termická úprava při 165 °C

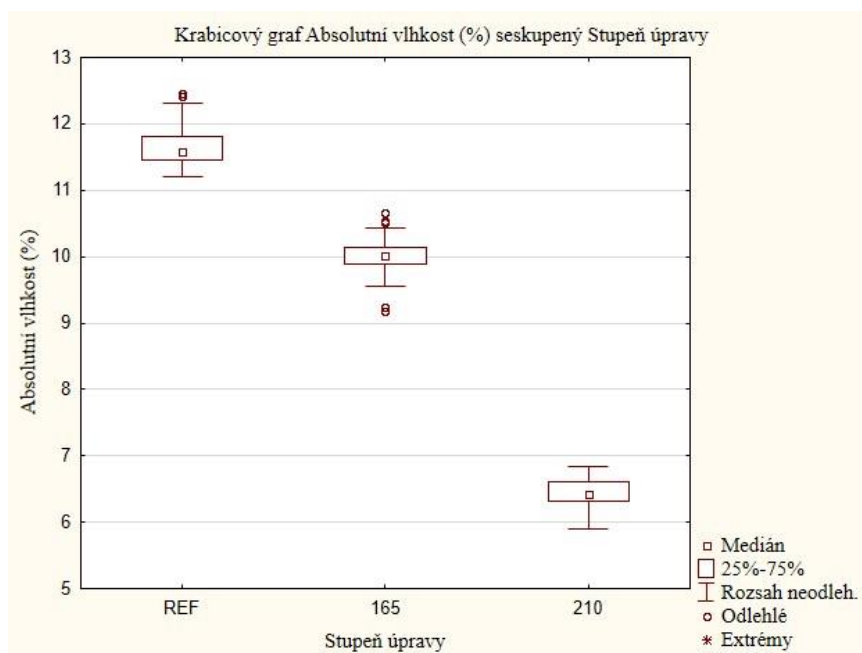
	Počet měření	Průměr	Maximum	Minimum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Hustota (kg. m ⁻³)	60	557	654	498	37	6,6
Dynamický modul pružnosti (MPa)	30	10881	14914	4097	2315	21,6
Statický modul pružnosti (MPa)	30	8207	10024	4115	1094	13,6
Pevnost v ohybu (MPa)	30	77,7	99,8	36,4	13	16,4
Rázová houževnatost (J. cm ⁻²)	30	3,5	6,8	1,0	1,1	30,7
Vlhkost (%)	60	10	10,7	9,2	0,3	2,8

Tab. 3 Základní výsledky, termická úprava při 210 °C

	Počet měření	Průměr	Maximum	Minimum	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
Hustota (kg. m ⁻³)	60	511	580	423	30,0	6,0
Dynamický modul pružnosti (MPa)	30	9485	13322	5744	1855	19,5
Statický modul pružnosti (MPa)	30	7664	10119	5275	1136	14,8
Pevnost v ohybu (MPa)	30	43,0	76,8	24,4	12	26,9
Rázová houževnatost (J. cm ⁻²)	30	1,4	2,8	0,3	0,5	39,4
Vlhkost (%)	60	6,4	6,8	5,9	0,2	3,1

5.1 Vlhkost

Vlivem termické úpravy došlo k očekávanému poklesu absolutní rovnovážné vlhkosti (za totožných podmínek aklimatizace všech sad). U nižšího stupně úpravy došlo k poklesu z 11,6 % na 10 %. Pro vyšší teplotní stupeň byl pozorován pokles téměř o polovinu oproti referenční sadě, na 6,4 %. Esteves (2009) uvádí, že pro buk upravený retifikační metodou při teplotách od 200 °C do 260 °C došlo k poklesu rovnovážné vlhkosti z 10 % na 5 % při relativní vlhkosti 66 %. Pro smrk upravený metodou OHT při 160 °C a 190 °C během 4 h došlo k poklesu vlhkosti z 8,7 % na 7 % pro relativní vlhkost 30 %, respektive z 8,1 % na 6,5 %.

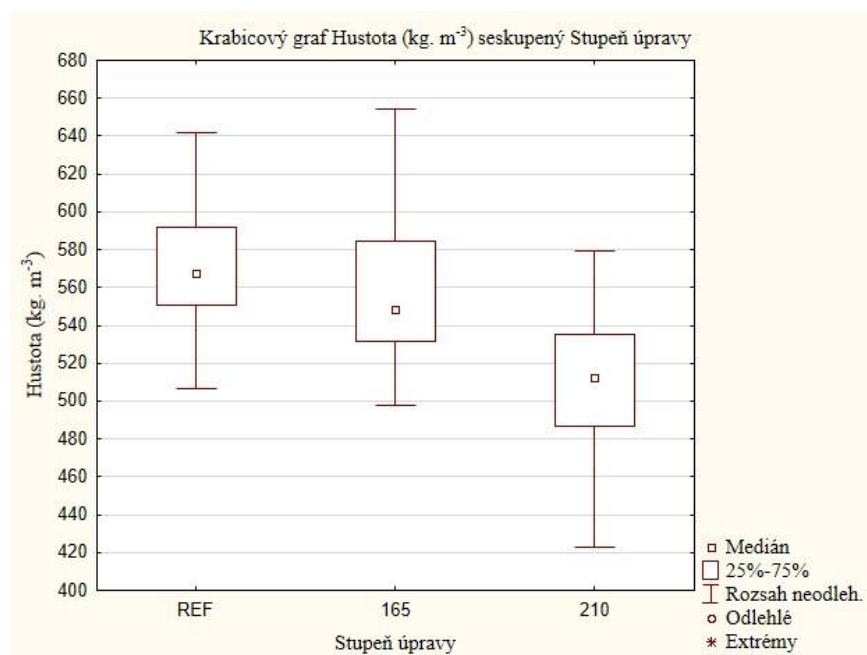


Graf 1 Rovnovážná vlhkost po aklimatizaci při 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %

5.2 Hustota a šířka letokruhů

Kromě zjištění vlivu termické úpravy na hustotu dřeva, sloužilo její stanovení k výpočtu dynamického modulu pružnosti a posouzení jejího vlivu na dané vlastnosti. Jako faktor ovlivňující hustotu byla posouzena šířka letokruhů. Z grafů lineární regrese se nepodařilo zjistit významnou závislost posuzovaných vlastností na hustotě ani závislost mezi hustotou a šířkou letokruhů (viz. přílohy 2; 3; 4). U roztroušeně pórovitých dřevin se tato závislost stanovuje obtížně.

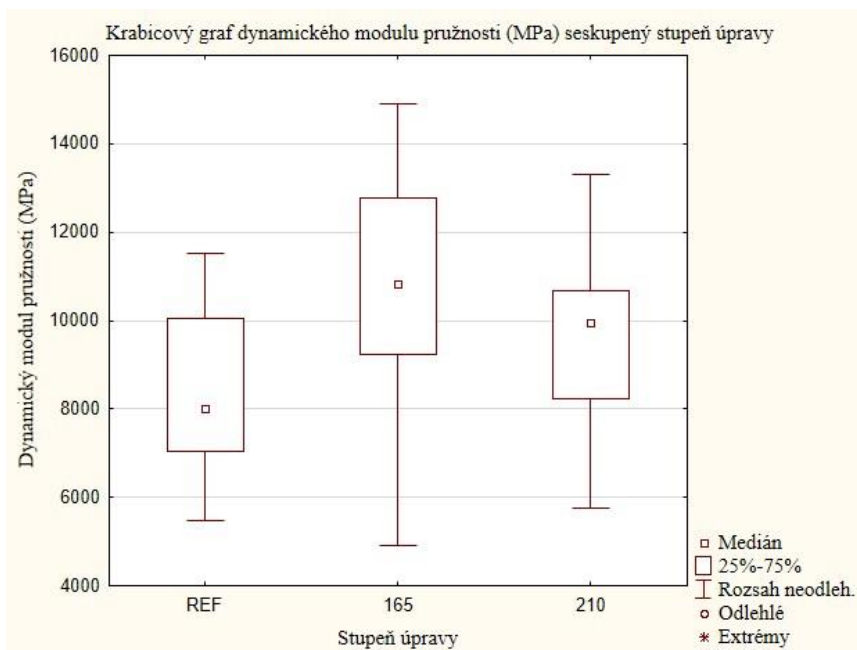
Vlivem termické úpravy došlo dle očekávání ke snížení hustoty dřeva. Důvodem je úbytek hmoty při termické úpravě. Potvrdilo se, že s vyšší teplotou úpravy se hustota snižuje více, úbytek hmoty je vyšší. Úbytek hmoty a snížení hustoty závisí i na čase úpravy a pro listnaté dřeviny je úbytek výraznější. Vzhledem k tomu, že mechanické vlastnosti dřeva se obecně s klesající hustotou snižují, je možné že i toto promluvílo vedle termické úpravy do zjištěných hodnot posuzovaných vlastností.



Graf 2 Hustota dle stupně úpravy

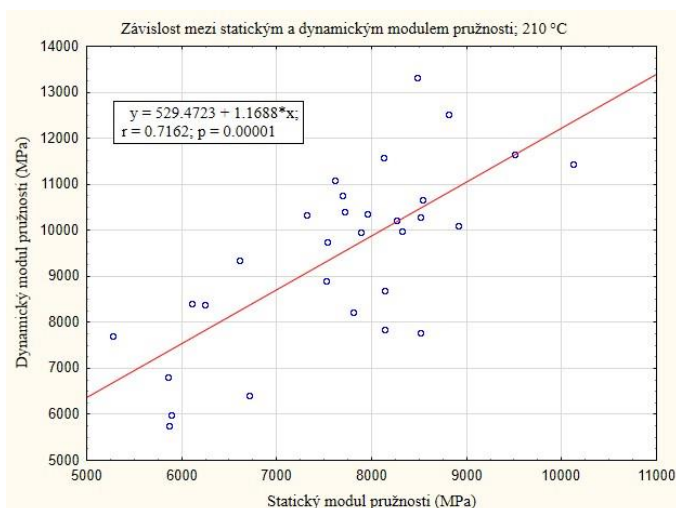
5.3 Dynamický modul pružnosti

Z grafu je patrný jasný nárůst dynamického modulu pružnosti u obou stupňů úpravy oproti referenční sadě. Mezi prvním a druhým stupněm se modul pružnosti sice snižuje, ale zůstává vyšší než u neupravené sady. Postupný nárůst a pokles modulu pružnosti se stoupající teplotou úpravy potvrzuje i ThermoWood Handbook (2003) a Valášková (2015) uvádí podobné závěry.



Graf 3 Dynamický modul pružnosti dle stupně úpravy

V souvislosti s hustotou nebyla zjištěna žádná jednoznačná závislost. Mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti jistá závislost existuje, nejvíce se projevila u druhého stupně úpravy (ostatní viz. přílohy 5; 6)



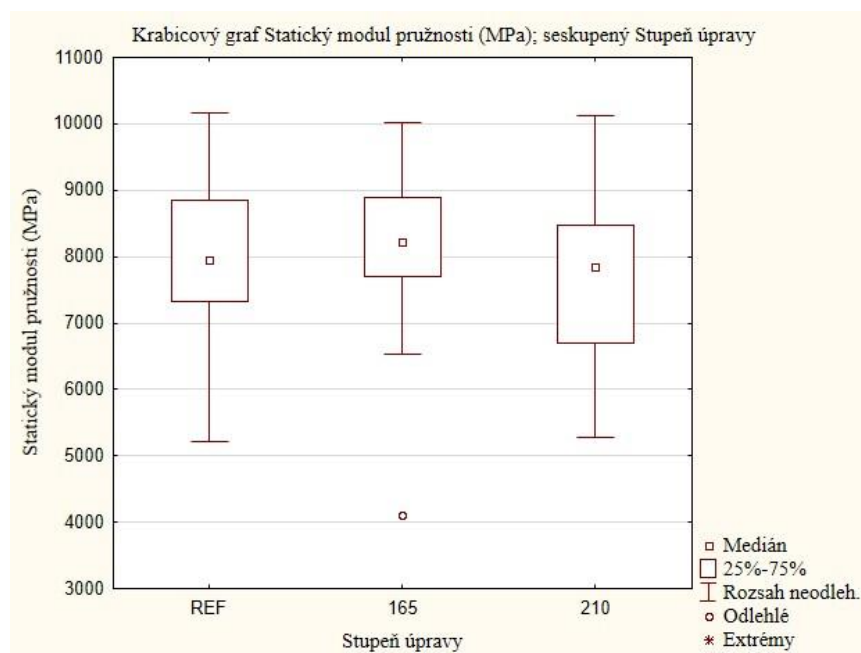
Graf 4 Závislost mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti, 210 °C

5.4 Statický modul pružnosti

Pro nižší stupeň úpravy došlo k mírnému nárůstu statického modulu pružnosti, naopak vyšší teplota měla vliv opačný. Předpokládaný trend se tak potvrdil. ThermoWood

Handbook (2003) i Esteves (2009) uvádějí, že při mírnější termické úpravě dochází k nárůstu modulu pružnosti, při teplotách nad 220 °C pak dojde k drastickému poklesu. Zdůvodnění lze hledat v nižší rovnovážné vlhkosti termodřeva, která do určité teploty úpravy vyvažuje negativní vliv chemických změn. Valášková (2015) zjistila při stejné práci s dřevem douglasky naopak nárůst modulu pružnosti u obou stupňů úpravy, přičemž potvrzuje, že pro mírnější úpravu je nárůst výraznější. Může to být způsobeno nižším podílem hemicelulóz v jehličnatém dřevě, které jsou termickou úpravou nejvíce dotčeny.

Grafy korelace statického modulu pružnosti s hustotou jsou uvedeny v přílohách 7; 8; 9. Ukazuje se, že s rostoucí hustotou roste i statický modul pružnosti. Hodnoty korelačního koeficientu jsou však příliš nízké.



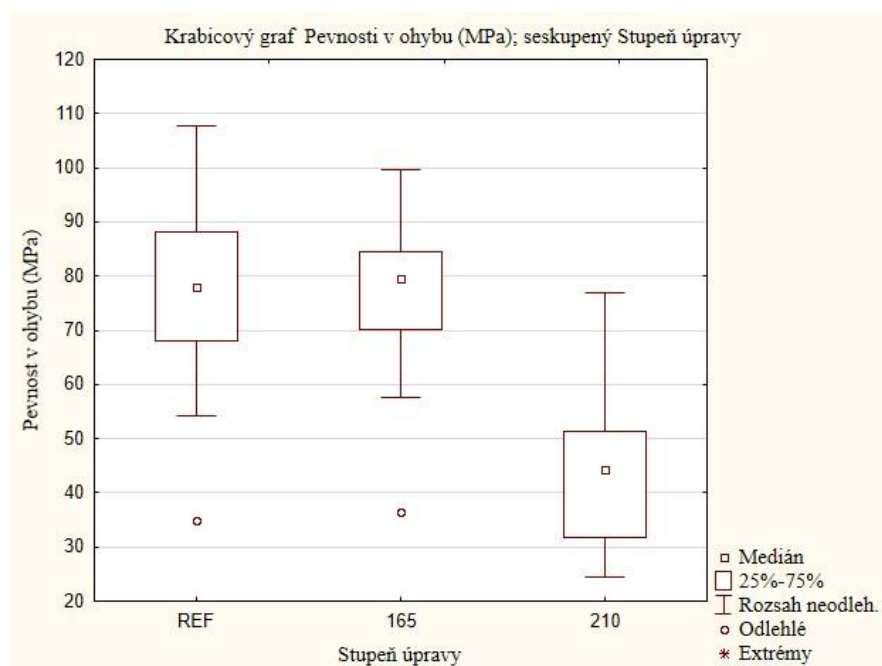
Graf 5 Statický modul pružnosti dle stupně úpravy

5.5 Pevnost v ohybu

Při vyšším teplotním stupni došlo k značnému poklesu ohybové pevnosti. Strukturální změny při této teplotě jsou na tolik významné, že pokles byl očekávaný. Sada upravená při 165 °C se svojí pevností v ohybu od referenční sady příliš nelišila. U nižšího stupně bylo možné očekávat i mírný nárůst díky nižší rovnovážné vlhkosti. Valášková (2015)

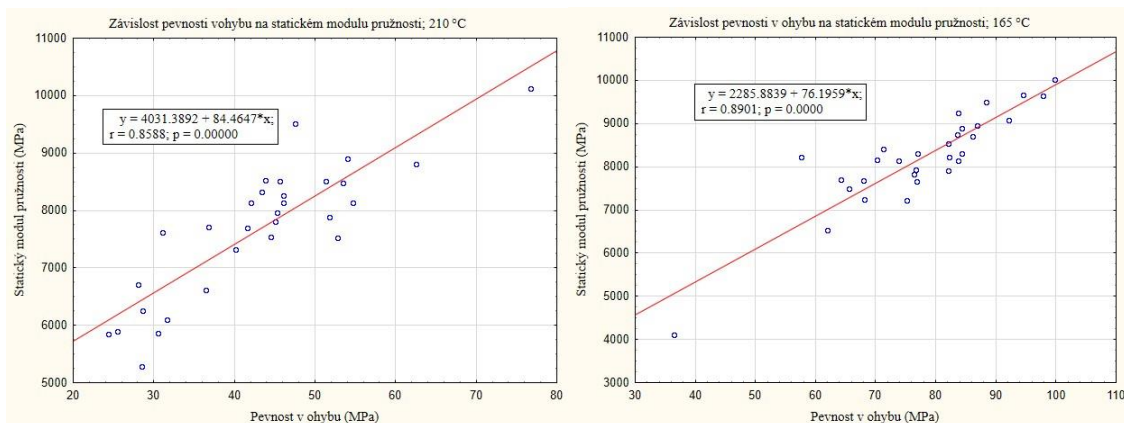
uvádí pro dřevo douglasky, že při 165 °C tepelné úpravy došlo k nárůstu průměrné pevnosti v ohybu z 92,12 MPa (neupravená sada) na 95,31 MPa a při 210 °C k poklesu na 84,9 MPa

Zjištění této práce se liší. Průměrná hodnota pevnosti v ohybu neupravené sady byla 78,2 MPa, úpravou při teplotách 165 °C a 210 °C klesla na 77,7 MPa, respektive na 43,0 MPa. Rozdíly lze přisoudit odlišnostem ve struktuře dřevin.

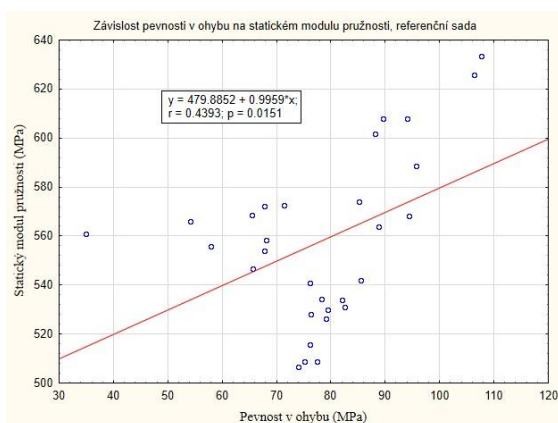


Graf 6 Pevnost v ohybu dle stupně úpravy

Závislost pevnosti v ohybu na hustotě se výrazněji ukazuje jen pro referenční sadu při korelačním koeficientu $r = 0,4393$ (viz. přílohy 10; 11; 12). Korelace mezi statickým modulem pružnosti a pevností v ohybu se ukázala být téměř lineární.



Graf 7 Závislost mezi pevností v ohybu a statickým modulem pružnosti, 210 °C a 165 °C

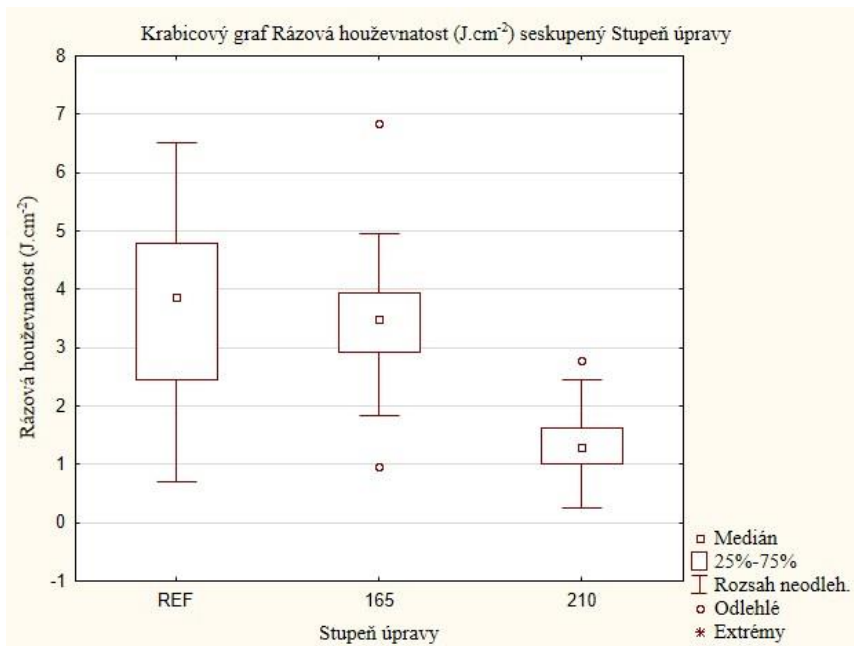


Graf 8 Závislost mezi pevností v ohybu a statickým modulem pružnosti, referenční sada

5.6 Rázová houževnatost

Podle dostupných zdrojů je termicky upravené dřevo křehké. Toto bylo potvrzeno zkouškou rázové houževnatosti. K poklesu této vlastnosti došlo u obou stupňů úpravy a dle očekávání daleko výrazněji při vyšší teplotě.

Průměrná hodnota rázové houževnatosti referenční sady 3,7 J. cm⁻² klesla na 3,5 J. cm⁻² pro teplotu úpravy 165 °C a na pouhých 1,4 J. cm⁻² pro 210 °C. Valášková (2015) při pokusech s douglaskou zjistila průměrné hodnoty 8,9 J. cm⁻²; 8,7 J. cm⁻² a 5,8 J. cm⁻². Což potvrzuje význam teploty a dřeviny použité k termické úpravě. Závislost rázové houževnatosti na hustotě se nepodařilo prokázat (viz. přílohy 13; 14; 15).



Graf 9 Rázová houževnatost dle stupně úpravy

6 Závěr

Cílem této práce je posoudit vliv termické úpravy na vybrané vlastnosti dřeva olše. K tomuto účelu bylo připraveno sto osmdesát zkušebních vzorků. Dvě třetiny z nich byly termicky modifikovány dle finského procesu ThermoWood při 165 °C a 210 °C, zbývající třetina bez úpravy sloužila jako referenční sada. Mezi zkoumané vlastnosti jsem zařadil vlhkost, hustotu, dynamický a statický modul pružnosti, pevnost v ohybu a rázovou houževnatost. Kromě vlivu termické úpravy jsem posuzoval i vliv hustoty na dané vlastnosti a jako faktor ovlivňující hustotu jsem zvolil šířku letokruhů. Pro získání dat jsem provedl příslušné zkoušky dle standardizovaných postupů a norem ČSN. Metodika přípravy vzorků a zkoušek je v práci popsána. Zjištěné výsledky jsou prezentovány pomocí tabulek a grafů a porovnány s dostupnými údaji v odborné literatuře. Teoretická část práce popisuje zkoumanou dřevinu, zjišťované vlastnosti a faktory, které je ovlivňují. Dále charakterizuje termickou úpravu, výrobu ThermoWood, chemické změny ve struktuře termodřeva a jejich vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti a trvanlivost dřeva.

Termickou úpravou dochází ke změnám ve struktuře dřeva. Rozsah změn záleží zejména na teplotě a době úpravy a použité dřevině. Tyto změny mají pozitivní i negativní vliv na výsledné vlastnosti modifikovaného dřeva. Zásadní pozitivní změnou je snížení rovnovážné vlhkosti dřeva, které kladně ovlivňuje mechanické vlastnosti a v ideálním případě převýší negativní vliv degradace části stavebních struktur dřeva.

Pro objektivní posouzení vlivu termické úpravy jsem vzorky před zkouškami aklimatizoval v prostředí o teplotě 20 ± 2 °C a relativní vlhkosti 65 ± 5 %. Rovnovážná vlhkost tak odpovídala teplotnímu stupni úpravy a znamenala výhodu pro modifikované sady. Výsledky mého výzkumu ukazují, že z posuzovaných vlastností byla pozitivně ovlivněna právě rovnovážná vlhkost a díky tomu dynamický modul pružnosti. Oproti referenční sadě jsem zaznamenal pokles průměrné rovnovážné vlhkosti o 13,8 % u sady upravené při 165 °C a pokles 45 % u sady upravené při 210 °C. Pro dynamický modul pružnosti to znamenalo nárůst o 29,4 % a 15,6 %, při 165 °C, respektive 210 °C. U nižšího teplotního stupně došlo k mírnému nárůstu i u statického modulu pružnosti.

Naopak průměrné hodnoty pevnosti v ohybu se u obou termicky upravených sad snížily. Pro vyšší teplotní stupeň dokonce o 46 %. Jednoznačně nejvíce dotčenou vlastností je rázová houževnatost. U sady upravené při teplotě 165 °C klesla průměrná hodnota sice jen o pár procent, ale většina naměřených hodnot leží v úzkém intervalu od průměru. U sady upravené při teplotě 210 °C je průměr o celých 62 % nižší. V případě hustoty došlo v důsledku úbytku hmoty také k poklesu. Závislost mechanických vlastností na hustotě se dostatečně spolehlivě stanovit nepovedlo. Stejně tak závislost mezi hustotou a šířkou letokruhů.

Z výsledků je zřejmé, že největší vliv má termická úprava na pevnost v ohybu a rázovou houževnatost, kde ani výrazně nižší rovnovážná vlhkost termicky modifikovaného dřeva oproti dřevu neupravenému nestačí k vyvážení negativních změn ve struktuře dřeva. Dále se potvrdil význam teploty použité při úpravě, a že s vyšší teplotou dochází k značnému zhoršení mechanických vlastností dřeva. Pružnostní vlastnosti se mohou do určité teploty zlepšovat. Tyto závěry se shodují s odbornou literaturou a lze tedy konstatovat, že vytyčených cílů této práce bylo dosaženo.

V celkovém kontextu termické úpravy by bylo velice zajímavé a pro výrobce i uživatele termicky modifikovaného dřeva přínosné, porovnáním již existujících a dalším výzkumem získaných dat dospět k ucelenému souboru hodnot (mechanických vlastností, odolnosti, trvanlivosti atd.), na jehož základě by bylo možné, vždy pro konkrétní konečnou aplikaci s ohledem na požadované vlastnosti, zvolit ten nejvhodnější postup termické úpravy dřeva, zahrnující technologii, teplotu, čas, druh dřeviny případně další faktory. To ovšem znamená nepředstavitelné množství svědomité práce, které se svým rozsahem může blížit práci v dřevařském výzkumu již svědomitě vykonané. Nechť je tato práce k tomu přínosem.

7 Použité zdroje

Literatura

DESCH, H.E.; DINWOODIE, J.M. *Timber: structure, properties, conversion and use*. 7th ed. Basingstoke: Macmillan, 1996. ISBN 03-336-0905-0.

GANDELOVÁ, L.; HORÁČEK, P.; ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009. ISBN 978-80-7375-312-2.

GIBBS, N. *Dřevo: obrazový přehled více než 100 druhů dřev včetně jejich využití*. V Praze: Slovart, 2005. ISBN 80-7209-720-2.

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998. ISBN 80-715-7347-7.

JOHÁNEK, A.; SPURNÁ, M. (ed.) *Dřevařská technická příručka*. Praha: SNTL, 1970. Řada dřevařské literatury.

LEXA, J.; NEČESANÝ, V.; PACLT, J.; TESAŘOVÁ, M.; ŠTOFKO, J. *Mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva*. Bratislava: Drevárský výzkumný ústav, 1952.

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

NĚMEC, J.; JANDÁČEK, V.; HURDA, B. *Dřevo: historický lexikon: [tradice z pohledu dneška]*. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-1187-7.

PESCHEL, P. a kol. *Dřevařská příručka – tabulky, technické údaje*. Praha: Sobotáles, 2002. 320 s. ISBN 80-85920-84-0.

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

REINPRECHT, L. *Ochrana dřeva: vysokoškolská učebnica*. Vo Zvolene: Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-228-1863-6.

SLÁVIK, M. *Lesnická dendrologie*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2004. ISBN 80-213-1242-4.

TSOUMIS, G. *Science and technology of wood: structure, properties, utilization*. New York: Chapman, 1991. ISBN 04-120-7851-1.

ÚRADNÍČEK, L.; CHMELAŘ, J. *Dendrologie lesnická*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1995. ISBN 80-7157-169-5.

VALÁŠKOVÁ, R. *Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva douglasky*. Praha, 2015. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D.

Elektronické dokumenty

ESTEVE, B.M; PEREIRA, H.M. *Wood modification by heat treatment: a review* [online]. BioResources. 2009, vol. 4, no 1. [cit. 11. 4. 2017]. Dostupné z www.ncsu.edu/bioresources/.

FAKOPP Ultrasonic timer user's guide [online]. [cit. 5. 4. 2017]. Dostupné z www.fakopp.com.

Thermowood Handbook. Helsinki: Finnish Thermowood Association 2003 [online]. [cit. 11. 4. 2017]. Dostupné z www.thermowood.fi.

ZEIDLER, A. *Lexikon dřeva*. Česká zemědělská univerzita v Praze: 2012 [online]. [cit. 21. 3. 2017]. Dostupné z http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon_dreva/.

Mikroskopický atlas dřevin. Dostupné online na http://fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev/.

Technické normy

ČSN 49 0101Drevo. Všeobecné požiadavky na fyzikálne a mechanické skúšky. 1980.

ČSN 49 0103Drevo. 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.

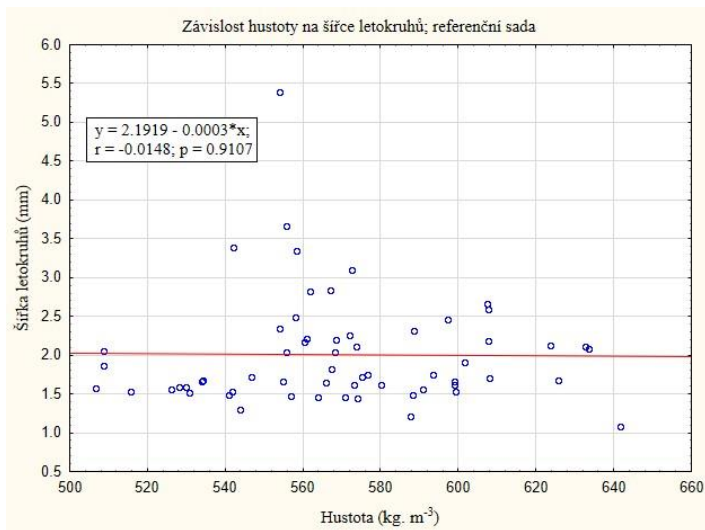
ČSN 49 0116 Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti pri statickom ohybe. 1982.

ČSN 49 0117 Drevo. Rázová húževnatost v ohybe. 1977.

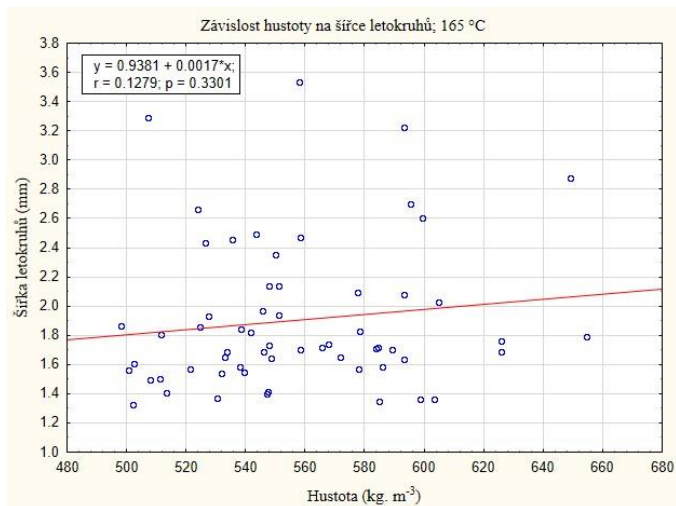
9 Přílohy

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

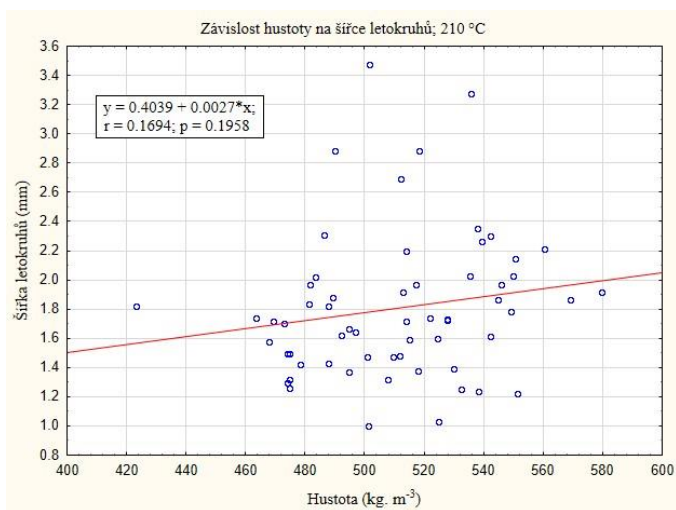
Příloha 1 Zadávací tabulka tepelné úpravy při 210 °C (foto Tomáš Holeček)



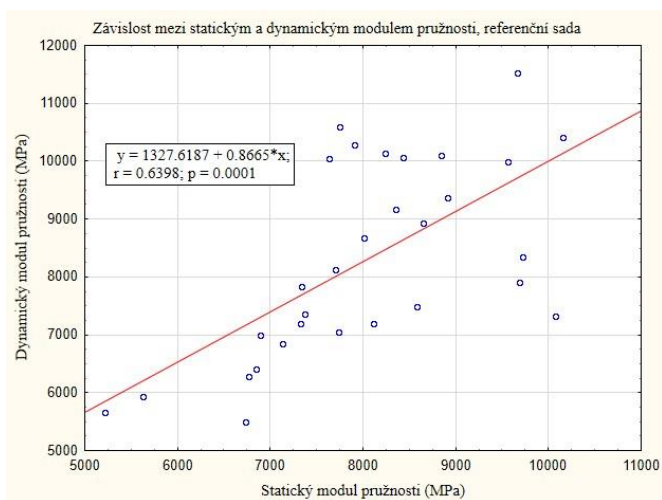
Příloha 2 Závislost hustoty na šířce letokruhů, referenční sada



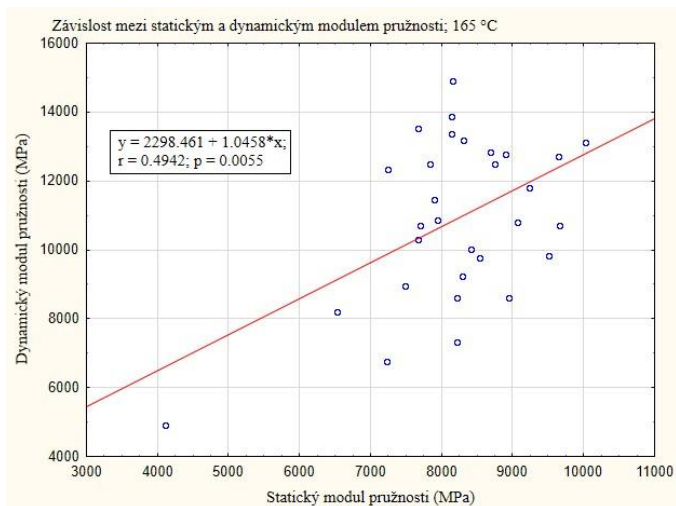
Příloha 3 Závislost hustoty na šířce letokruhů, 165 °C



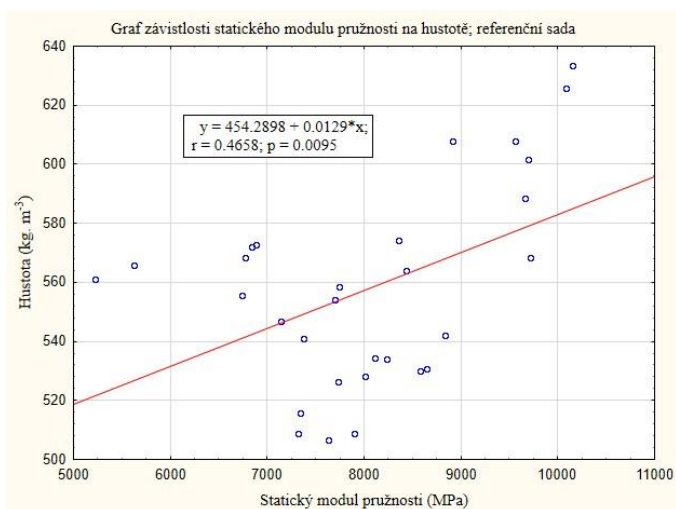
Příloha 4 Závislost hustoty na šířce letokruhů, 210 °C



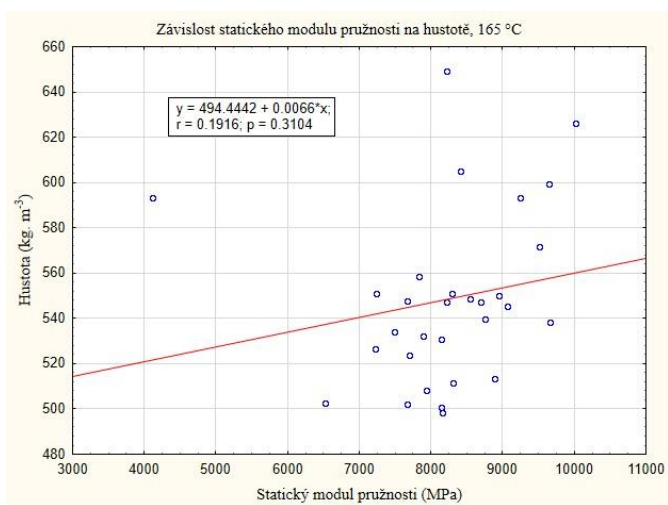
Příloha 5 Závislost mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti, referenční sada



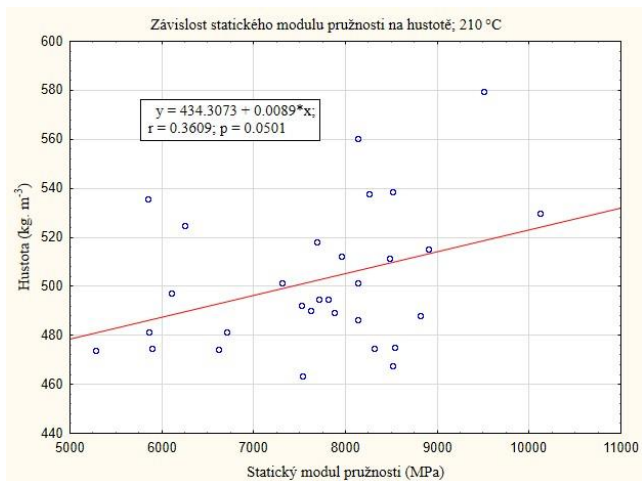
Příloha 6 Závislost mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti, 165 °C



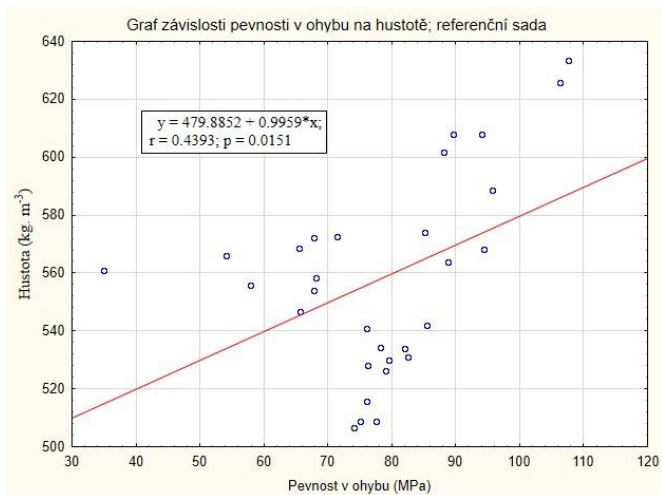
Příloha 7 Závislost statického modulu pružnosti na hustotě, referenční sada



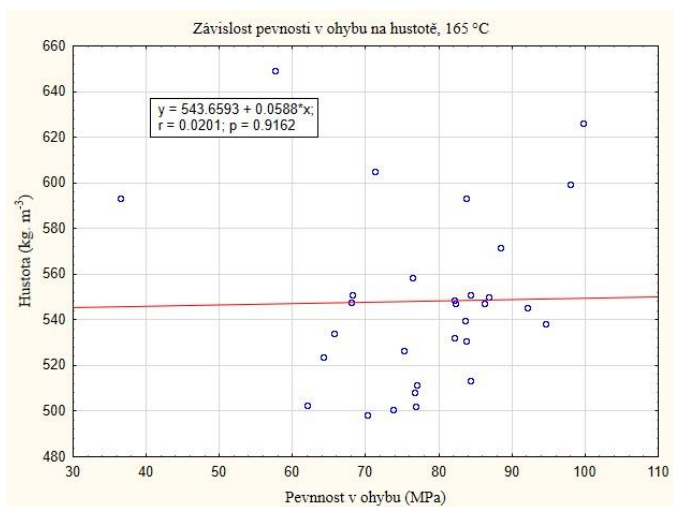
Příloha 8 Závislost statického modulu pružnosti na hustotě, 165 °C



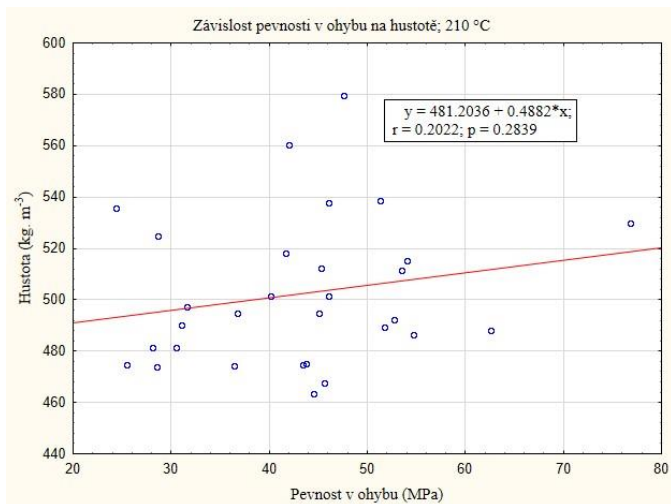
Příloha 9 Závislost statického modulu pružnosti na hustotě, 210 °C



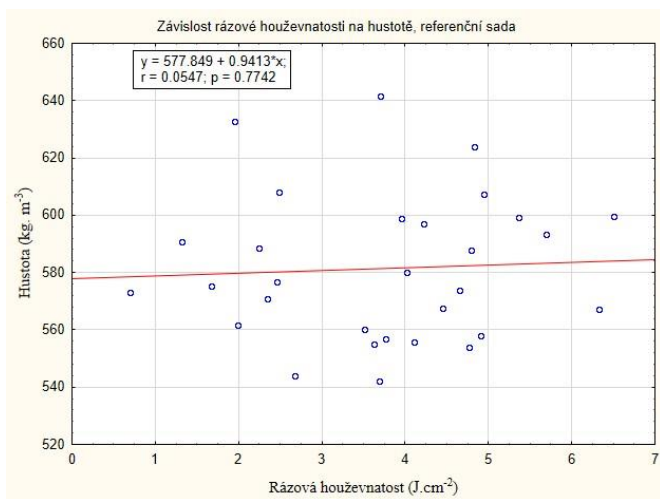
Příloha 10 Závislost pevnosti v ohybu na hustotě, referenční sada



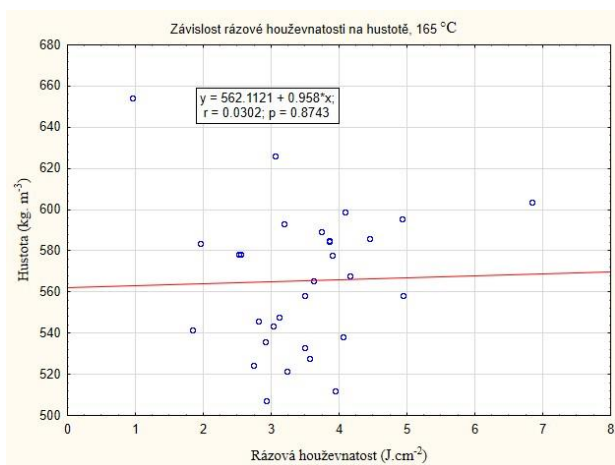
Příloha 11 Závislost pevnosti v ohybu na hustotě, 165 °C



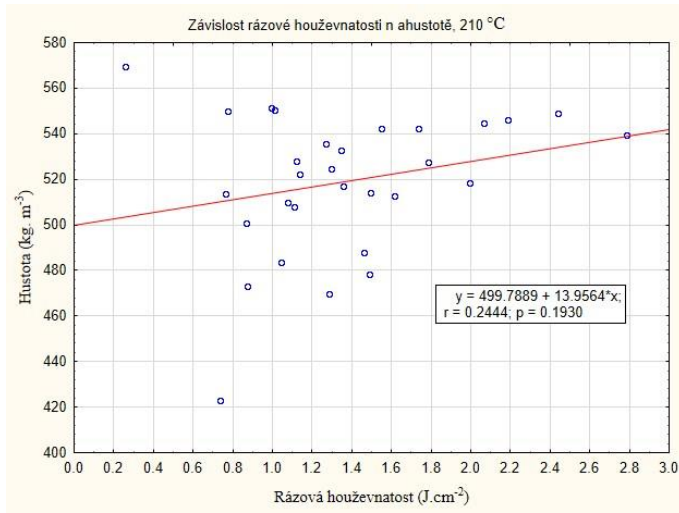
Příloha 12 Závislost pevnosti v ohybu na hustotě, 210 °C



Příloha 13 Závislost rázové houževnatosti na hustotě, referenční sada



Příloha 14 Závislost rázové houževnatosti na hustotě, 165 °C



Příloha 15 Závislost rázové houževnatosti na hustotě, 210 °C