

MENDELOVA UNIVERZITA

V BRNĚ

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě



**Zkoumání vybraných vlastností neupraveného a tepelně upraveného
smrkového a modřínového dřeva z pohledu vhodnosti na výrobu
šindele**

Diplomová práce

Akademický rok: 2014/2015

Jméno a příjmení: Vladimír Hlobil

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci: Zkoumání vybraných vlastností neupraveného a tepelně upraveného smrkového a modřínového dřeva z pohledu vhodnosti na výrobu šindele zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne:..... podpis studenta

Poděkování:

Rád bych poděkoval mému vedoucímu práce Ing. Aleši Dejmalovi, Ph.D. za poskytnutí odborných konzultací, Ing. Janu Baarovi a kolektivu doktorandů ústavu Nauky o dřevě na LDF za pomoc při realizaci praktické části práce. Dále firmě Hlobil za poskytnutí praxe v oboru šindelářství, odborných konzultací a veškerých informací ohledně dřevěného šindele. Bez těchto informací a konzultací by tato práce nemohla vzniknout.

Abstrakt

Jméno a příjmení: Vladimír Hlobil

Název diplomové práce: Zkoumání vybraných vlastností neupraveného a tepelně upraveného smrkového a modřínového dřeva z pohledu vhodnosti na výrobu šindele.

Náplní této diplomové práce je zkoumání a porovnávání vybraných materiálových vlastností smrkového, modřínového, modifikovaného smrkového a modřínového dřeva z pohledu vhodnosti na výrobu dřevěného šindele. Sledované a porovnávané vlastnosti jsou jmenovitě odolnost daného dřevěného materiálu vůči houbě hnědého tlení, pevnost v tlaku napříč vláken, ohybová pevnost a modul pružnosti. Zkoumaný materiál a jeho vybrané vlastnosti jsou srovnávány z pohledu pro použití na výrobu a pokládku dřevěného šindele.

Klíčová slova: modřín, smrk, tepelná modifikace dřeva, dřevěný šindel, odolnost vůči hnilobě, pevnost v tlaku v tangenciálním směru, ohybová pevnost, modul pružnosti.

Abstract

Name and Surname: Vladimír Hlobil

Title of thesis: Investigation of selected properties of untreated and heat-treated spruce and larch in terms of suitability for the production of shingles.

The aim of this thesis is the analysis and comparison of selected material properties of spruce, larch, heat-treated spruce and larch in terms of suitability for the production of wood roof shingles. Monitoring and comparing characteristics are durability of the wood material against the brown rot fungus, compressive strength across the fiber, bending strength and modulus of elasticity. Tested material and its selected properties are compared as for use in the manufacture and installation of wooden shingles.

Key words: larch, spruce, thermal modification of wood, shingle, decay resistance, compressive strength in the tangential direction, bending strength, modulus of elasticity.

1 Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Obsah | 5 |
| 2 | Úvod..... | 8 |
| 3 | Cíl..... | 9 |
| | Literární přehled | 10 |
| 4 | Tepelně modifikované dřevo | 10 |
| 4.1 | Vliv teploty a tepelná degradace dřeva | 11 |
| 4.2 | Vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva..... | 13 |
| 4.2.1 | Hmotnostní úbytek..... | 14 |
| 4.2.2 | Hygroskopicitu a rozměrová stabilita | 14 |
| 4.2.3 | Mechanické vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva..... | 16 |
| 4.2.4 | Odolnost vůči hnilobě..... | 17 |
| 4.2.5 | Odolnost vůči povětrnostním vlivům | 18 |
| 5 | Vlastnosti modřínového dřeva | 20 |
| 5.1 | Odolnost dřeva modřínu (<i>Larix sp.</i>)..... | 20 |
| 5.2 | Hustota a mechanické vlastnosti | 22 |
| 6 | Vlastnosti smrkového dřeva..... | 23 |
| 6.1 | Charakteristika smrkového dřeva..... | 23 |
| 6.2 | Odolnost smrkového dřeva | 23 |
| 6.3 | Mechanické vlastnosti smrkového dřeva | 24 |
| 6.4 | Dřevěný šindel | 24 |
| 6.4.1 | Modřínový štípaný šindel | 24 |
| 6.4.2 | Smrkový štípaný šindel..... | 25 |
| 7 | Materiál a metodika | 26 |
| 7.1 | Výroba materiálu pro zkušební vzorky | 26 |

| | | |
|-------|---|----|
| 7.2 | Výroba zkušebních vzorků..... | 27 |
| 7.2.1 | Modifikace hranolů..... | 27 |
| 7.2.1 | Klimatizace hranolů..... | 29 |
| 7.2.1 | Zkušební vzorky | 29 |
| 7.3 | Zkouška odolnosti vůči dřevokazné houbě..... | 30 |
| 7.3.1 | Zkušební tělesa | 30 |
| 7.3.2 | Houbová kultura a živná půda houby | 30 |
| 7.3.3 | Pomůcky a zařízení..... | 31 |
| 7.3.4 | Příprava před samotnou zkouškou..... | 31 |
| 7.3.5 | Založení a doba působení houby | 32 |
| 7.3.6 | Vyjmutí tělísek..... | 32 |
| 7.3.7 | Stanovení výsledků zkoušky..... | 32 |
| 7.3.8 | Zpracování výsledků..... | 33 |
| 7.4 | Zkouška pevnosti v tlaku napříč vláken..... | 33 |
| 7.4.1 | Zkušební tělesa | 33 |
| 7.4.1 | Pomůcky a zařízení..... | 33 |
| 7.4.2 | Stanovení meze pevnosti dřeva..... | 34 |
| 7.4.3 | Zpracování výsledků..... | 34 |
| 7.5 | Zkouška ohybové pevnosti a modulu pružnosti..... | 34 |
| 7.5.1 | Zkušební tělesa | 34 |
| 7.5.2 | Pomůcky a zařízení..... | 35 |
| 7.5.3 | Stanovení meze pevnosti dřeva..... | 35 |
| 7.5.4 | Zpracování výsledků..... | 35 |
| 8 | Výsledky | 36 |
| 8.1 | Odolnost vůči dřevokazné houbě..... | 36 |
| 8.2 | Mechanické vlastnosti vzorků při ohybové zkoušce..... | 38 |
| 8.2.1 | Mez pevnosti..... | 38 |

| | | |
|-------|---|----|
| 8.2.2 | Modul pružnosti v ohybu | 39 |
| 8.2.3 | Grafy průběhu zatížení jednotlivých vzorků | 41 |
| 8.3 | Pevnost vzorků při tlaku v tangenciálním směru | 44 |
| 8.3.1 | Grafy průběhu zatížení tlakem v tangenciálním směru na dřevní vlákna. | 45 |
| 9 | Diskuse..... | 48 |
| 10 | Závěr | 50 |
| 11 | Summary..... | 51 |
| 12 | Seznam citované literatury a norem..... | 52 |
| 13 | Seznam obrázků a tabulek | 56 |

2 Úvod

Použití dřevěného materiálu je různorodé, zvláště v dnešní moderní době. Stále se však jedná o tradiční materiál používaný například pro dekoraci, či ve stavebnictví. Dřevěná šindelová střešní krytina v současnosti jistým způsobem splňuje funkci dekorační i stavební. Ačkoliv je dřevěný šindel krytinou s dlouholetou tradicí, jedná se stále v současnosti o střešní krytinu spíše exkluzivní, než běžnou a tomu odpovídá i zvýšená cena za šindel oproti jiným krytinám.

Šindelářství je tradiční řemeslo v dnešní době a dřevěný šindel je stoupající v oblíbenosti veřejnosti, podobně jako další přírodní materiály šetrné k životnímu prostředí. Za účasti moderních nástrojů k výrobě a pokládce je snaha zachovat tradiční postupy výroby a systémy montáže, ať už se jedná o valašský smrkový šindel, jenž má své kořeny v oblasti Beskydských hor, nebo o šindel modřínový alpského typu, který má svůj původ spíše v germánských zemích, zejména pak Rakousku a Německu.

Jak už bylo naznačeno, vhodným materiálem pro výrobu dřevěného šindele je v současnosti modřínové či smrkové dřevo. Modřínové dřevo je vhodným materiálem z důvodu jeho přirozené trvanlivosti, ovšem smrkové dřevo je nutné pro zvýšení trvanlivosti impregnovat často chemickými látkami, což v současné moderní době, kdy je brán velký ohled na ochranu životního prostředí může být nevhodné, či dokonce nežádoucí řešení.

Alternativním řešením chemické impregnace dřeva může být tepelně modifikované dřevo. Tepelná modifikace mění chemickou strukturu dřeva a tím i jeho materiálové vlastnosti. Kromě změny mechanických vlastností se mimo jiné jedná i o změny v odolnosti vůči rozkladu dřeva působením houby. Úprava dřeva vysokými teplotami zvyšuje odolnost vůči působení dřevokazných hub a právě z tohoto důvodu se nabízí tepelně modifikované dřevo jako možnost pro výrobu dřevěné střešní krytiny.

3 Cíl

Cílem této práce je vyhodnotit a následně porovnat vybrané vlastnosti nemodifikovaného a tepelně modifikovaného dřeva modřínu opadavého (*Larix decidua*) a smrku ztepilého (*Picea abies*) v závislosti na vhodnosti použití pro výrobu dřevěné střešní krytiny - šindele. V teoretické části práce je cílem získat a shrnout poznatky z experimentů a vědeckých prací autorů zabývajících se tematikou tepelně modifikovaného dřeva, působení dřevokazných hub a materiálovými vlastnostmi smrkového a modřínového dřeva, potažmo dřevěného smrkového a modřínového šindele. Zvláště pak je cílem zaměřit se na poznatky z mechanických vlastností zmíněných dřevěných materiálů a odolnosti těchto materiálů vůči působení dřevokazné houby.

Praktická část je následně zaměřena na zkoumání a srovnání vybraných mechanických vlastností a odolnosti vůči hnilobě u dřeva smrku, modřínu, tepelně modifikovaného smrku a tepelně modifikovaného modřínu. Cílem praktické části je vyhodnotit získané informace kvantitativně a kvalitativně a určit nejvhodnější materiál pro výrobu a užití dřevěného šindele, z pohledu vybraných materiálových mechanických vlastností (pevnost v tlaku v tangenciálním směru, pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu) a odolnosti vůči rozkladu dřevokaznou houbou.

Literární přehled

4 Tepelně modifikované dřevo

Úprava dřeva teplem je již dlouhodobě používaná technologie ke zlepšení některých vlastností dřeva. Na počátku dvacátého století byly provedeny první experimenty, při kterých bylo vysušené dřevo vystavováno vlivu přehřáté páry. (Bezděk, 2012)

V nedávných desetiletích se vývoj v oblasti tepelného zpracování dřeva výrazně zrychlil. Během 80tých let dvacátého století se například japonský a francouzský průmysl orientoval na zpracování dřeva za účelem zvýšení odolnosti proti mikrobiálnímu napadení. Od té doby se zájem o tepelné ošetření dřeva zvýšil po celém světě. Důvodem k použití tepelné modifikace je mimo jiné rostoucí poptávka po dřevěných materiálech šetrných k životnímu prostředí a s vysokou trvanlivostí, tedy zvýšení životnosti dřevěných materiálů bez použití toxických chemikálií. Vzhledem k tomu, že tepelné zpracování nevyžaduje fyzickou impregnaci dřeva, může být tento proces použit na druhy dřev, které jsou hůře impregnovatelné konzervačními látkami, jako je smrk ztepilý (*Picea abies* L.) (Sandberg, Navi 2011) nebo modřín opadavý (*Larix decidua* Mill.) (Vodrážka, 2011)

Účelem tepelné modifikace dřeva je dosažení změn v chemické struktuře dřeva, které vedou ke zvýšení rozměrové stability a s tím spojené snížení hygroskopicity a zlepšení resistance proti biotickým škůdcům. Tepelná úprava probíhá v teplotním rozsahu od 180 do 260 °C. Při teplotách nižších (méně než 140 °C) dochází pouze k nepatrným změnám v materiálových vlastnostech dřeva. Naproti tomu při překročení hranice 300 °C dochází ke značnému snížení pevnostních vlastností dřevěného materiálu a mluvíme již o teplotní degradaci dřeva. Moderní procesy tepelné úpravy dřeva jsou omezeny maximální teplotou 260 °C. (Hill, 2006)

Podle Hill (2006) dochází k výrazným změnám v makromolekulární struktuře dřeva při teplotě 180 °C a vyšší, kdy se mění některé složky dřeva. Rozsah těchto změn závisí na metodě tepelné úpravy. Výsledek tepelné modifikace je ovlivněn výší teploty a časem, po který je dřevo vystaveno vysoké teplotě a případně tlaku. Prováděné tepelné modifikace se rozlišují podle tlaku na prováděné za normálního atmosférického tlaku (přičemž je přítomen kyslík) a prováděné v inertní atmosféře či ve vakuu.

Pro takto tepelně modifikované produkty vznikly v komerční sféře po celém světě různé názvy, jako jsou například Stabwood v USA, Lignofol v Německu nebo Thermowood ve Finsku (Sandberg, Navi 2011).

4.1 Vliv teploty a tepelná degradace dřeva

Dřevo vystavené zvýšeným teplotám prochází procesem tepelné degradace a stupeň degradace je vysoce závislý na teplotě, době expozice, tlaku během procesu, vlhkosti (Sandberg, Navi 2011).

Během postupného zahřívání dřeva nad 100 °C dochází k uvolňování vody volné a prchavých extraktivních látek v buněčných stěnách. Dalším zahříváním nad 140 °C dochází k narušení vedlejších polymerních řetězců. Tímto narušením vzniká kyselina octová, kyselina mravenčí či metanol a rovněž při teplotách nad 140 °C začínají probíhat dehydratační reakce, při kterých se snižuje počet hydroxylových –OH skupin. Při dalším postupném zvyšování teploty se uvolňuje oxid uhličitý. (Hill, 2006). Rozsah popsanych reakcí roste s dalším zvyšováním teploty. První známky exotermických reakcí se začínají projevovat okolo 200 °C. Tyto exotermické reakce jsou spojeny s degradací polymerů buněčných stěn dřeva. Po dosažení teploty 270 °C a vyšší, mají exotermní charakter všechny reakce, což se projevuje významně v reakční kinetice (Hill, 2006).

Podle Horáčka (2001) se v teplotním rozmezí 170–240 °C již rozkládají hemicelulózy a jsou tak nejméně odolnou složkou dřeva vůči působení vysokých teplot. Stupeň degradace hemicelulóz roste v závislosti na teplotě a času expozice dřeva ve vysoké teplotě. Fengel a Wegener (1989) uvádějí, že polymery hemicelulózy jsou depolymerizovány nejprve na monosacharidy a oligosacharidy, jež se dále štěpí na pentosany (furfural) a hexosany (hydroxymetyl furfural). Pentosany a hexosany jsou méně hygroskopické, přičemž pentosany, které jsou více zastoupeny v hemicelulózách tvrdých dřevin, podléhají tepelné degradaci více než hexosany.

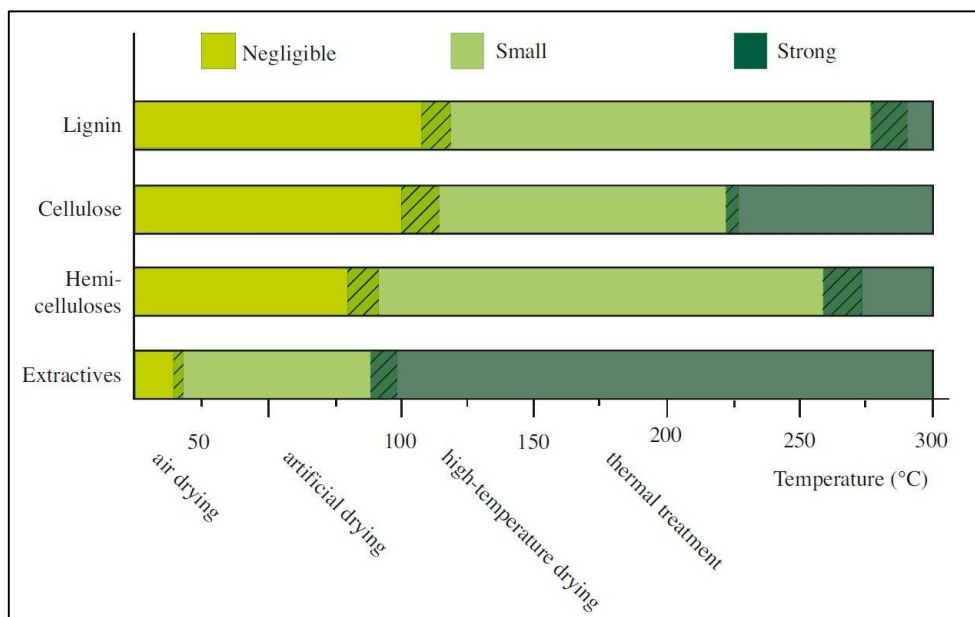
Významným faktorem ovlivňujícím tepelnou degradaci hemicelulózy je přítomnost acetylových skupin, které jsou teplotně nestabilní a tvoří kyselinu octovou, která coby katalyzátor urychluje rozklad polysacharidů. Shimizu et al. (1972) uvádí, že redukcí acetylových skupin v hemicelulóze se zvýší její tepelná stabilita. Degradace hemicelulózy zvyšuje podíl polysacharidové krystalinity ve dřevě.

Celulóza je naproti hemicelulóze odolnější vůči vysokým teplotám. Do teploty 250 °C je termický rozklad celulózy jen velmi mírný. Intenzivní rozklad nastává až při teplotách v rozmezí 250–350 °C (Horáček, 2001). Je pravděpodobné, že k degradaci celulózy začíná docházet již při relativně nízkých teplotách (do 200 °C), ale její rozsah je v porovnání s rozkladem hemicelulózy nepatrný. Jak uvádí Hill (2006), k tepelné degradaci je náchylnější amorfnní část celulózy, která má podobné teplotní vlastnosti jako hemicelulóza s vyšším podílem hexosanů. Podle Kim et al. (2001) je degradována krystalická část celulózy nejintenzivněji v teplotním rozsahu 300–400 °C. Stupeň degradace celulózy snižuje přítomnost vody vázané, která zvyšuje schopnost přeměny amorfnní celulózy na krystalickou (Fengel, Wegener, 1989).

Během tepelné úpravy prováděné ve vzdušném prostředí dochází k produkci karbonylových a karboxylových skupin a přechodného peroxidu vodíku vlivem oxidace hydroxylových –OH skupin. Zahříváním dřeva po delší dobu má za následek zvýšení počtu karbonylových skupin a postupné snižování skupin karboxylových. Při teplotě okolo 300 °C dochází ke změně v reakční kinetice a celulóza je pyrolyticky rozkládána (Bezděk, 2012).

Degradace ligninu vlivem působení vysokých teplot se uskutečňuje v teplotním intervalu 300–400 °C (Horáček, 2001). Lignin je nejméně reaktivní složkou dřeva, nicméně při teplotách nad 200 °C jsou vazby uvnitř ligninu štěpeny, což má za následek vyšší koncentraci fenolových skupin (Kollman, Fengel 1965).

K částečné, velmi mírné degradaci ligninu dochází při nižších teplotách, při kterých již vznikají fenolické látky. Během zahřívání v intervalu 50–200 °C probíhají podobně jako u hemicelulózy a celulózy i u ligninu endotermické reakce. Od teploty 220 °C se začínají uplatňovat reakce exotermické. Endotermické reakce mají za následek molekulové přeskupení a změkčení ligninu. Významné reakce spjaté s degradací ligninu začínají probíhat při teplotě 280 °C a vyšších. Dochází k rozštěpení aryl-alkylových etherových skupin a následně metoxylových skupin, které se začínají narušovat až při teplotě 335 °C (Hill, 2006).



Obr. 1: Schématické znázornění změn složek dřeva vlivem teploty, bez ohledu na čas. Zanedbatelné změny (negligible), malé změny (small) a silné změny (strong) jsou znázorněny barevně. Jsou zde také uvedeny některé způsoby sušení: přirozené sušení (air drying), nucené sušení (artificial drying), vysokoteplotní sušení (high temperature drying) a tepelná modifikace (thermal treatment) (Sandberg, 2011).

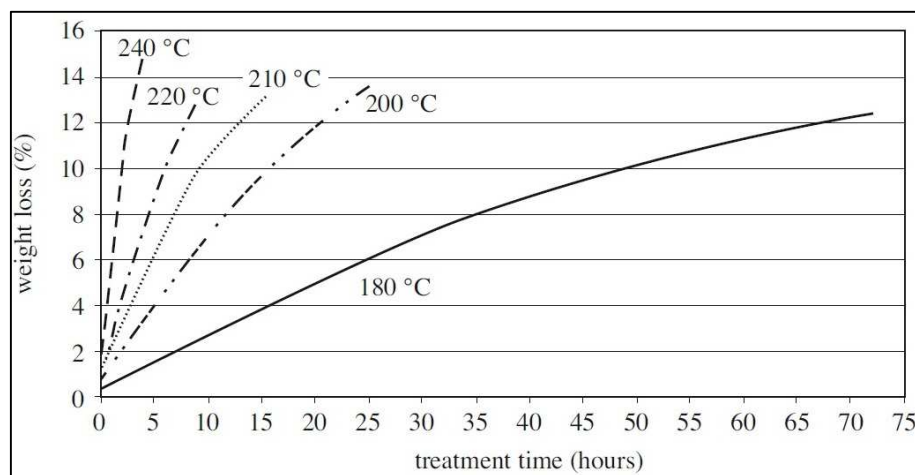
4.2 Vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva

Jak uvádí Hill (2006), vystavením dřeva účinkům vysokých teplot dojde ke změnám v chemické struktuře, které mají za následek změny některých fyzikálních a mechanických vlastností dřeva.

Tepelné ošetření dřeva, jinými slovy zahřívání surového nebo sušeného dřeva na teploty v rozmezí 150–260 °C významně ovlivňují hygroskopicitu, rozměrovou stabilitu, pevnost dřeva, odolnost a rezistenci vůči napadení hnilobou. Rovnovážná vlhkost dřeva je průměrně snížena asi o polovinu hodnoty neupraveného dřeva. Díky nízké rovnovážné vlhkosti dřeva a částečné degradaci složek dřeva je snížena náchylnost k biologickému napadení. Na druhou stranu mechanické pevnostní vlastnosti jsou sníženy také. U některých procesů tepelné úpravy mohou být určité pevnostní vlastnosti sníženy až o 60 %. Znamená to tedy, že tepelně modifikované dřevo jako materiál není vhodné pro použití k nosným účelům (Jämsä, Viitaniemi 2001). Podle Sandberg a Navi (2011) snížená hygroskopicita, zvýšená rozměrová stabilita a zvýšená odolnost vůči hnilobě tepelně ošetřeného dřeva je způsobena rozkladem velké části hemicelulóz v buněčné stěně.

4.2.1 Hmotnostní úbytek

Úbytek hmotnosti dřeva je jednou z nejdůležitějších vlastností při tepelné modifikaci a je běžně označován jako indikátor kvality. Několik autorů studovalo tento jev a bylo dospěno k závěru, že tento úbytek závisí na druhu dřeva, topném médiu a době procesu. Obr. 2 dle Welzbacher (2007) ukazuje úbytek hmotnosti smrku zteplého (*Picea abies* (L.)) v závislosti na čase zahřívání při daných teplotách.



Obr. 2: Graf hmotnostního úbytku v % (weight loss) smrku zteplého (*Picea abies* (L.)) v závislosti na teplotě a době tepelné úpravy v hodinách (treatment time) v otevřeném systému (Welzbacher et al., 2007).

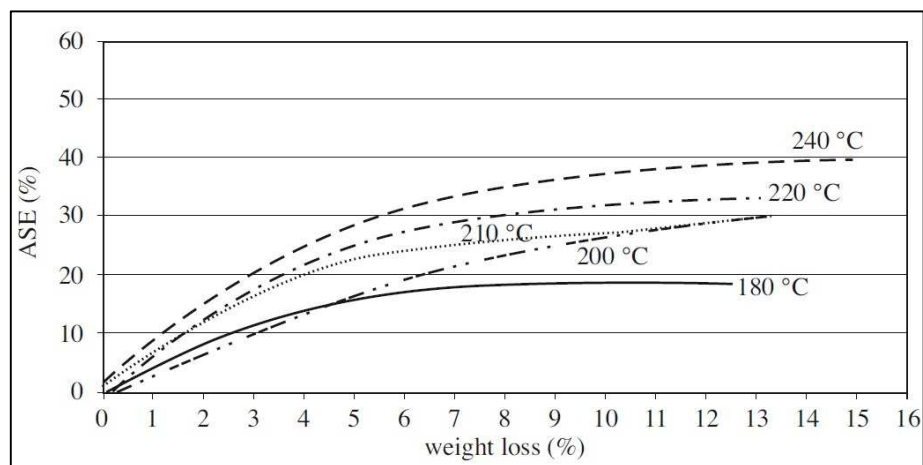
Zvýšení teploty vede k významně většímu úbytku hmotnosti, což je cenný a spolehlivý parametr pro určení intenzity tepelné modifikace. Intenzita tepelné modifikace závisí na teplotě a době tepelné úpravy. Bylo zjištěno, že teplota má značně větší vliv než doba zahřívání. Pokles hmotnosti dřeva o 12,5 % se dosáhne při působení 240 °C po 3 hodinách, přičemž stejného úbytku se dosáhne při 220 °C po 8 hodinách, při 210 °C po 14 hodinách nebo při 200 °C po 20 hodinách tepelné úpravy (Welzbacher et al., 2007).

4.2.2 Hygroskopicit a rozměrová stabilita

Obecně platí, že při většině sušících procesů (a to i při mírných teplotách) je snížena schopnost dřeva vstřebávat vlhkost ze vzduchu (hygroskopicit dřeva). Nicméně tento efekt může být odstraněn po nasycení dřeva vodou. Tepelná úprava byla stanovena jako metoda, při které je hygroskopicit dřeva podstatně redukována (Kollmann, Fengel 1965). Dle Sandberg a Navi (2011) je se snížením hygroskopicity úzce spojeno zvýšení rozměrové stability.

Z důvodu rozkladu hygroskopických hemicelulosových polymerů v průběhu tepelného zpracování na deriváty jež mají slabou hygroskopicitu (viz. odst. 4.1.) se rovnovážná vlhkost dřeva (RVD) snižuje (ve většině případů o 50 %) a zvyšuje se rozměrová stabilita, ačkoliv původně bylo myšleno, že rozměrová stabilita dřeva je zapříčiněna přítomností sítí celulózových řetězců (Sandberg, Navi, 2011). Hemicelulóza, jakožto citlivý polymer na teplo, podléhá při tepelném ošetření dehydrataci spojené se ztrátou mnoha hydroxylových skupin a výsledkem je tepelně modifikované dřevo s nízkou afinitou k vodě s dobrou rozměrovou stabilitou (Weiland, Guyonet, 2003).

Welzbacher et al.. (2007) zkoumali vliv teploty tepelného ošetření a různé doby tepelné modifikace na vybraných biologických, mechanických, optických a fyzikálních vlastnostech smrku ztepilého (*Picea abies* (L.)). Koeficient bobtnání, jakožto míra pro zvýšení rozměrové stability tepelně modifikovaných vzorků, ukázal silnou závislost mezi úbytkem hmoty a teplotou, což dokládá Obr. 3. Nejvyšší hodnoty, přibližně 40 %, bylo dosaženo při působení teploty 240 °C, přitom hmotnostní úbytek byl vyšší než 12 %. Stejný úbytek hmotnosti byl dosažen i při nižších teplotách, ale účinek byl nižší. Obecně tedy platí, že při zvyšující se teplotě je zvyšována také schopnost dřeva nebobtnat.



Obr. 3: Graf závislosti koeficientu bobtnání v % (ASE) na teplotě vzhledem k hmotnostnímu úbytku v % (weight loss) smrku ztepilého (*Picea abies*) při tepelné úpravě v otevřeném systému (Welzbacher et al., 2007).

Dvinskikh a kol. (2011) hodnotili kinetiku absorpce vody v dřevěném obkladovém materiálu přenosným NMR spektrometrem. Zjistili, že absorpce vody ve vzorcích ze smrkového dřeva tepelně modifikovaných je velmi rozdílná oproti vzorkům neupraveného smrkového dřeva. Na tepelně upravených vzorcích byla zjištěna vysoká vlhkost dřeva pouze do 1 mm hloubky pod povrchem, ale hlouběji jak 1 mm byl zaznamenán jen mírný nárůst vlhkosti. Pro neupravovaný smrkový materiál byl zjištěn zvýšený obsah vlhkosti hlouběji pod povrchem. Z toho vyplývá, že propustnost tepelně ošetřeného dřeva je nižší, než u neupravovaného.

4.2.3 Mechanické vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva

Jak již bylo zmíněno, modifikace dřeva teplem ovlivňuje mechanické vlastnosti dřeva. Pevnost a tuhost dřeva klesá, když je dřevo zahříváno a zvyšuje se, když je ochlazováno. Pokud je dřevo zahříváno po krátkou dobu, je účinek tepla okamžitý a vratný. K nevratnému (permanentnímu) snížení pevnosti a tuhosti může dojít v případě vystavení zvýšené teplotě v prodloužené době. Tyto nevratné změny fyzikálních a mechanických vlastností dřeva jsou obecně přičítány degradaci dřevní hmoty. Trvalé účinky jsou takové, které přetrvávají i po ochlazení dřeva na normální teplotu a jsou funkcí doby trvání expozice při určité teplotě, jakož i na teplotě samotné (Sandberg, Navi 2011).

Jak uvádí Sandberg a Navi (2011), pevnostní vlastnosti jsou omezeny a způsobem selhání při mechanických zkouškách tepelně ošetřeného dřeva je vždy křehkost. Z tohoto důvodu se tepelně ošetřené dřevo nikdy nesmí používat jako nosný prvek. Pevnostní vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva jsou způsobeny v důsledku degradace matice buněčné stěny hemicelulóz.

Rapp a Sailer (2001) tepelně upravovali dřevo borovice a smrku teplotami v rozmezí 180–220 °C po dobu různých časů v prostředích se vzduchem a v oleji, přičemž stanovili modul pevnosti (MOR) a modul pružnosti (MOE) v ohybu tříbodovou ohybovou zkouškou. Nejvyššího výsledku MOE bylo dosaženo 11 000 N/mm² v olejovém prostředí. V obou prostředích (vzduchovém a olejovém) nedošlo k poklesu MOE. Nicméně v olejovém prostředí se snížil modul pevnosti (MOR) o 30 %. Krom toho snížení pevnosti v ohybu mělo za následek, že se dřevo stalo křehkým.

Ve srovnání s kontrolními vzorky dřevo ošetřované v olejovém prostředí ztratilo okolo 50 % rázové pevnosti a přes 70 % rázové pevnosti ztratilo dřevo při tepelné úpravě ve vzduchovém prostředí

Yildiz et al. (2006) ve své studii zkoumali vliv tepelné modifikace smrkového dřeva (*Picea orientalis*) na pevnost v tlaku. Tepelná modifikace byla na zkušebních vzorcích aplikována v zařízení pro tepelnou úpravu dřeva při čtyřech různých teplotách (130, 150, 180 a 200 °C) a to pro tři různé délky trvání (2, 6 a 10 hodin) za atmosférického tlaku. Výsledky ukázaly, že se stoupající teplotou a dobou trvání tepelné modifikace vykazovaly hodnoty pevnosti v tlaku pokles.

4.2.4 Odolnost vůči hnilobě

Tepelná modifikace dřeva je alternativou k dalším ochranným systémům dřeva, které mají za cíl zasahovat do metabolismu dřevokazných hub. To, že tepelná úprava zlepšuje odolnost vůči dřevokazným houbám bylo prokázáno například ve studiích Rapp a Sailer (2001) nebo Welzbacher a kol. (2007). Odolnost tepelně modifikovaného dřeva vůči rozkladu dřeva hnilobou je dána pravděpodobně v důsledku ztráty hemicelulózových polymerů z buněčné stěny. Jak už bylo uvedeno výše, obecně platí, že čím větší je úbytek hmotnosti při úpravě dřeva vysokou teplotou, tím je větší trvanlivost upraveného dřeva. Snížení bobtnání o 40 % nemá při testu odolnosti vůči rozkladu žádný vliv a v Tab. 1 od Stamm et al. (1946) je tento jev prokázán.

Tab. 1: Tabulka vztahu mezi redukcí bobtnání a odolností vůči tlení u tepelně modifikovaného dřeva borovice (*Pinus*) při použití houby outkovky řadové (Stamm et al., 1946).

| Redukce bobtnání (%) | Úbytek hmotnosti kvůli působení houby (%) |
|-----------------------------|--|
| Neošetřený kontrolní vzorek | 28,4 % |
| 30 – 33 % | 12,5 % |
| 33 – 38 % | < 4,5 % |
| 40 % a víc | 0 % |

Tyto výsledky naznačují, že chemické látky vzniklé ve dřevě po tepelné modifikaci narušují enzymatické systémy houby podílející se na rozkladu dřeva a proto je pozorováno zlepšení trvanlivosti u tepelně upraveného dřeva. Tato pozorování

ve zlepšení trvanlivosti jsou ve shodě se skutečností pouze pokud bylo dosaženo dostatečné úrovně modifikace.

V Tab. 2 poukazují Rapp a Sailer (2001) na odolnost tepelně modifikovaného dřeva borovice lesní (*Pinus sylvestris* (L.)) a smrku ztepilého (*Picea abies* (L.)) ošetřovaných v olejovém a vzduchovém prostředí při třech různých teplotách. Takto ošetřené vzorky byly vystaveny působení houby poprašky sklepní (*Coniophora puteana*) po dobu 19 týdnů dle normy EN 113 (1996). Získané data ukazují, že efektivnější je ošetření dřeva v olejovém prostředí než ve vzduchovém. To může být vysvětleno přítomností zbytků oleje na vzorcích.

Tab. 2: Úbytek hmotnosti v % po působení houby *coniophory puteana* po dobu 19 týdnů, dle normy EN 113 (1996) u tepelně upraveného dřeva borovice lesní (*Pinus sylvestris*) a smrku ztepilého (*Picea abies*) v kapalném prostředí a vzduchovém prostředí (Rapp, Sailer 2001).

| Teplota při tepelné úpravě vzorku | Kapalné prostředí | | Vzdušné prostředí | |
|-----------------------------------|-------------------|--------|-------------------|--------|
| | Borovice | Smrk | Borovice | Smrk |
| Neošetřený kontrolní vzorek | 40 % | 48 % | – | – |
| 180 °C | 13 % | 15 % | 25,0 % | 31,2 % |
| 200 °C | 1,9 % | 13,1 % | 15,8 % | 26,7 % |
| 220 °C | 2,0 % | 0,0 % | 11,0 % | 5,5 % |

4.2.5 Odolnost vůči povětrnostním vlivům

Jak už bylo zmíněno v článku 4.2.2 rovnovážná vlhkost dřeva (RVD) se sníží u tepelně upravených dřevěných vzorcích až o 50 % oproti nemodifikovaným vzorkům. Díky tomu je pracování dřeva (bobtnání a sesychání) významně redukováno a proto může být tepelně upravený dřevěný materiál, vzhledem ke své odolnosti a rozměrové stálosti, vhodný při vystavení povětrnostním vlivům. Tyto vlastnosti však nejsou jediné z hlediska chování tepelně modifikovaného dřeva vystaveného povětrnostním vlivům (Sandberg, Navi, 2011).

Podle Feist a Sell (1987) tepelná modifikace dřeva smrku ztepilého (*Picea abies*) vede ke snížení eroze během umělého zrychleného zvětrávání. Dále také jejich studie naznačuje, že nízká RVD může snížit náchylnost k fotodegradaci. Zvýšená odolnost proti povětrnostním vlivům může být dána také částečně díky zvýšené hydrofobizaci, která by mohla omezovat vyplavování fotodegradovaného ligninu a hemicelulóz

z povrchu dřeva. Nicméně jak uvádí Jämsä (2001) zbarvení upraveného dřeva mizí poměrně rychle, když je dřevo vystaveno ve venkovním prostředí, což naznačuje fotodegradaci a ztrátu ligninu na exponovaném dřevěném povrchu. Tepelně upravený smrk (*Picea*) byl oproti neupravenému dřevu také méně citlivý na houby bílého tlení.

V literatuře existují nesrovnalosti, zda tepelná úprava snižuje náchylnost dřeva na povrchové trhliny při vystavení povětrnostním vlivům. Vernois (2001) uvádí, že praskání je sníženo oproti neošetřenému dřevu v důsledku snížení pracování dřeva tepelnou úpravou. Naproti tomu Jämsä a kol. (2001) zjistili, že povrchy tepelně ošetřeného smrku (*Picea*) a borovice (*Pinus*) praskaly ve stejném rozsahu jako u nemodifikovaného dřeva, když byly vystaveny venku. Nicméně dle Sandberg (2011) se ukázalo, že tendence dřeva k praskání při zvětrávání úzce souvisí s roční orientací letokruhů v průřezu. Při použití dřeva venku by měl být exponovaný povrch dřeva orientován tak, aby letokruhy byly kolmo k tomuto povrchu. Tím se zabrání vzniku prasklin. Tento fakt je pravděpodobně hlavním důvodem rozporu v literatuře, zda tepelná modifikace snižuje praskání při vystavení povětrnostním vlivům, či nikoliv.

Feist a Sell (1987) zjistili, že na smrkových vzorcích upravených teplem a vystavených povětrnosti po dobu 14 měsíců bylo mnohem více zrnitých částic a prasklinek oproti nemodifikovanému smrku (*Picea*). Povrch vzorků tepelně upraveného smrku byl drsnější než u neupraveného smrku. Nicméně Jämsä a kol. (2001) došli k závěru, že pokud je dřevo tepelně modifikováno, není potřeba další povrchové ochranné impregnace.

Tepelně upravené dřevo obsahuje zbytkovou kyselinu octovou. Proto je důležité, aby upevnění tohoto materiálu vystaveného povětrnosti bylo pomocí pouze prvků z nerezové oceli. Výsledky ze studie Jermera a Anderssona (2005) ukazují, že koroze spojovacích prostředků použitých k fixaci tepelně upraveného dřeva byla vážnější, než při fixaci neupraveného dřeva. Měkká ocel a pozinkované oceli jsou nejcitlivější, naopak nerezová ocel nekorodovala téměř vůbec.

5 Vlastnosti modřínového dřeva

Modřín (*Larix sp.*) je dobrá surovina a to zejména v dřevařském průmyslu. Z hlediska tohoto průmyslového odvětví jsou obdivuhodnými vlastnostmi například pevnost, dobrá odolnost vůči hnilobě, krásná struktura letokruhů. Nicméně na druhou stranu je sušení modřínu často obtížné a mohou se při procesu sušení vyskytnout vady. (Curnel a kol., 2008)

Různé studie prokázaly, že rozdílná odolnost jedinců modřínu závisí na množství Taxifolinu (flavonoid) a celkové koncentraci fenolu. Tyto látky pozitivně korelují odolnost, zatímco hustota a adsorpční vlastnosti nikoliv (Heikkonen et al., 2007).

5.1 Odolnost dřeva modřínu (*Larix sp.*)

Předpokládá se, že dřevo modřínu je odolné vůči hnilobě, což je hlavní důvod, proč je toto dřevo stále více doporučováno pro použití ve venkovním prostředí. V současnosti je toto dřevo doporučováno i z hlediska životního prostředí, neboť se stále hledají náhrady chemického ošetření dřeva použitého ve venkovním prostředí. Přirozeně odolné druhy jsou jednou z možností náhrady pro použití v méně náročných a poměrně snadno opravitelných venkovních konstrukcích. (Curnel a kol., 2008)

V průběhu několika posledních desetiletí byl modřín zkoumán při použití v náročném prostředí při kontaktu se zemí. Nicméně, v evropských normách je jádrové dřevo sibiřského modřínu hodnoceno jako trvanlivé – středně trvanlivé (třídy 3–4) (např. dle Finnforest Thermowood, 2003). Tyto trvanlivostní třídy jsou určeny pro venkovní použití nad zemí. Rozdíly v odolnosti vůči rozkladu houbou modřínového dřeva jsou známy jako významné.

Modřín a zejména modřín opadavý (*Larix decidua*) má tradičně dobrou pověst v Alpách, jakožto zdroj stavebního materiálu. Tato pověst je založena na jeho vynikajících mechanických vlastnostech v kombinaci s dobrou přirozenou odolností. Vedle kvality dřeva samotného je zřejmé, že životnost těchto konstrukcí také závisí na vysoké stavební odbornosti. Avšak z řady studií vyplývá, že vlastnosti modřínového dřeva jsou velmi variabilní v závislosti na místě výskytu, druhu stromu, genetickém původu a stáří stromu (Curnel a kol., 2008).

Jádrové dřevo modřínu bylo ve studii Curnela a kol. (2008) zabývající se odolností modřínu průměrně klasifikováno jako "mírně odolné" (třída 3) na stupnici od třídy 1 (velmi odolné) po třídu 5 (neodolné) v souladu s evropskou normou EN 350-1. Ačkoliv bylo obtížné oddělit původ vzorků z hlediska genetiky od původu vzorků z hlediska ekologických změn, zdá se, že genetik hraje významnou roli při odolnosti vůči hnilobě. Další velkou roli v odolnosti modřínu hraje místo růstu modřínu. Vzorky získané ze starých stromů (více než 180 let) rostoucích v přirozeném prostředí prokazovaly větší odolnost než vzorky stejného druhu rostoucí v lesních školkách.

Obecně odolnost dřeva je omezena na jádrové dřevo stromu, vnitřní části stromu s nižším obsahem vlhkosti, často tmavší barvou a se sníženou propustností. Tkáň jádrového dřeva neobsahuje živé buňky a zásobní materiály, byly odstraněny, nebo přeměněny na extrakty jádrového dřeva. Tyto látky (extrakty) jádrového dřeva se skládají z heterogenních skupin chemických sloučenin jako jsou terpenoidy, flavonoidy a další aromatické sloučeniny. Některé druhy jádrového dřeva mohou obsahovat extraktivní látky s nízkou toxicitou, které interagují synergicky s aktivitou houby zároveň jsou výbornými lapači volných radikálů. Tato hypotéza je podpořena i pozorováním použití s největší pravděpodobností volných radikálů hub hnědého a bílého tlení na počáteční rozrušení buněčné stěny. U modřínu (*Larix sp.*) se vyskytuje velké množství (až 30 %) arabinogalaktanu, silně rozvětveného polysacharidu nacházejícího se v buněčných stěnách. Arabinogalaktan lze snadno odstranit vodou a může být metabolizován houbami, nicméně posiluje proces útlumu působení houby. Dále bylo vysledováno, že pryskyřičné kyseliny se vyskytují pouze v malých množstvích (0,1 %) a flavonoidy (do 3,5 %). Obecně platí, že podle barvy jádrového dřeva v interakci se světlem můžeme předurčit přítomnost, či nepřítomnost extraktů. V důsledku toho je možné pozorovat vztah mezi barvou jádrového dřeva, množstvím extraktů a odolnosti vůči hnilobě (Gierlinger, 2003).

5.2 Hustota a mechanické vlastnosti

Při porovnání mechanických vlastností modřínového dřeva a jiných druhů dřev, zejména jehličnatých stromů, dřevo modřínu má vysokou hustotu, střední tvrdost a jeho pevnost je relativně vysoká. Hustota dřeva má hlavní vliv na mechanické vlastnosti modřínového dřeva. Čím je dřevo hustější, tím je pevnější (Koizumi et al. 2003). Některé mechanické vlastnosti modřínu sibiřského jsou uvedeny v Tab. 3 ve srovnání s vlastnostmi vybraných dalších dřev.

Tab. 3: Některé mechanické vlastnosti dřeva modřínu sibiřského, smrku ztepilého a břízy bělokoré. Některé hodnoty u modřínu jsou uvedeny pro zralé dřevo¹⁾, některé pro juvenilní dřevo²⁾. Hodnoty tvrdosti jsou dle Janka (Ja) nebo Brinella (Br) (Heikkonen, 2007)

| Druh | Objemová hmotnost | Modul pružnosti | Ohybová pevnost | Tlaková pevnost | Tvrdost | Smyková pevnost |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|---|---------------------|---------------------------------|---------------------|
| | <i>Kg/m³</i> | <i>GPa</i> | <i>MPa</i> | <i>MPa</i> | <i>MPa</i> | <i>MPa</i> |
| <i>Modřín</i> | 490–560 ¹⁾ | 12,7–13,1 ²⁾ | 96–101 ¹⁾ 84–91 ²⁾ | 47–61 ¹⁾ | 26,4–34,5 ²⁾ (Ja) | 10–12 ²⁾ |
| <i>Borovice</i> | 401–438 | 12,7 | 86 | 48 | 24,4 (Br) | 11 |
| <i>Smrk</i> | 354–417 | 13,7 | 86 | 45 | 20,9 (Br) | 5,3 |
| <i>Bříza</i> | 480 | 15,1 | 114 | 54 | 23,4 (Br) | 13 |

Lze pozorovat, že u modřínu sibiřského (*Larix siberica*) je významná variabilita v hustotě dřeva, zejména mezi juvenilním a zralým dřevem a mezi původy dřeva (Koizumi et al. 2003). Kromě toho v souladu s Kärkkäinen (1978), hustota je spojena s věkem a největší hustoty je dosaženo při 40–60 letokruhů. Hakkila a Winter (1973) také zjistili, že věk je nejlepší parametr, jak vysvětlit změny v hustotě mezi kmeny – starší strom znamená větší hustota. Obecná hustota modřínu sibiřského byla pozorována 476 kg/m³ při věku 60 let a 539 kg/m³ při věku 100 let. Hustotu ovlivňuje přítomnost arabinogalaktanu, který se nachází v tracheidách modřínu. Při měření takto vyplněných tracheid bylo pozorováno jasné zlepšení pevnosti v tlaku kolmo na vlákna a Youngův modul pružnosti modřínového dřeva (Grabner et al., 2005).

6 Vlastnosti smrkového dřeva

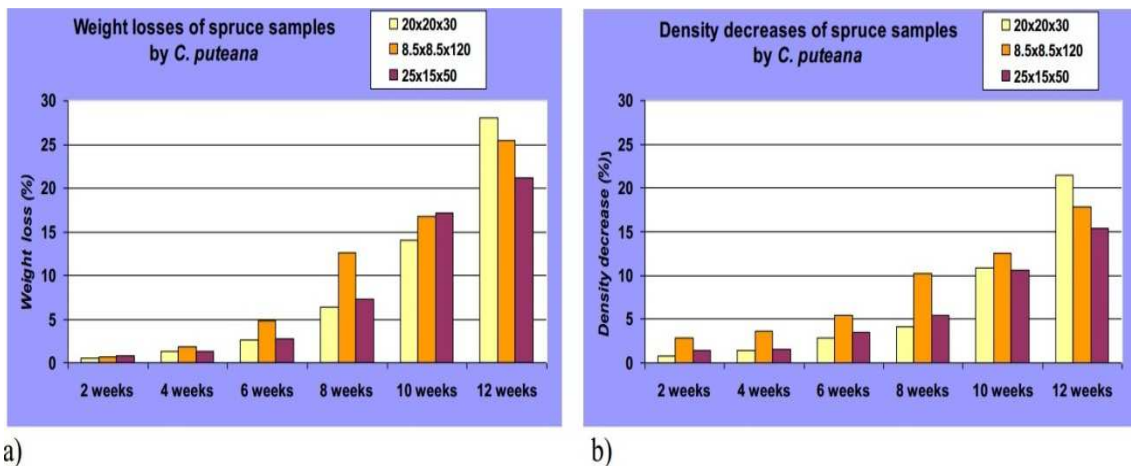
V našich lesích má smrk ztepilý (*Picea abies*) největší plošné zastoupení. Smrkové dřevo patří k měkkým a lehkým dřevům. Je méně trvanlivé a odolné proti hmyzu a houbám. Použití smrkového dřeva je mnohostranné. Používá se například jako stavební a konstrukční materiál, v nábytkářství nebo při chemickém zpracování (Celý, 2009).

6.1 Charakteristika smrkového dřeva

Dřevo je biomolekulární sloučenina složená z vláken, která slouží jako vnitřní opěra. Tato opěra má vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva (Martinková et al., 2005). Ve smrkovém dřevě tvoří největší podíl celulóza (45,6 %), hemicelulóza (27,6 %) a lignin (26,9 %). Jádrové dřevo zajišťuje stabilitu kmene svými mechanickými vlastnostmi, trvanlivost a odolnost proti hnilobám (Požgaj et al., 1997). Nicméně dřevo smrku není rozlišeno na jádro a běl, jako je tomu například u modřínu. Toto dřevo nazýváme vyztřelé. Vyztřelé dřevo má nažloutlou barvu s dobře zřetelnými jarními a letními letokruhy. Pryskyřičné kanálky jsou viditelné pouze na svislém řezu. Jak už bylo zmíněno, smrkové dřevo se řadí mezi dřeva měkká a lehká. Jeho průměrná hustota za absolutně suchého stavu je 430 kg/m^3 (Matovič, 1992). Smrky rostoucí v nižších polohách mají měkké dobře štípatelné dřevo, v horských oblastech je tomu naopak (Skalický a Skalická, 1997).

6.2 Odolnost smrkového dřeva

Při výzkumu Reinprechta (2010) byly vysušené vzorky z přes 75 let starého smrku ztepilého (*Picea Abies L.*) vystaveny působení houby hnědého tlení *Coniophory puteana* při teplotě $22 \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti 70–80 % po dobu 2–12 týdnů. Z výsledků a dle klasifikace EN 350-1 vyplývá, že přirozená odolnost smrkového dřeva vůči procesu rozkladu působením houby hnědého tlení je klasifikována jako horší. Vzorky smrku ztepilého (*Picea Abies*) ztratily během 2–12 týdnů na své váze v rozsahu 0,48–28,11 % a hustota vzorků poklesla v rozsahu 0,73–21,48 %. Toto je doloženo na Obr. 4.



Obr. 4: Průměrný hmotnostní úbytek (a) a snížení hustoty (b) smrkových vzorků po působení *Coniophory puteana* po dobu 2,4,6,8,10 a 12 týdnů. (Reinprecht, 2010)

6.3 Mechanické vlastnosti smrkového dřeva

Mechanické vlastnosti smrku ztepilého (*Picea abies*) se liší v závislosti na směru zatížení a na strukturálním složení dřeva jako je přítomnost, či absence jarního či letního dřeva. Dřevo jako takové může být obecně zjednodušeně popsáno jako ortotropní materiál, což znamená rozdílné mechanické vlastnosti v jeho podélném, radiálním a tangenciálním směru (Karinkanta, 2014). Některé pevnostní hodnoty smrkového dřeva jsou uvedeny a srovnány s dalšími druhy dřev v Tab. 3.

6.4 Dřevěný šindel

6.4.1 Modřínový štípaný šindel

Vhodný materiál pro výrobu alpského štípaného modřínového šindele je poměrně složité přesně určit. Šindel musí splňovat určité parametry kvality (např. hustota letokruhů) a proces štípání je odlišný od procesu řezání. Výběr vhodné kulatiny záleží hlavně na vizuálním posouzení výrobce šindele.



Obr. 5: Modřínový štípaný šindel alpský typ
 Výchozím materiálem pro výrobu štípaného modřínového šindele alpského typu je kulatina o minimálním průměru průřezu 30 cm bez kůry. Délka kulatiny nehraje ve výrobě významnou roli, protože je

kulatina krácena na délku šindele (maximální délka je 50 cm). Důležitými parametry materiálu jsou hlavně doba růstu, s tím souvisí hustota letokruhů, sukovitost, výskyt hniloby, točivost, tloušťka bělového dřeva. Optimální doba růstu modřínu je pro výrobu 80 let a více. Minimální hustota letokruhů je 3 letokruhy na 1 cm délky měřené v průměru kulatiny. Sukovitost je při výrobě problémem, neboť na vyrobeném šindelci je pak nepřijatelný výskyt suků a to především v přední viditelné části šindele. Hniloba je nežádoucí v jádrovém dřevě. V oblasti dřevě a bělového dřeva není vadou, neboť tyto části jsou nežádoucí a při výrobě se odstraňují. Z celkového hlediska je přesto výskyt hniloby nevhodný. Nadměrná točivost souvisí s problémem dobré štípatelnosti. Toleruje se točivost 1–2 cm na metr délky kulatiny. Tloušťka bělového dřeva má vliv na využitelnost materiálu, neboť při výrobě šindele je bělové dřevo odstraňováno.

6.4.2 Smrkový štípaný šindel

Smrkový štípaný šindel valašský je prkénko charakteristické tím, že na jedné podélné straně je opatřeno břitem (neboli perem) a na druhé drážkou. (Hájek, 2001) Stejně jako u výběru kulatiny pro výrobu modřínového štípaného šindele je poměrně komplikované jednoznačně určit parametry pro výrobu smrkového štípaného smrkového šindele. Jak již vyplývá z výše uvedeného textu, smrkové dřevo nemá



Obr. 6: Smrkový štípaný šindel valašský typ

rozlišeno jádro a běl. Proto je při zpracování odstraněna pouze borka. Smrk (*Picea sp.*) jako materiál není příliš odolný vůči klimatickým podmínkám a především vodě. Jeho předností je však dobrá opracovatelnost a snadný přístup k tomuto materiálu. Smrk (*Picea sp.*) je na území České republiky nejdůležitější užitkové dřevo. Další jeho vlastností je odolnost vůči biotickým škůdcům. V dnešní době spíše zanedbatelnou nevýhodou je horší impregnovatelnost (ldf.mendelu.cz, 2015). Materiálové vlastnosti jsou pochopitelně přeneseny i na šindel. Dobrá opracovatelnost materiálu zajišťuje snadné vytvoření pera a drážky. Nicméně vzhledem k tomu, že je střešní šindel vystaven silnému vlivu klimatickým podmínkám a smrkový šindel není příliš odolný, musí být smrkový šindel chemicky modifikován tlakovou impregnací, čímž se jeho odolnost zvýší.

7 Materiál a metodika

7.1 Výroba materiálu pro zkušební vzorky

Pro dodržení cíle práce bylo nutné postup při výběru materiálu a výrobě zkušebních vzorků upravit tak, aby konečná zkušební tělíska vyhovovala nejen normám pro zkoušky fyzikálních, mechanických vlastností a normě pro stanovení hranice účinnosti proti dřevokazným houbám, ale také byla potřeba, aby se vzorky co nejvíce materiálově a strukturně podobaly dřevěnému šindele. Z tohoto důvodu byl materiál pro výrobu vzorků vybírán a následně vymanipulován z kulatiny určené pro výrobu modřínového a smrkového šindele, uskladněné ve firmě zabývající se výrobou a montáží dřevěných šindelů. V souvislosti s těmito podmínkami byl výběr a vymanipulování vhodných vzorků značně komplikovaný.

Prvním krokem bylo vymanipulování těles o rozměrech 60 x 30 x 350 mm z modřínové a smrkové kulatiny. Cílem tohoto kroku bylo vymanipulování vad (suky, smolníky, dřeň, běl), lepší manipulace s materiálem a v neposlední řadě výběr vhodných těles splňující podmínky dle norem a vyhovující podmínky pro výrobu šindele štípaného kolmo na letokruhy. Štípané vzorky však nejsou vhodné z hlediska norem pro fyzikální, mechanické a zkoušky odolnosti. Proto byly vyrobeny tělesa charakteru radiálního řeziva. K výrobě modřínového šindele se používá pouze jádrového dřeva, proto modřínové tělesa neobsahují běl.

Při výrobě byl kladen velký důraz na přesné opracování vzorků, z důvodu zachování kolmosti řezných ploch, zamezení spálení povrchu řezných ploch a minimalizování odpadu z prořezu kvůli omezenému množství suroviny. Hranoly se vyráběly v soukromé dílně šindelářské firmy Hlobil. Celkem bylo takto vyrobeno dvacet hranolů z modřínového jádrového dřeva a dvacet hranolů ze smrkového dřeva. Ukázka vzhledu hranolů viz. Obr. 7. Vyrobené hranoly byly klimatizovány po dobu 4 týdnů při pokojové teplotě, čímž vzniklo vzducho-suché hranolové řezivo o vlhkosti 12–15 %.



Obr. 7: Smrkový (výše) a modřínový hranol pro výrobu zkušebních vzorků.

7.2 Výroba zkušebních vzorků

V této fázi bylo nutné rozhodnout, zda budou modifikovány vyrobené hranoly, či následně vyrobené zkušební vzorky. Z důvodu obav z možného poškození vzorků pro ohybové zkoušky bylo rozhodnuto tepelně upravit hranoly a z nich následně vymanipulovat zkušební tělíska.

7.2.1 Modifikace hranolů

Možnosti modifikace dřeva jsou velmi variabilní, proto bylo nutno stanovit takový modifikační postup, který by vhodně reprezentoval technologické možnosti ohledně modifikace dřeva. Rozhodujícími faktory byly teplota a doba působení zvýšené teploty.

Na základě informací získaných během rešerše zpracované v literárním přehledu této diplomové práce byla vypracována tabulka Tab. 4 snažící se vystihnout teplotní a časové parametry při modifikaci dřeva jednotlivými autory.

Tab. 4: Vybrané parametry modifikačních procesů použité vybranými autory při tepelné modifikaci dřeva.

| Autor modifikačního procesu | Teploty používané autorem při modifikaci (°C) | Doba působení zvýšené teploty na vzorky (hod) |
|-----------------------------|---|---|
| Sandberg a Navi (2011) | 150–250 °C | – |
| Hill (2006) | 140–260 °C | – |
| Yildiz et al. (2006) | 130 °C | 2 hod |
| | 150 °C | 6 hod |
| | 180 °C | 8 hod |
| | 200 °C | 10 hod |
| Rapp a Sailer (2001) | 180–220 °C | – |
| Jämsä, Viitaniemi (2001) | 150–260 °C | – |
| Welzbacher et al. (2007) | 200 °C | 20 hod |
| | 210 °C | 14 hod |
| | 220 °C | 8 hod |
| | 240 °C | 3 hod |

Jednotliví autoři rovněž upozorňovali na to, že mnoho vlastností modifikovaného dřeva se výrazně mění při překročení teploty 220 °C. K veškerým těmto okolnostem byl brán ohled při stanovení modifikačních charakteristik využitých v praktické části této práce.

Na základě získaných informací byl zvolen jeden stejný režim tepelné úpravy pro modřínová i smrková tělesa. Hranoly tedy byly tepelně modifikovány při teplotě 200 °C po dobu 3 hodin. Modifikace probíhala v laboratorním zařízení pro tepelnou úpravu dřeva. Při modifikaci byla tělíska do zařízení vložena na kovovém roštu, na němž byla rovnoměrně rozmístěna. Zvláště velký důraz byl kladen na to, aby bylo v laboratorním zařízení neustále doplňováno potřebné množství destilované vody. Vzniklá ochranná parní mlhovina chrání dřevo před vznícením a ovlivňuje chemické změny, ke kterým dochází ve dřevě. Modifikace hranolů proběhla bez problémů. Po užším kvalitativním výběru vhodných těles splňující podmínky uvedené v odst. 7.1. bylo celkem modifikováno pět hranolků z modřínového dřeva a pět ze smrkového dřeva. Po modifikování bylo řezivo pět hodin normalizováno postupným ochlazováním z důvodu prevence před vznikem prasklin z náhlého ochlazení.

7.2.1 Klimatizace hranolů

Po dokončení modifikace zvýšenou teplotou byly veškeré hranolky, včetně těch nemodifikovaných, klimatizovány na vlhkost odpovídající teplotě vzduchu 25 °C a relativní vzdušné vlhkosti 60 % po dobu 20 dnů. Během této doby došlo k ustálení vlhkostní rovnováhy dřeva s okolním prostředím – tzv. rovnovážná vlhkost dřeva. Pro klimatizaci tělísek bylo použito zařízení Klimabox Sanyo MHT. V tomto zařízení byly vzorky rovnoměrně rozprostřeny na kovovém roštu.

7.2.1 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky byly připraveny dle ČSN 49 0013 Dřevo - Fyzikální a mechanické zkoušky - Názvy a definice a ČSN EN 113 Ochranné prostředky na dřevo – Zkušební metody pro stanovení ochranné účinnosti proti dřevokazným houbám Basidiomycetes. Pro přípravu zkušebních tělísek byly použity modifikované i nemodifikované smrkové a modřínové hranoly. Z těchto hranolků byly vymanipulovány zkušební tělíška pro zkoušky pevnostní v tlaku napříč vláken o rozměrech 20x20x30 mm, dále vzorky pro ohybové zkoušky o transponovaných rozměrech 14x14x210 mm a pro zkoušku odolnosti vůči působení houby o rozměrech 15x15x25 mm. Vzorky pro zkoušku odolnosti vůči houbě však byly během prvních dvou pokusů o naočkování houbou poškozeny, z toho důvodu musely být vyrobeny vzorky o transponovaných rozměrech 10x5x30 mm, které byly použity pro platnou zkoušku. Nejdelší rozměry vzorků byly v podélném směru vláken. Během přípravy vzorků bylo dbáno na to, aby byly všechny úhly kolmé, byly vymanipulovány veškeré vady, jako např. suky, smolníky, trhliny a odklon vláken na příčném řezu byl menší než 10 °. Velký důraz byl kladen rovněž na to, aby příčné řezy byly hladké a dřevo na nich nebylo spáleno. Příprava veškerých zkušebních tělísek probíhala v soukromé truhlářské dílně v Miloticích u Bruntálu. Další veškeré měření a modifikace probíhalo v areálu Mendelovy Univerzity v Brně, konkrétně v laboratořích Ústavu nauky o dřevě v Útěchově u Brna.

Při přípravě vzorků z nemodifikovaných hranolků nebyly problémy. Avšak vzorky vyráběné z modifikovaného dřeva bylo obtížné vymanipulovat tak, aby se při obrobení nerozpadly. Vzhledem k informacím získaným v literárním přehledu se modifikovaný dřevěný materiál stal křehčím, zvláště pak nejhorším z hlediska zvýšené křehkosti byl modifikovaný modřín. Z tohoto důvodu nebylo možné použít

všechny vymanipulované vzorky. Bylo nutné vybrat jen ty vzorky, které splňovaly kritéria pro dané zkoušky. Všechny vhodné vzorky byly označeny čísly, změřeny jejich rozměry a zváženy na laboratorních vahách. Hmotnost a rozměry veškerých vzorků byly zaznamenány.

Potom byla všechna tělíska sušena v laboratorní sušárně. Nejprve byla předsušena teplotou 70 °C po dobu 8 hodin. Následně byla teplota v sušárně zvýšena na 103 °C a udržována dokud se hmotnost tělísek neustálila na konstantní hodnotě. Konstantní hmotnost sušících se vzorků je dosažena, když dvě po sobě následující měření v intervalu 2 hodiny prokázala, že se hmotnost sušících vzorků nezměnila o více než 0,01 g. Vzorky tedy byly vysušeny na vlhkost 0 %. Po vysušení byla veškerá zkušební tělíska opět přeměřena elektronickým posuvným měřidlem a zvážena laboratorními vahami. Hodnoty byly zaznamenány.

7.3 Zkouška odolnosti vůči dřevokazné houbě

7.3.1 Zkušební tělesa

Pro tuto zkoušku byla vybrána tělíska ze všech zkoumaných souborů (smrk, modřín, modifikovaný smrk, modifikovaný modřín) po patnácti kusech a o rozměrech 10 ± 1 mm x 5 ± 1 mm x 30 ± 1 mm při vlhkosti 12 %. Odklon vláken těles byl menší než 10 °. Dále bylo použito 15 kusů referenčních vzorků borovice pro srovnání výsledků. Celkem bylo tedy pro tuto zkoušku použito 75 ks zkušebních vzorků.

7.3.2 Houbová kultura a živná půda houby

Pro danou zkoušku odolnosti byla prvně vybrána houba hnědého tlení pórnatka placentová (*Poria placenta*). Avšak z důvodu napadení plísně při prvním a druhém očkování bylo nutné nakonec vybrat jako napadající houbu trámovku trámovou (*Gloeophyllum trabeum*). Živnou půdou pro houbu byl Malt extrakt agar Base m137 se složením: agar (15 g/L), sladový extrakt (30 g/L) a peptan (5 g/L). V 1 L destilované horké vody bylo rozpuštěno 50 g směsi. Po dostatečném rozptýlení roztoku byly přiměřeně naplněny kultivační nádoby, aby vrstva po vychladnutí byla cca 4 mm. Uzavřené nádoby prošly následně sterilizací při 120 °C a 20 min. v autoklávu. Postup přípravy a složení živného podkladu nám udává norma ČSN EN 113.

7.3.3 Pomůcky a zařízení

Zařízení:

- laboratorní sušárna (zařízení přednastavené na 103 °C ± 2 °C)
- elektronické váhy Scaltec (přesnost vážení 0,01 g)
- autokláv (zařízení na sterilizaci parou při teplotě 120 °C)
- sterilní box Polaris (manipulace s houbovými kulturami)
- inkubátor Sanyo Incubator MIR – 153

Pomůcky:

Petriho misky, odměrný válec, baňka s kulatým dnem, plynový kahan, pinzeta, psací fix, skalpel, drátěné mřížky, lžíce, ubrousky.

7.3.4 Příprava před samotnou zkouškou

První fází bylo připravování houbové kultury na Petriho miskách. Z jedné Petriho misky z laboratorní zálohy bylo rozmnoženo mycelium na další Petriho misky. Toto bylo provedeno oddělením pomocí skalpelu dezinfikovaného ohněm z kahanu ve sterilním boxu. Malé housky mycelia byly vloženy do připravených Petriho misek se živnou půdou a 14 dní ponechány v inkubátoru, aby se houba rozrostla.

Další fází byla příprava zkušebních tělísek. Vybrané vzorky o daných rozměrech a číselně označených pro další datové záznamy byly vysušeny při teplotě 103 °C na vlhkost 0 % dle normy ČSN 490 103. Absolutní vlhkost vzorků je vypočtena podle normy ČSN EN 322 dle vzorce:

$$w_{\text{abs}} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

Kde: w_{abs} – vlhkost vzorku [%]

m_w – hmotnost vlhkého vzorku [g]

m_0 – hmotnost absolutně suchého dřeva [g]

Vysušená tělíška byla změřena pomocí digitálního posuvného měřítka a zvážena laboratorními váhami. Vzorky jsou poté sterilizovány teplotou 100 °C po dobu min. 30 minut.

7.3.5 Založení a doba působení houby

Veškerá manipulace je prováděna ve sterilním prostředí boxu Polaris za pomoci dezinfikovaných laboratorních nástrojů. Jednotlivé sterilní vzorky jsou pinzetou vkládány na drátěnou mřížku do nádob s rozrostlou houbou. Mřížka zabraňuje přímému styku houby s tělískem. Nádoby jsou uzavřeny, utěsněny a označeny popisem obsahu nádoby, časem naočkování a datum vyjmutí. Vzorky byly takto ponechány působení houbou po dobu 10 týdnů.

7.3.6 Vyjmutí tělísek

Po uplynutí doby 10 týdnů jsou vzorky vyjmuty z nádob. Je dbáno na šetrné vyjímání bez dalšího poškození. Následuje očištění vzorků od mycelia ubrouskem a zvážení. Poté jsou degradované vzorky vloženy do laboratorní sušárny, kde jsou při teplotě 103 °C ponechány po dobu 7 dní. Po vyjmutí ze sušárny jsou vzorky zváženy kvůli následnému výpočtu hmotnostního úbytku.

7.3.7 Stanovení výsledků zkoušky

Výsledkem zkoušky je zjištění hmotnostního úbytku dřeva a změny vlhkosti vzorku po působení houby.

Úbytek hmotnosti

Úbytek hmotnosti byl změřen po vysušení tělísek na 0 % vlhkosti. Degradace houbou způsobila úbytek dřevní hmoty, jeho velikost se zjistí dle vzorce:

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

Kde: Δm – změna hmotnosti [%]

m_1 – původní hmotnosti při 0 % vlhkosti [g]

m_2 – konečná hmotnost při 0 % vlhkosti [g]

Změna vlhkosti

Absolutní vlhkost veškerých vzorků je vypočtena podle normy ČSN EN 322 dle vzorce:

$$w_{\text{abs}} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

Kde: w_{abs} – vlhkost vzorku [%]

m_w – hmotnost vlhkého vzorku [g]

m_0 – hmotnost absolutně suchého dřeva [g]

7.3.8 Zpracování výsledků

Naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek, vyjádřeny statistickou analýzou a graficky. Pro každou skupinu vzorků byl vyhodnocen počet platných vzorků, střední hodnota, medián, minimální a maximální hodnota, směrodatná odchylka a variační koeficient.

7.4 Zkouška pevnosti v tlaku napříč vláken

7.4.1 Zkušební tělesa

Pro tuto zkoušku byla vybrána tělíska ze všech zkoumaných souborů (smrk, modřín, modifikovaný smrk, modifikovaný modřín) po dvaceti kusech a o rozměrech 20 ± 1 mm x 20 ± 1 mm x 30 ± 1 mm při vlhkosti 12 %. Odklon vláken těles byl menší než 10° . Celkem bylo tedy pro tuto zkoušku použito 80 ks zkušebních vzorků.

7.4.1 Pomůcky a zařízení

Zařízení a pomůcky:

- laboratorní sušárna (zařízení přednastavené na $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$)
- elektronické váhy Scaltec (přesnost vážení 0,01 g)
- univerzální zkušební stroj Zwick/Z050
- digitální posuvné měřítko Mitutoyo (ABS) 50
- psací fix

7.4.2 Stanovení meze pevnosti dřeva

Postup zkoušky pevnosti dřeva v tlaku byl prováděn podle normy ČSN 490 0112. Podstatou této zkoušky bylo u vzorků zjistit velikost statického zatížení a konvenční meze pevnosti v tangenciálním směru, jakožto simulace statického zatížení střešní krytiny – dřevěného šindele. Před zahájením měření byly rozměry všech tělísek změřeny digitálním posuvným měřítkem Mitutoyo (ABS) 50 s přesností na setinu milimetru a zváženy elektronickými váhami. Poté byla zkušební tělíska jednotlivě vložena do univerzálního zkušebního stroje Zwick/Z050, přesně do středu mezi dvě tlačné čelisti. Způsob uložení vzorku byl takový, aby síla vertikálně se pohybující čelisti působila v tangenciálním směru na dřevní vlákna.

V první fázi byl každý zkušební vzorek předzatížen a uchycen čelistmi extenzometru, poté proběhlo samotné zatížení konstantní rychlostí. Průběh zatížení bylo zaznamenáno počítačem pomocí programu testXpert v11.02, zobrazením pracovního diagramu. Mez pevnosti byla vyjádřena v MPa při deformaci 5 %, kvůli zachování homogenosti výsledků. Po zkoušce byly v laboratorní sušárně veškeré vzorky vysušeny na 0 % vlhkosti a následně zváženy.

7.4.3 Zpracování výsledků

Naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek, vyjádřeny statistickou analýzou a graficky. Pro každou skupinu vzorků byl vyhodnocen počet platných vzorků, střední hodnota, medián, minimální a maximální hodnota, směrodatná odchylka a variační koeficient. Dále byla stanovena vlhkost zkušebního vzorku v době zkoušky podle vzorce (1).

7.5 Zkouška ohybové pevnosti a modulu pružnosti

7.5.1 Zkušební tělesa

Pro tuto zkoušku byla vybrána tělíska ze všech zkoumaných souborů (smrk, modřín, modifikovaný smrk, modifikovaný modřín) po dvaceti kusech a o transformovaných rozměrech 14 ± 1 mm x 14 ± 1 mm x 210 ± 1 mm při vlhkosti 12 %. Odklon vláken těles byl menší než 10 °. Celkem bylo tedy pro tuto zkoušku použito 80 ks zkušebních vzorků.

7.5.2 Pomůcky a zařízení

Zařízení a pomůcky:

- laboratorní sušárna (zařízení přednastavené na $103\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$)
- elektronické váhy Scaltec (přesnost vážení 0,01 g)
- univerzální zkušební stroj Zwick/Z050
- digitální posuvné měřítko Mitutoyo (ABS) 50
- psací fix

7.5.3 Stanovení meze pevnosti dřeva

Postup zkoušky pevnosti dřeva v tlaku byl prováděn podle normy ČSN 490 0115. Podstatou této zkoušky bylo u vzorků zjistit hodnoty ohybové meze pevnosti a modulu pružnosti, jakožto simulace zatížení střešní krytiny – dřevěného šindele. Před zahájením měření byly rozměry všech tělísek změřeny digitálním posuvným měřítkem Mitutoyo (ABS) 50 s přesností na setinu milimetru a zváženy elektronickými váhami. Poté byla zkušební tělíska jednotlivě vložena do univerzálního zkušebního stroje Zwick/Z050, na dva podpůrné podstavce pod oběma konci tělíska. Způsob uložení vzorku byl takový, aby síla vertikálně se pohybující čelisti působila přesně uprostřed nejdelšího rozměru tělíska.

V první fázi byl každý zkušební vzorek předzatížen a uchycen čelistmi extenzometru, poté proběhlo samotné zatížení konstantní rychlostí. Průběh zatížení bylo zaznamenáno počítačem pomocí programu testXpert v11.02, zobrazením pracovního diagramu. Hodnoty meze pevnosti a modulu pružnosti byli vyjádřeny v MPa. Po zkoušce byly v laboratorní sušárně veškeré vzorky vysušeny na 0 % vlhkosti a následně zváženy.

7.5.4 Zpracování výsledků

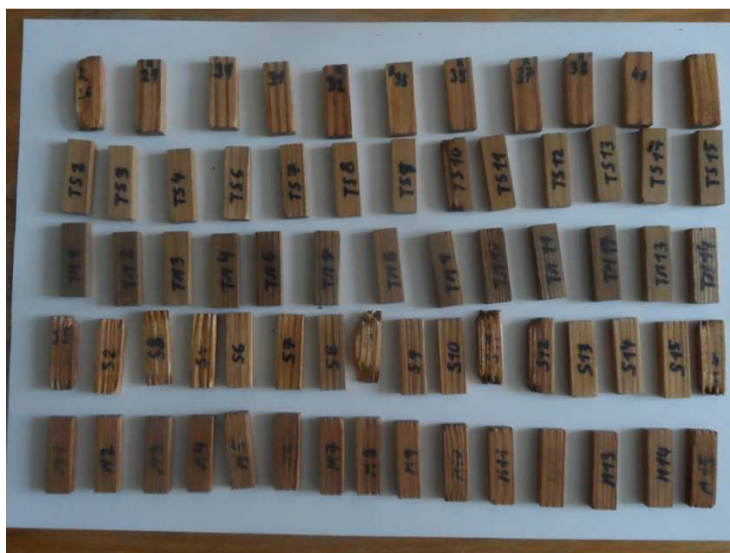
Naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek, vyjádřeny statistickou analýzou a graficky. Pro každou skupinu vzorků byl vyhodnocen počet platných vzorků, střední hodnota, medián, minimální a maximální hodnota, směrodatná odchylka a variační koeficient. Dále byla stanovena vlhkost zkušebního vzorku v době zkoušky podle vzorce (1).

8 Výsledky

8.1 Odolnost vůči dřevokazné houbě

V Tab. 5 je uvedena popisná statistika vlhkostní změny po působení dřevokazné houby trámovky trámové (*Gloeophyllum trabeum*). Vzhledem k tomu, že vzorky měly při očkování houbou vlhkost 0 %, je změna vlhkosti velmi výrazná. Při srovnání průměrných hodnot mezi soubory, největší vlhkostní změny proběhly u referenčního vzorku z borovice, ovšem druhým nejvíce zvlhčeným souborem byl upravený smrk. Nejmenší změna v průměru hodnot vlhkosti byla zaznamenána u neupraveného modřínu a to 85,15 %. Z tohoto pohledu se jeví jako nejlepším materiálem neupravený modřín, ovšem při zkoušce odolnosti vůči houbě je podstatný především hmotnostní úbytek. Oba tyto parametry je nutné brát v úvahu při vyhodnocování výsledků.

Hmotnostní úbytky jednotlivých souborů jsou uvedeny pomocí popisné statistiky v procentech v Tab. 6. Největšího průměrného hmotnostního úbytku v rámci srovnávání mezi soubory bylo dosaženo u neupraveného smrku, což poukazuje na nízkou odolnost vůči dřevokazné houbě. Nejmenšího hmotnostního úbytku bylo dosaženo u upraveného smrku. Při vlhkosti dřeva 163,32 % se hmotnost vzorku snížila vlivem degradování houby o 0,45 %. Výsledky jsou souhrnně graficky znázorněny na Obr. 9.



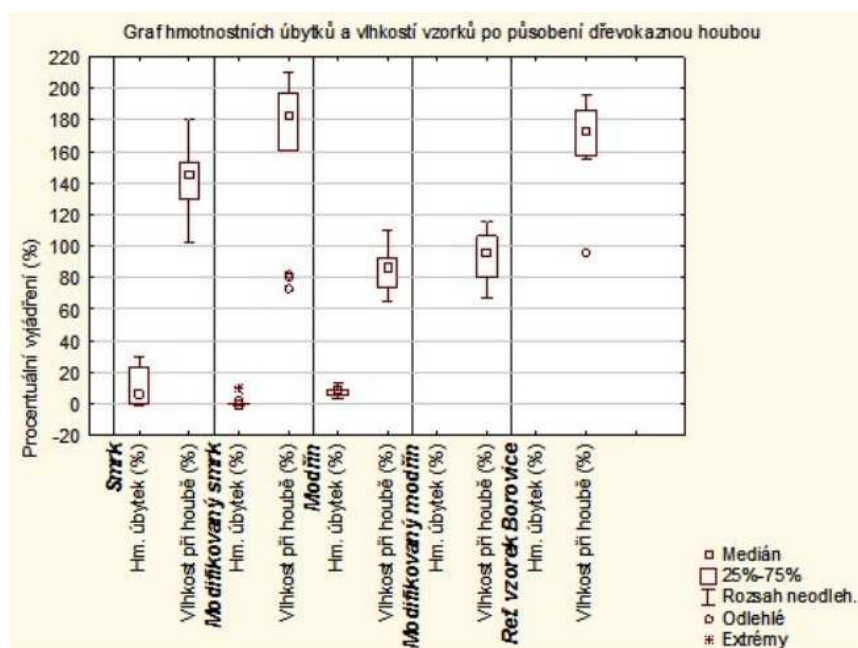
Obr. 8: Ukázka vzorků ze všech souborů po degradaci dřevokaznou houbou a vysušení.

Tab. 5: Popisná statistika výsledků měření pro vlhkostní změnu při působení dřevokazné houby trávovky trávové (*Gloeophyllum trabeum*).

| Název souboru | Popisná statistika vlhkostí vzorků po působení houbou | | | | | | |
|----------------|---|--------|--------|--------|--------|-----------|------------|
| | Počet | Průměr | Medián | Min. | Max. | Sm. odch. | Var. koef. |
| | ks | % | % | % | % | % | % |
| Neupravený SM | 15 | 143,50 | 144,82 | 101,75 | 180,32 | 20,35 | 14,18 |
| Upravený SM | 14 | 163,32 | 182,41 | 73,52 | 209,59 | 48,01 | 29,40 |
| Neupravený MD | 15 | 85,18 | 86,33 | 65,38 | 110,54 | 12,85 | 15,09 |
| Upravený MD | 15 | 93,22 | 96,32 | 67,44 | 115,51 | 15,77 | 16,92 |
| Ref. vzorek BO | 14 | 169,04 | 172,34 | 96,31 | 195,29 | 25,02 | 14,80 |

Tab. 6: Popisná statistika výsledků měření pro hmotnostní úbytky při působení dřevokazné houby trávovky trávové (*Gloeophyllum trabeum*).

| Název souboru | Popisná statistika hmotnostních úbytků po působení houbou | | | | | | | Ø Hm. změna |
|---------------|---|--------|--------|--------|-------|-----------|------------|-------------|
| | Počet | Průměr | Medián | Min. | Max. | Sm. odch. | Var. koef. | |
| | ks | g | g | g | g | g | % | % |
| Neupravený SM | 15 | 0,073 | 0,044 | -0,007 | 0,196 | 0,079 | 108,405 | 10,77 |
| Upravený SM | 14 | 0,003 | -0,002 | -0,006 | 0,054 | 0,016 | 620,025 | 0,45 |
| Neupravený MD | 15 | 0,080 | 0,087 | 0,032 | 0,136 | 0,027 | 34,154 | 7,95 |



Obr. 9: Souhrnný graf hmotnostních úbytků a změn vlhkostí jednotlivých zkoumaných souborů, po působení houbou trávovkou trávovou (*Gloeophyllum trabeum*).

8.2 Mechanické vlastnosti vzorků při ohybové zkoušce

8.2.1 Mez pevnosti

V Tab. 7 jsou uvedeny průměrné hodnoty jednotlivých souborů při provádění zkoušky. Objemová hmotnost a vlhkost byla u tepelně modifikovaných vzorků smrku (SM) a modřínu (MD) nižší ve srovnání s tepelně nemodifikovanými vzorky těchto druhů dřev.

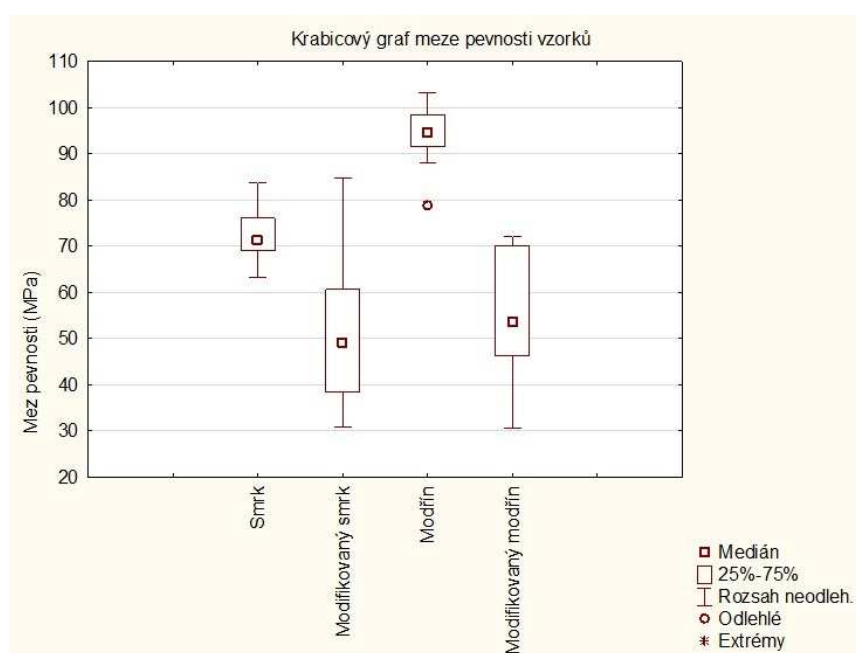
Tab. 7: Počítané průměrné hodnoty objemové hmotnosti a vlhkosti vzorků v době měření.

| Název souboru | Průměrné hodnoty vzorků | |
|-------------------|--|--------------------------------|
| | Objemová hmotnost (kg/m ³) | Vlhkost vzorků při zkoušce (%) |
| Neupravený smrk | 448,76 | 10,45 % |
| Upravený smrk | 432,73 | 5,81 % |
| Neupravený modřín | 561,85 | 10,74 % |
| Upravený modřín | 537,33 | 5,75 % |

V Tab. 8 je zobrazena popisná statistika pevnosti v ohybu jednotlivých souborů doplněná grafem na Obr. 10. Z měření je patrné, že výsledky odpovídají předpokládanému stavu vyplývajícího z informací získaných v literárním přehledu. Tepelně modifikované vzorky SM a MD vykazují nižší pevnostní charakteristiky v ohybu ve srovnání se vzorky nemodifikovaného SM a MD. Nejlepších hodnot pevnostních vlastností v ohybu bylo zjištěno u zkoumaných vzorků přírodního modřínu, kde průměrná mez pevnosti ze zkoumaných vzorků byla 94,61 MPa, nejhorších vlastností pak bylo zjištěno u modifikovaného smrku s průměrnou mezí pevnosti 51,77 MPa. V rámci srovnání skupin modifikovaného MD a modifikovaného SM lze konstatovat, že ačkoliv lepších pevnostních vlastností bylo zjištěno u modifikovaného MD – průměrná hodnota 54,52 MPa, tak rozdíl oproti modifikovanému smrku, průměrná hodnota meze pevnosti 51,77 MPa, byl nepatrný. U vzorků tepelně neupravených byl tento rozdíl patrnější.

Tab. 8: Popisná statistika ohybové meze pevnosti zkoumaných vzorků.

| Název souboru | Popisná statistika meze pevnosti v ohybu | | | | | | |
|-------------------|--|--------|--------|-------|--------|-----------|------------|
| | Počet | Průměr | Medián | Min. | Max. | Sm. odch. | Var. koef. |
| | ks | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa | % |
| Neupravený smrk | 17 | 71,81 | 71,19 | 63,17 | 83,71 | 6,22 | 8,66 |
| Upravený smrk | 15 | 51,77 | 49,07 | 30,77 | 84,67 | 17,75 | 34,30 |
| Neupravený modřín | 20 | 94,61 | 94,54 | 78,75 | 103,15 | 5,61 | 5,93 |
| Upravený modřín | 9 | 54,52 | 53,58 | 30,56 | 72,05 | 14,34 | 26,30 |



Obr. 10: Krabicový graf doplňující graficky popisnou statistiku a zachycující rozsah meze pevnosti v ohybu u jednotlivých zkoumaných souborů.

8.2.2 Modul pružnosti v ohybu

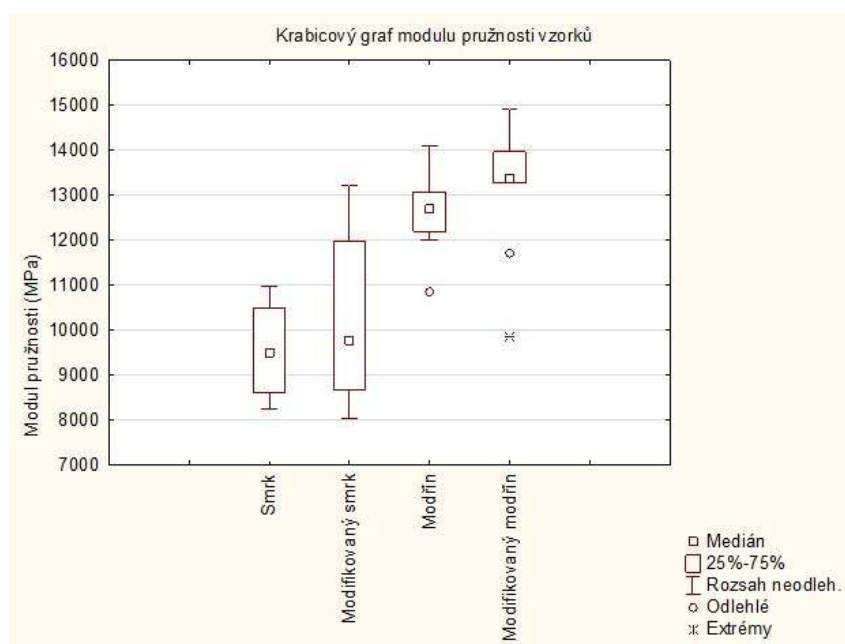
Výsledky pro modul pružnosti jednotlivých souborů jsou zobrazeny pomocí popisné statistiky v Tab. 9 a doplněny grafem na Obr. 11. Tepelně modifikované vzorky smrku (SM) a modřínu (MD) vykazují vyšší hodnoty v modulu pružnosti ve srovnání s nemodifikovanými vzorky SM a MD v rámci jednoho druhu dřeva.

U tepelně upraveného SM byla tedy zjištěna průměrná hodnota daných vzorků 10 221,18 MPa, kdežto u SM bez úpravy byl modul pružnosti 9 514,57 MPa. U tepelně upraveného MD byla zjištěna průměrná hodnota 13 151,65 MPa, kdežto u MD bez úpravy byl modul pružnosti 12 738,36 MPa.

Nejvyšší průměrná hodnota byla zjištěna u vzorků modifikovaného modřínu, kdy průměrný modul pružnosti zkoumaných vzorků byl 13 151,65 MPa, nejnižší průměrná hodnota pak byla zjištěna u neupraveného smrku 9 514,57 MPa. V rámci srovnání všech zkoumaných souborů lze konstatovat, že u modřínových (MD) vzorků modifikovaných/nemodifikovaných bylo zjištěno vyšších hodnot modulu pružnosti oproti vzorkům smrkovým (SM) modifikovaným/nemodifikovaným.

Tab. 9: Popisná statistika modulu pružnosti v ohybu zkoumaných vzorků.

| Název souboru | Popisná statistika modulu pružnosti v ohybu | | | | | | |
|-------------------|---|----------|----------|----------|----------|-----------|------------|
| | Počet | Průměr | Medián | Min. | Max. | Sm. odch. | Var. koef. |
| | ks | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa | % |
| Neupravený smrk | 17 | 9514,57 | 9492,06 | 8236,61 | 10957,62 | 1037,21 | 10,9 |
| Upravený smrk | 15 | 10221,18 | 9770,42 | 8034,95 | 13212,62 | 1781,82 | 17,4 |
| Neupravený modřín | 20 | 12738,36 | 12699,62 | 10853,76 | 14085,47 | 763,77 | 6,0 |
| Upravený modřín | 9 | 13151,65 | 13374,78 | 9866,36 | 14899,33 | 1505,74 | 11,4 |



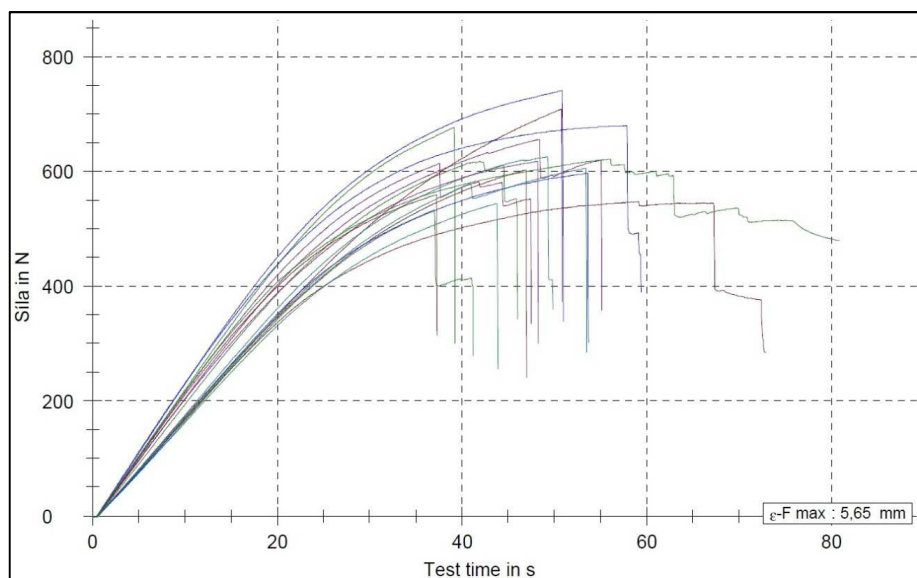
Obr. 11 Krabicový graf doplňující graficky popisnou statistiku a zachycující rozsah modulu pružnosti v ohybu u jednotlivých zkoumaných souborů.



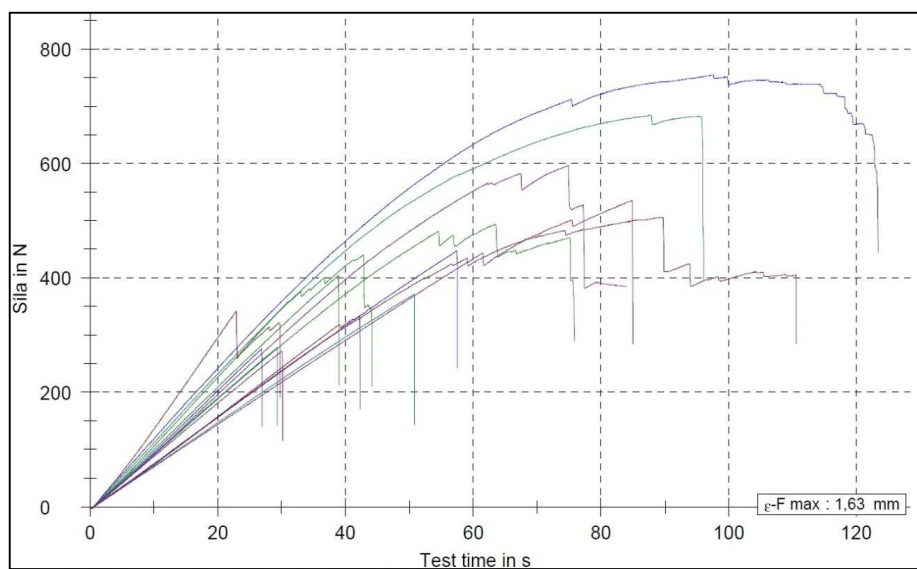
Obr. 12: Ukázka vzorků smrku, modifikovaného smrku, modřínu a modifikovaného modřínu (jemonované shora) po ohybové zkoušce tlakem.

8.2.3 Grafy průběhu zatížení jednotlivých vzorků

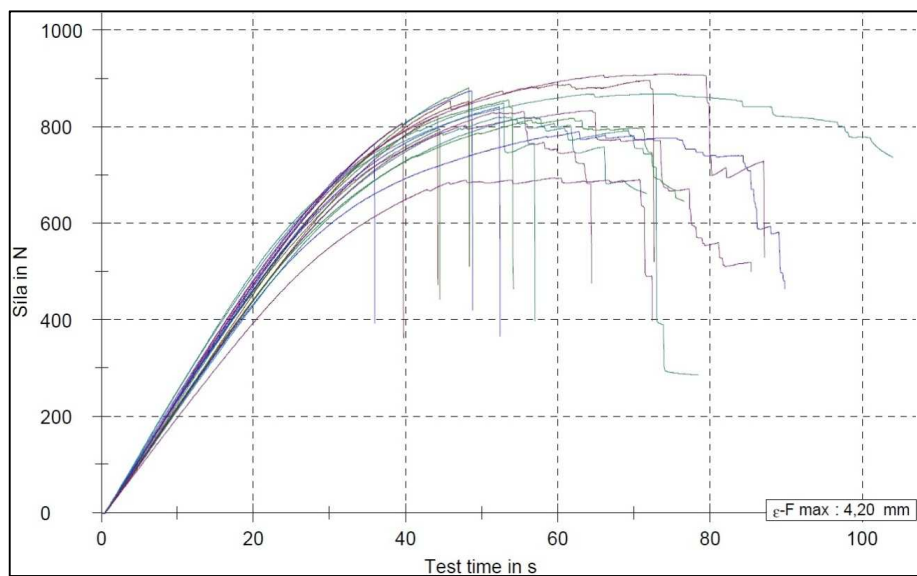
Níže uvedené grafy zobrazují průběh ohybové zkoušky na jednotlivých vzorcích. Srovnáním grafů mezi sebou můžeme vyčíst jisté rozdíly v průběhu zkoušky. Například u grafů průběhu zatížení modifikovaných souborů lze pozorovat větší odlišnosti v průběhu zatížení jednotlivých vzorků, což naznačuje zvýšení variability v chování vzorků při zatížení, s tímto je také spojený časový interval průběhu zkoušky, který je u souborů modifikovaných vzorků rozmanitější, než u neupravených vzorků. Vedlejší informací jsou u každého souboru vyobrazené průhyby v mm při působení maximální síly v rámci daného souboru vzorků. Tyto informace mohou také naznačovat mechanické vlastnosti jednotlivých souborů.



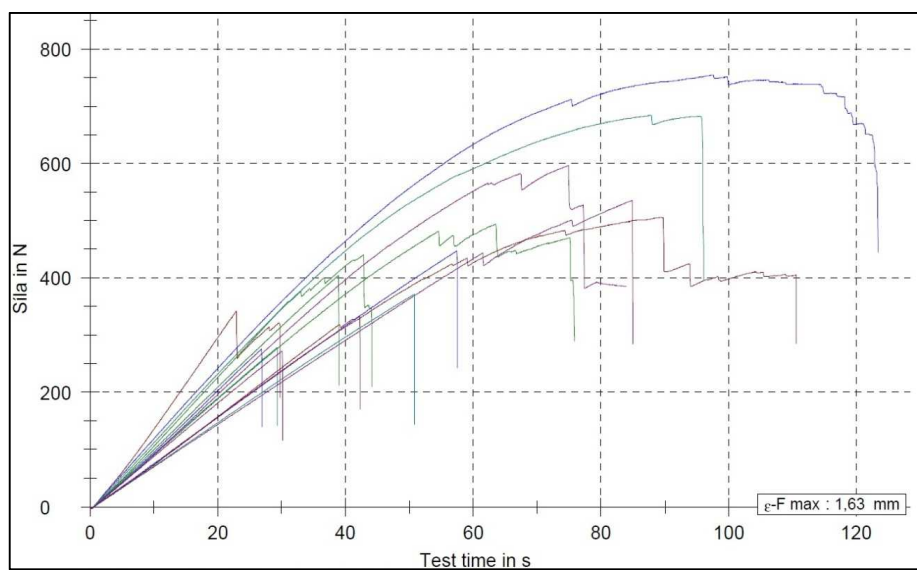
Obr. 13: Graf závislosti působící síly v Newtonech na čase (test time) v sekundách, při ohybovém zatěžování vzorků neupraveného smrku.



Obr. 14: Graf závislosti působící síly v Newtonech na čase (test time) v sekundách, při ohybovém zatěžování vzorků upraveného smrku.



Obr. 15: Graf závislosti působící síly v Newtonech na čase (test time) v sekundách, při ohybovém zatěžování vzorků neupraveného modřínu.



Obr. 16: Graf závislosti působící síly v Newtonech na čase (test time) v sekundách, při ohybovém zatěžování vzorků upraveného modřínu.

8.3 Pevnost vzorků při tlaku v tangenciálním směru

V Tab. 10 jsou uvedeny průměrné hodnoty jednotlivých souborů při provádění zkoušky statické tlakové pevnosti v tangenciálním směru k dřevním vláknům. Objemová hmotnost a vlhkost byla u tepelně modifikovaných vzorků smrku (SM) a modřínu (MD) nižší ve srovnání s tepelně nemodifikovanými vzorky těchto druhů dřev.

Tab. 10: Počítané průměrné hodnoty objemové hmotnosti a vlhkosti vzorků v době měření.

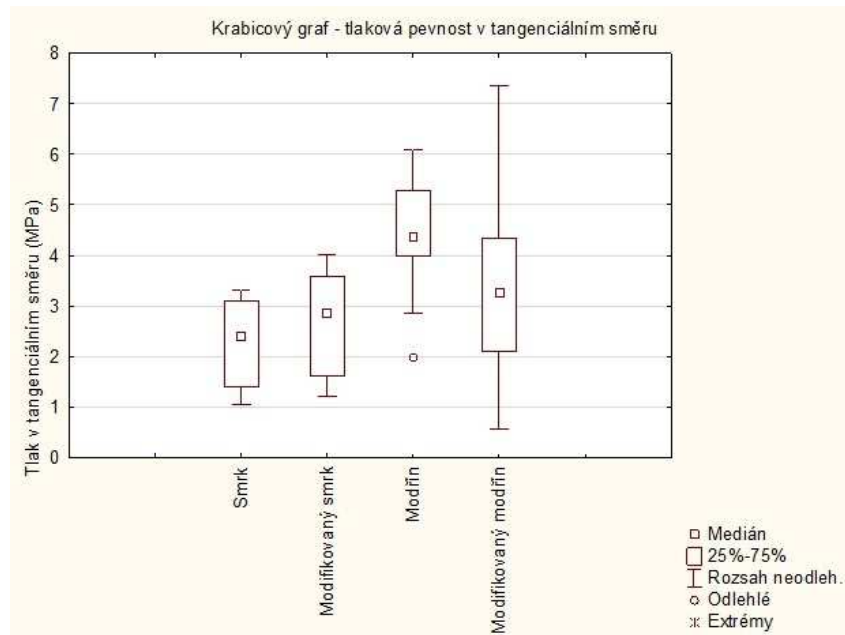
| Název souboru | Průměrné hodnoty vzorků | |
|-------------------|---|----------------------------------|
| | Objemová hmotnost (kg/m ³) | Vlhkost vzorku při měření (%) |
| Neupravený smrk | 440,63 | 9,96 |
| Upravený smrk | 432,70 | 5,67 |
| Neupravený modřín | 553,35 | 9,44 |
| Upravený modřín | 533,45 | 4,71 |

Pro vyhodnocení výsledků byla použita popisná statistika a grafové vyjádření. Z výsledků je patrné, že byly zaznamenány největší rozdíly pevnostních hodnot mezi smrkovým a modřínovým dřevem. Na výsledcích vyjádřených grafem na Obr. 17 lze pozorovat, že tepelnou modifikací se rozdíl ve výši hodnot pevností mezi MD a SM snížil. Nicméně na druhou stranu je potřeba brát v úvahu zvýšení variability po tepelné úpravě vzorků. Nejpatrnější nárůst variability je pozorováno u modifikovaného modřínu.

Nejvyšších hodnot pevnosti v tlaku v tangenciálním směru na dřevní vlákna bylo zaznamenáno u neupraveného modřínu (průměrná hodnota souboru 4,44 MPa), nejnižší hodnoty pak bylo dosaženo u neupraveného smrku 2,27 MPa.

Tab. 11: Popisná statistika meze pevnosti v tlaku při zatížení v tangenciálním směru.

| Název souboru | Popisná statistika meze pevnosti v tlaku v tang. směru zatížení | | | | | | |
|-------------------|---|--------|--------|------|------|-----------|------------|
| | Počet | Průměr | Medián | Min. | Max. | Sm. odch. | Var. koef. |
| | ks | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa | % |
| Neupravený smrk | 22 | 2,27 | 2,40 | 1,05 | 3,31 | 0,79 | 34,87 |
| Upravený smrk | 20 | 2,63 | 2,86 | 1,21 | 4,02 | 0,98 | 37,37 |
| Neupravený modřín | 20 | 4,44 | 4,37 | 1,98 | 6,09 | 1,01 | 22,77 |
| Upravený modřín | 20 | 3,38 | 3,27 | 0,57 | 7,36 | 1,72 | 50,86 |



Obr. 17: Krabicový graf doplňující graficky popisnou statistiku a zachycující rozsah meze pevnosti při působení tlaku v tangenciálním směru na dřevní vlákna u jednotlivých zkoumaných souborů.

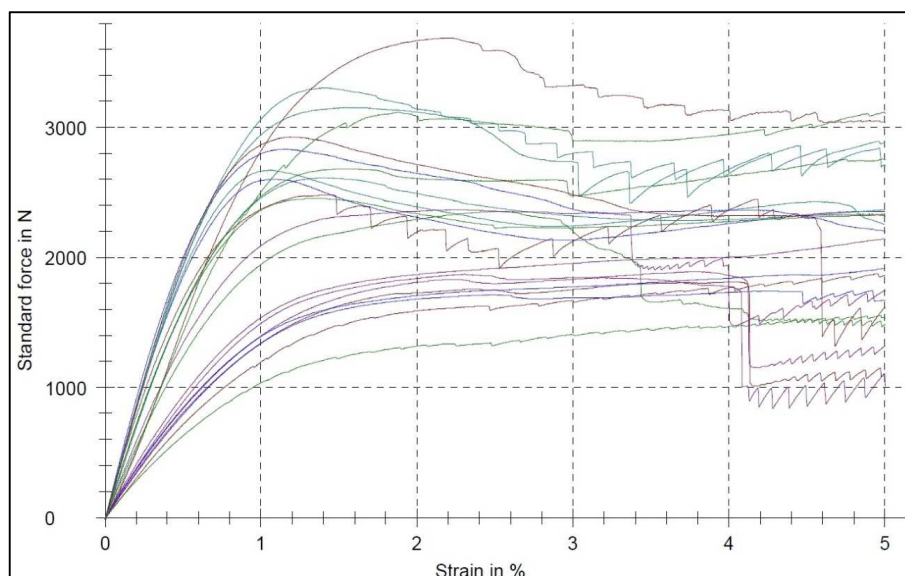


Obr. 18: Ukázka vzorků ze souboru modřínového dřeva po tlakové zkoušce v tangenciálním směru na vlákna.

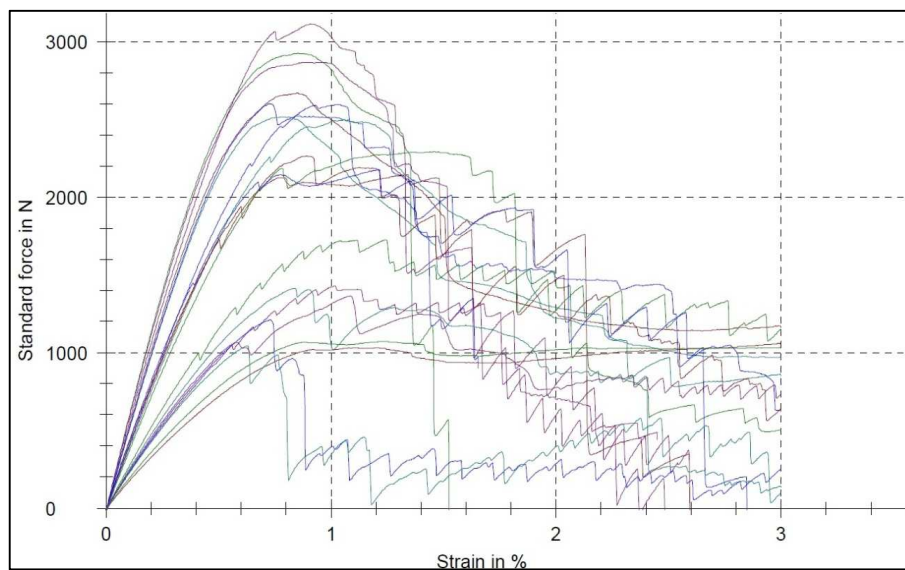
8.3.1 Grafy průběhu zatížení tlakem v tangenciálním směru na dřevní vlákna

Níže uvedené grafy zobrazují průběh tlakové zkoušky v tangenciálním směru na dřevní vlákna u jednotlivých vzorků. Srovnáním grafů mezi sebou můžeme vyčíst jisté rozdíly v průběhu zkoušky. Například u grafů průběhů zatížení modifikovaných

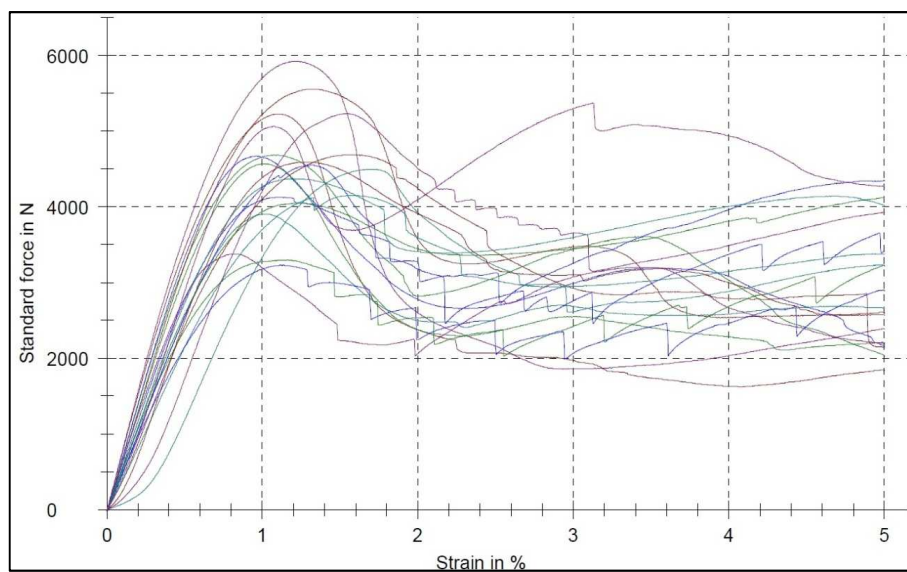
souborů lze pozorovat větší odlišnosti v průběhu zatížení jednotlivých vzorků. Toto naznačuje zvýšení variability v chování vzorků při zatížení. Ve srovnání mezi soubory, u souboru modřínového dřeva nemodifikovaného byly jednotlivé vzorky namáhány větší působící silou než došlo k poškození vzorků, což poukazuje na vyšší pevnost v tlaku napříč vláken u modřínového dřeva než u ostatních zkoumaných souborů.



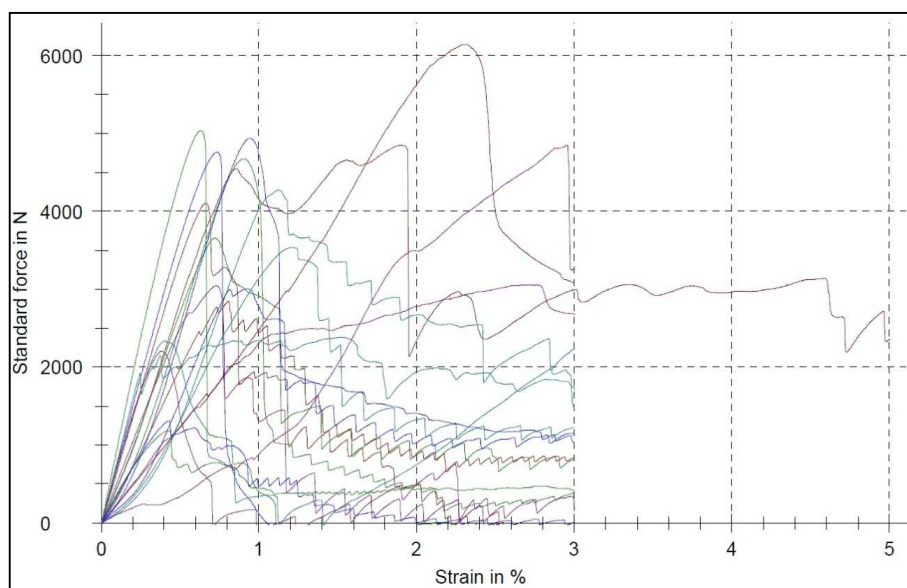
Obr. 19: Graf závislosti působící síly (standard force) v Newtonech a napětí (strain) vyjádřeného v % při tlakovém namáhání ve směru tangenciálním na dřevní vlákna u neupraveného smrku.



Obr. 20: Graf závislosti působící síly (standard force) v Newtonech a napětí (strain) vyjádřeného v % při tlakovém namáhání ve směru tangenciálním na dřevní vlákna u upraveného smrku.



Obr. 21: Graf závislosti působící síly (standart force) v Newtonech a napětí (strain) vyjádřeného v % při tlakovém namáhání ve směru tangenciálním na dřevní vlákna u neupraveného modřínu.



Obr. 22: Graf závislosti působící síly (standard force) v Newtonech a napětí (strain) vyjádřeného v % při tlakovém namáhání ve směru tangenciálním na dřevní vlákna u upraveného modřínu.

9 Diskuse

Práce byla zaměřena na zkoumání a vzájemné porovnání materiálů smrku (*Picea sp.*), modřínu (*Larix sp.*) a jejich tepelně modifikovaných alternací z hlediska vybraných mechanických vlastností (statického tlaku napříč vláken, ohybová pevnost a modul pružnosti v ohybu) a odolnosti vůči degradaci dřevokaznou houbou. To vše v rámci vhodnosti jmenovaného zkoumaného materiálu pro použití na šindelovou dřevěnou krytinu. V současné praxi je pro výrobu šindele používáno dřevo smrkové a modřínové, přičemž modřínový šindel se jeví jako materiál odolnější, pevnější a šetrnější k životnímu prostředí. Cílem této práce bylo srovnat vlastnosti tradičních materiálů pro výrobu šindele (smrku a modřínu) s materiálovými vlastnostmi tepelně modifikovaného smrku a modřínu a vyhodnotit nejlepší variantu pro výrobu a použití šindele. Výsledky zkoušek na vybrané mechanické vlastnosti potvrdily poznatky získané v literárním přehledu, že u tepelně modifikovaných dřev jsou mechanické vlastnosti sníženy – vzorky se staly křehčími oproti tepelně neupraveným vzorkům. Výjimka byla zaznamenána pouze u modulu pružnosti v ohybu, kde se u modifikovaných vzorků modul pružnosti nepatrně zvýšil oproti vzorkům nemodifikovaným. Z hlediska vhodnosti pro použití šindele je křehkost spíše nežádoucí, neboť je šindel vystaven mechanickému namáhání v podobě například sněhového zatížení, větru, náhlému pádu větví, ale také hlavně při jeho manipulaci a montáži. Vyšších hodnot pro mechanické vlastnosti, při srovnání modifikovaného smrku a modifikovaného modřínu, dosáhl modifikovaný modřín (viz. 8.2. a 8.3.), ovšem při výrobě zkušebních tělísek pásovou pilou se modifikovaný modřín jevil jako křehčí než modifikovaný smrk. Proto se autor domnívá, že i přes nepatrně horší (dle experimentu) mechanické vlastnosti oproti modifikovanému modřínu by mohl být pro výrobu šindele vhodnější modifikovaný smrk.

Průběh samotných mechanických zkoušek byl bez výraznějších komplikací a výsledky hodnotami odpovídají poznatkům získaným v literárního přehledu. Provádění zkoušky odolnosti vůči rozkladu dřevokaznou houbou se však bez komplikací neobešel. Problém se vyskytl při očkování houbou. První dva pokusy o naočkování houbou pórnatky (*Poria*) se nepodařily z důvodu napadení houbou plísní. Při druhém pokusu byla znehodnocena zkušební tělíska. Proto pro třetí pokus bylo nutné vyrobit tělíska o transponovaných rozměrech v souladu s normami a použít houbovou kulturu

trámovky trámové (*Gloeophyllum trabeum*). Samotná zkouška odolnosti vůči trámovce trámové (*Gloeophyllum trabeum*) proběhla bez komplikací. Při zpracování a vyhodnocování výsledků byl zjištěn u souboru modifikovaného smrku v podstatě nulový úbytek hmotnosti (průměrná hodnota souboru byla 0,45 %) při neočekávaně vysoké vlhkosti obsažené ve dřevě po působení houbou (průměrná hodnota vlhkosti po vyjmutí a očištění byla 163,32 %). Může vyvstat otázka, zda vysoká vlhkost nezamezila houbovému růstu.

Z informací získaných z literárního přehledu vyplývá, že tepelná modifikace dřeva zvyšuje odolnost vůči dřevokazným houbám. Z hlediska vhodnosti pro výrobu šindele je zvýšení rezistence vůči dřevnímu rozkladu působením houby určitě žádoucí. Z tohoto pohledu bylo zajímavé porovnávat přirozenou odolnost modřínu a zvýšenou odolnost smrku tepelnou úpravou. Z výsledků experimentu vyplývá, že méně bylo degradováno dřevo modifikovaného smrku oproti dřevu přírodního modřínu. Z tohoto důvodu by mohl být modifikovaný smrk materiálovou alternativou pro dřevěný šindel.

Je však potřeba vzít v úvahu jistá fakta při provádění praktické části. Bylo nutné vyhovět normám spjatých se zkouškami a zároveň požadavkům na materiál z pohledu výroby šindelů. Veškerá zkušební tělíska byla vyráběna z kulatiny patřící živnostníkovi s malou výrobní kapacitou zabývající se výrobou dřevěných šindelů. Modifikovaná zkušební tělíska byla vyráběna z malých tepelně modifikovaných hranolů vymanipulováním (viz. odst. 7.2.) pomocí pásové pily. Při tomto technologickém postupu se mnoho tělísek poškodilo, či zcela rozpadlo na více kusů z důvodu křehkosti modifikovaného materiálu (viz. odst. 4.2.3). Největší ztráty byly u modifikovaného modřínu (*Larix sp.*). Otázkou zůstává zda by se této komplikaci dalo předejít při technologickém postupu, kdy se modifikují až samotné malé zkušební vzorky. Vzhledem ke snaze přiblížit se co nejvíce výrobě šindelů v praxi a z důvodu obav z poškození popraskáním malých vzorků vysokou teplotou, byl v této práci zvolen první výše zmíněný způsob, tj. vymanipulování zkušebních tělísek z modifikovaného materiálu. Navrhuje se tedy další výzkum k řešení této problematiky.

10 Závěr

Z dosažených výsledků je možné sledovat změny vybraných materiálových vlastností modřínového (*Larix sp.*), smrkového (*Picea sp.*), teplem modifikovaného modřínu (*Larix sp.*) a teplem modifikovaného smrku (*Picea sp.*) během a po mechanických zkouškách. Také je možno sledovat a porovnávat odolnost těchto skupin vůči působení dřevokazné houby trámovky trámové (*Gloeophyllum trabeum*).

Z mechanických vlastností materiálu byly předmětem zkoumání mez pevnosti při ohybu, modul pružnosti při ohybu a mez pevnosti při působení tlaku v tangenciálním směru. Nejvyšších hodnot meze pevnosti při ohybu bylo dosaženo u neupraveného modřínu, kdy průměrná hodnota souboru byla 94,61 MPa, nejnižších hodnot naopak bylo zjištěno u tepelně upraveného smrku o průměrné hodnotě souboru 51,77 MPa. Z výsledků týkajících se modulu pružnosti v ohybu vyplývá, že nejvyšších hodnot dosáhl soubor upraveného modřínu 13 151,65 MPa, nejnižších pak neupravený smrk 9 514,57 MPa. Zkoušky meze pevnosti v tlaku napříč vláken se prováděly na tělískách rozměrově odlišných od tělísek použitých pro ohybové zkoušky. Nejvyšší hodnota průměru při zkoumání působení tlaku napříč vláken byla zjištěna u souboru neupraveného modřínu a to 4,44 MPa, nejnižší průměr naměřených hodnot 2,27 MPa pak byl zaznamenán u neupraveného smrku

Zkouška odolnosti vůči dřevokazné houbě byla prováděna na rozměrově odlišných vzorcích oproti vzorkům pro mechanické zkoušky. Degradující houba byla vybrána trámovka trámová (*Gloeophyllum trabeum*) působící na vzorky po dobu deset týdnů. Nejmenších hodnot hmotnostních úbytků bylo zaznamenáno u souboru upraveného smrku. Snížení hmotnosti u tepelně modifikovaného smrku bylo v průměru pouze o 0,45 %. Nejvyšších hodnot úbytků hmotnosti pak bylo zjištěno u tepelně neupraveného smrku a to v průměru o 10,77 % oproti vzorkům neupraveného smrku před působením houby a při vlhkosti dřeva 0 %.

11 Summary

This thesis focused on monitoring and comparing the selected material properties of spruce, larch, heat-treated spruce and heat-treated larch depending on the suitability of use for shingles. Selected mechanical properties: strength at a pressure in the tangential direction of the load on the fiber, bending strength and modulus of elasticity. There was also investigated the resistance of to wood-destroying fungus *Gloeophyllum trabeum*. Each test for different type of investigation was according to current standards. The main aim was to evaluate the most appropriate material for the production and use of wooden shingles. The results obtained from experiment correspond to the information obtained from the literature review. It has been reported to reduce the strength of heat-modified samples. Increased resistance against fungi by thermal modification of wood can not completely confirm the results obtained. There were some complications during practical part of this paper. First was selected material suitable for use in the experiment. The material had to be selected according to standards and special requirements for making shingles and their use in practice. Second complication was during the test of decay resistance. For this reason, it is proposed to further follow-up investigation of this issue.

12 Seznam citované literatury a norem

ČSN EN-113: Ochranné prostředky na dřevo - Zkušební metody na stanovení ochranné účinnosti proti dřevokazným houbám Basidiomycetes - Stanovení hranice účinnosti. 1998

ČSN 49 0012: Dřevo: Fyzikální a mechanické zkoušky - Názvy a definice, 1997

ČSN 49 0112: Dřevo. Tlak naprieč vlákien, 1979

ČSN 49 0115: Dřevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe, 1979

ČSN 49 0103: Dřevo: Zjišťování vlhkosti při fyzikálních a mechanických zkouškách, 1979

ČSN EN 322: Dosky z dreva. Zisťovanie vlhkosti, 1994

EN 350-1: Durability of Wood and Wood-based Products – Natural Durability of Solid Wood: Guide to the principles of testing and classification of the natural durability of wood. 1994

BEZDĚK, M. 2012. Stanovení stacionární propustnosti a vybraných mechanických vlastností tepelně modifikovaného dřeva borovice. Diplomová práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. 69 s.

CELÝ, O., 2009. Dřevo jako výukový materiál. Diplomová práce. Brno: Masarykova univerzita., 68 s.

CURNEL, Y., et al., 2008. Variation in the decay resistance of larch to fungi. EDP Sciences, 65(8), 810-818

FENGEL, D., WEGENER, G., 1989. Wood: Chemistry Ultrastructure, Reactions. Walter De Gruyter. 13 p. ISBN 3-11-012059-3

FEIST, C., SELL, J., 1987. Weathering behavior of dimensionally stabilized wood treated by heating under pressure of nitrogen gas., Wood and Fiber Science, 19(2), 183-195.

GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P., ŠLEZINGEROVÁ J., 1998. Nauka o dřevě MZLU v Brně, 184 s.

GRABNER, M., MÜLLER, U., GIERLINGER, N., WIMMER, R., 2005. Effects of heartwood extractives on mechanical properties of larch. IAWA Journal 26, p. 211-220.

HÁJEK, V. a kol. *Lidová stavení – Opravy a úpravy*. Praha: Grada, 2001. 180 s. Str. 123 -124. ISBN 80-247-9054-8

HEIKKONEN S., LUOSTARINEN K., PIISPA K., 2007. Kiln drying of Siberian Larch (*Larix sibirica*) timber. Research Reports. Finland, Mikkeli University of Applied Sciences. 78 p. ISBN: 978-951-588-210-3

HILL, C., 2006: Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. England, John Willey Publ. & Sons Ltd., 239 p., ISBN 0-470-02172-9

HORÁČEK, P., 2001. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. MZLU Brno, 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2

JÄMSÄ, S. & VIITANIEMI, P. 2001. Heat treatment of wood: better durability without chemicals. Proceedings of the special seminar of COST Action E22, R app, A.O. (ed.). France, Antibes, 21-26.

JERMER, J., ANDERSSON, B-L., 2005. Corrosion of fasteners in heat-treated wood – progress report after two years exposure outdoors., International Research Group on Wood Protection, Document No. IR G/WP/05-40296.

KARINKANTA, P., 2014. Dry fine grinding of Norway spruce (*Picea abies*) wood in impact-based fine grinding mills. Dissertation thesis. Finland: University of Oulu Graduate School., 112 p.

KIM, D.-Y., NISHIYAMA, Y., WADA, M., KUGA, S., OKANO, T., 2001: Thermal decomposition of cellulose crystallites in wood. *Holzforschung*, 55(5), 521–524.

KOIZUMI, A., TAKATA, K., YAMASHITA, K., NAKADA, R., 2003. Anatomical characteristics and mechanical properties of *Larix sibirica* grown in South-Central Siberia. IAWA Journal 24, 355-370.

KOLLMANN, F., FENGEL, D ., 1965. Änderungen der chemischen Zusammensetzung von Holz durch thermische Behandlung. (Changes in the chemical composition of wood by thermal treatment.). *Holz als Roh- und Werkstoff*, 23(12), 461-468.

LDF MENDELOVA UNIVERZITA. Ústav nauky o dřevě [online] citováno 15. března 2015. Dostupné na World Wide Web: <<http://ldf.mendelu.cz>>.

MATOVIČ, A., 1992. Stavba dřeva. Brno, Vysoká škola zemědělská, 172 p.

POŽGAJ, A. a kol., 1997. Struktura a vlastnosti dřeva, 2. vyd. Příroda, a.s., Bratislava 485 s.

RAPP, A.O., SAILER, M., 2001. Oil heat treatment of wood in Germany: state of the art. In: Review on heat treatment of wood. Proceedings of special seminar of Cost Action E22, Environmental Optimization of Wood Protection, France, Antibes, 45-62.

REINPRECHT, L., 2010. Effect of natural conservation substances on some moisture and mechanical properties of decayed spruce wood. Slovakia: Technical University of Zvolen. Faculty of Wood Science and Technology, 8 p.

SANDBERG, D. NAVI, P., 2011. Thermo-hydro-mechanical Processing of Wood. Lausanne, EPFL Press, 360 s. ISBN 978-2-940222-41-1, 249 - 286.

SHIMIZIU, K., TERATINI, F., HASHI, M., MIYAZAKI, K., 1972: Effect of the thermal treatment on wood hemicelluloses. VI. Studies on the thermal analysis of arabinogalactan, and O-acetyl and deacetylated-galactoglucomannans. Mokuzai Gakkaishi, 18(2), 79–84.

SKALICKÝ, V., SKALICKÁ, A., 1997. Picea. Květena České republiky, 2. vyd.. Praha, Academia, p. 317–326.

STAMM, J., BURR, K., KLINE, A. 1946. Staywood. Heat stabilized wood. Industrial and Engineering Chemistry, 38(6), 630-634.

VERNOIS, M. 2001. Heat treatment of wood in France – State of the art. Proceedings of special seminar of Cost Action E22, Environmental Optimization of Wood Protection, France, Antibes, 37-44.

VODRÁŽKA, J. 2011. Porovnání míry degradace naimpregnovaných jehličnatých dřev dřevokaznou houbou – *Serpula lacrymans*. Diplomová práce. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. 70 s.

WEILAND, J.J., GUYONNET, R. 2003. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRI FT spectroscopy. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61(3), 216-220.

WELZBACHER, C.R., BRISCHKE, C., RAPP, A. 2007. Influence of treatment temperature and duration on selected biological, mechanical, physical, and optical properties of thermally modified timber. *Wood Material Science and Engineering*, 2(2), 66-76.

YILDIZ, S., GEZER, E., YILDIZ, U., 2006. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat, *Building and Environment*, Volume 41, Issue 12, Pages 1762-1766

13 Seznam obrázků a tabulek

- Obr. 1: Schématické znázornění změn složek dřeva vlivem teploty, bez ohledu na čas. Zanedbatelné změny (negligible), malé změny (small) a silné změny (strong) jsou znázorněny barevně. Jsou zde také uvedeny některé způsoby sušení: přirozené sušení (air drying), nucené sušení (artificial drying), vysokoteplotní sušení (high temperature drying) a tepelná modifikace (thermal treatment) (Sandberg, 2011). 13
- Obr. 2: Graf hmotnostního úbytku v % (weight loss) smrku ztepilého (*Picea abies* (L.)) v závislosti na teplotě a době tepelné úpravy v hodinách (treatment time) v otevřeném systému (Welzbacher et al., 2007). 14
- Obr. 3: Graf závislosti koeficientu bobtnání v % (ASE) na teplotě vzhledem k hmotnostnímu úbytku v % (weight loss) smrku ztepilého (*Picea abies*) při tepelné úpravě v otevřeném systému (Welzbacher et al., 2007). 15
- Obr. 4: Průměrný hmotnostní úbytek (a) a snížení hustoty (b) smrkových vzorků po působení *Coniophora puteana* po dobu 2,4,6,8,10 a 12 týdnů. (Reinprecht, 2010). 24
- Obr. 5: Modřínový štípaný šindel alpský typ 24
- Obr. 6: Smrkový štípaný šindel valašský typ 25
- Obr. 7: Smrkový (výše) a modřínový hranol pro výrobu zkušebních vzorků. 27
- Obr. 8: Ukázka vzorků ze všech souborů po degradaci dřevokaznou houbou a vysušení. 36
- Obr. 9: Souhrnný graf hmotnostních úbytků a změn vlhkostí jednotlivých zkoumaných souborů, po působení houbou trámovkou trámovou (*Gloeophyllum trabeum*). 37
- Obr. 10: Krabicový graf doplňující graficky popisnou statistiku a zachycující rozsah meze pevnosti v ohybu u jednotlivých zkoumaných souborů. 39
- Obr. 11 Krabicový graf doplňující graficky popisnou statistiku a zachycující rozsah modulu pružnosti v ohybu u jednotlivých zkoumaných souborů. 40
- Obr. 12: Ukázka vzorků smrku, modifikovaného smrku, modřínu a modifikovaného modřínu (jemonované shora) po ohybové zkoušce tlakem. 41
- Obr. 13: Graf závislosti působící síly v Newtonech na čase (test time) v sekundách, při ohybovém zatěžování vzorků neupraveného smrku. 42
- Obr. 14: Graf závislosti působící síly v Newtonech na čase (test time) v sekundách, při ohybovém zatěžování vzorků upraveného smrku. 42
- Obr. 15: Graf závislosti působící síly v Newtonech na čase (test time) v sekundách, při ohybovém zatěžování vzorků neupraveného modřínu. 43

| | |
|--|----|
| Obr. 16: Graf závislosti působící síly v Newtonech na čase (test time) v sekundách, při ohybovém zatěžování vzorků upraveného modřínu. | 43 |
| Obr. 17: Krabicový graf doplňující graficky popisnou statistiku a zachycující rozsah meze pevnosti při působení tlaku v tangenciálním směru na dřevní vlákna u jednotlivých zkoumaných souborů. | 45 |
| Obr. 18: Ukázka vzorků ze souboru modřínového dřeva po tlakové zkoušce v tangenciálním směru na vlákna. | 45 |
| Obr. 19: Graf závislosti působící síly (standard force) v Newtonech a napětí (strain) vyjádřeného v % při tlakovém namáhání ve směru tangenciálním na dřevní vlákna u neupraveného smrku. | 46 |
| Obr. 20: Graf závislosti působící síly (standard force) v Newtonech a napětí (strain) vyjádřeného v % při tlakovém namáhání ve směru tangenciálním na dřevní vlákna u upraveného smrku. | 46 |
| Obr. 21: Graf závislosti působící síly (standart force) v Newtonech a napětí (strain) vyjádřeného v % při tlakovém namáhání ve směru tangenciálním na dřevní vlákna u neupraveného modřínu. | 47 |
| Obr. 22: Graf závislosti působící síly (standard force) v Newtonech a napětí (strain) vyjádřeného v % při tlakovém namáhání ve směru tangenciálním na dřevní vlákna u upraveného modřínu. | 47 |
| Tab. 1: Tabulka vztahu mezi redukcí bobtnání a odolností vůči tlení u tepelně modifikovaného dřeva borovice (<i>Pinus</i>) při použití houby outkovky řadové (Stamn et al., 1946). | 17 |
| Tab. 2: Úbytek hmotnosti v % po působení houby <i>conizophora puteana</i> po dobu 19 týdnů, dle normy EN 113 (1996) u tepelně upraveného dřeva borovice lesní (<i>Pinus sylvestris</i>) a smrku ztepilého (<i>Picea abies</i>) v kapalném prostředí a vzduchovém prostředí (Rapp, Sailer 2001). | 18 |
| Tab. 3: Některé mechanické vlastnosti dřeva modřínu sibiřského, smrku ztepilého a břízy bělokoré. Některé hodnoty u modřínu jsou uvedeny pro zralé dřevo1), některé pro juvenilní dřevo2). Hodnoty tvrdosti jsou dle Janka (Ja) nebo Brinella (Br) (Heikkonen, 2007) | 22 |
| Tab. 4: Vybrané parametry modifikačních procesů použité vybranými autory při tepelné modifikaci dřeva. | 28 |
| Tab. 5: Popisná statistika výsledků měření pro vlhkostní změnu při působení dřevokazné houby trámovky trámové (<i>Gloeophyllum trabeum</i>). | 37 |
| Tab. 6: Popisná statistika výsledků měření pro hmotnostní úbytky při působení dřevokazné houby trámovky trámové (<i>Gloeophyllum trabeum</i>). | 37 |

| | |
|---|----|
| Tab. 7: Počítané průměrné hodnoty objemové hmotnosti a vlhkosti vzorků v době měření. | 38 |
| Tab. 8: Popisná statistika ohybové meze pevnosti zkoumaných vzorků. | 39 |
| Tab. 9: Popisná statistika modulu pružnosti v ohybu zkoumaných vzorků. | 40 |
| Tab. 10: Počítané průměrné hodnoty objemové hmotnosti a vlhkosti vzorků v době měření. | 44 |
| Tab. 11: Popisná statistika meze pevnosti v tlaku při zatížení v tangenciálním směru. . | 44 |