

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská



Bakalářská práce

2022

František Sojka

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Fyzikální a mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva
buku impregnovaného pryskyřicí**

Bakalářská práce

Autor: František Sojka
Vedoucí práce: Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, Ph.D.

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

František Sojka

Dřevařství

Podnikání ve dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu

Název práce

Fyzikální a mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva buku impregnovaného pryskyřicí

Název anglicky

Physical and mechanical properties of thermally modified beech wood impregnated by resin

Cíle práce

Cílem práce je provést rešerši se zaměřením na vlastnosti termicky modifikovaného dřeva buku impregnovaného pryskyřicí a experimentální určení vlivu vybraných faktorů na fyzikální a mechanické charakteristiky termicky upraveného dřeva impregnovaného pryskyřicí.

Metodika

Harmonogram práce:

květen – srpen 2021: literární rešerše

srpen – prosinec 2021: experimentální část

prosinec 2021 – březen 2022: vyhodnocení výsledků a sepsání práce

duben 2022: odevzdání závěrečné práce

Student provede analýzu, syntézu, komparaci a deskripci názorů autorů zabývajících se termickou modifikací dřeva. V praktické části práce se student zaměří na určení vlivu vybraných faktorů na fyzikální a mechanické charakteristiky termicky upraveného dřeva impregnovaného pryskyřicí. Diskuse obsahuje SWOT analýzu vyvinutého materiálu.

Doporučený rozsah práce

60 stran

Klíčová slova

termická úprava, barva dřeva, pevnost v tlaku, impregnace

Doporučené zdroje informací

- H. Militz, Heat treatment technologies in Europe: scientific background and technological state-of-art, in: Proceedings of Conference on Enhancing the Durability of Lumber and Engineered Wood Products, Kissimmee, Orlando, 2002.
- ISO 13061-1, Physical and mechanical properties of wood -Test methods for small clear wood specimens -Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2014
- Kacikova, D., Kacik, F., Cabalova, I., and Durkovic, J. (2013). "Effects of thermal treatment on chemical, mechanical, and colour traits in Norway spruce wood," *Bioresource Technology* 144, 669. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.110
- Martinka, J., Chrebet, T., Král, J., and Balog, K. (2013a). "An examination of the behaviour of thermally treated spruce wood under fire conditions," *Wood Research* 58(4), 599-606.
- REINPRECHT L.; VIDHOLDOVÁ Z.; 2008. *Termodrevo – příprava, vlastnosti a aplikace*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6.
- Stark, N. (1997). Effect of species and particle size on properties of wood-flour-filled polypropylene composites, *Functional Fillers for Thermoplastics and Thermosets*, Le Meridien at Coronado, San Diego, CA, pp. 2-22.
- S. Yildiz, E.D. Gezer, U.C. Yildiz, Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat, *Build. Environ.* 41 (12) (2006) 1762–1766, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.017>.
- Tabarsa, T., Chui, Y. H., 1996. Účinek lisovania za tepla na vlastnosti dreveniny WHITE SPRUCE. *COMPOSITES END MANUFACTURED PRODUCTS – FOREST PRODUCTS JOURNAL* 1996.
- Tewarson, A. (1994). "Flammability parameters of materials: Ignition, combustion, and fire propagation," *Journal of Fire Sciences* 12(4), 329-356. DOI: 10.1177/073490419401200401
- Walker, J. C. F., Butierfield, B. G., Langrish, T. A. G., Harris, J. M., and Uprichard, J. M. (1993). *Primary Wood Processing*. Chapman and Hall, London. 595p
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 22. 9. 2021

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 4. 2. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 13. 03. 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „**Fyzikální a mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva buku impregnovaného pryskyřicí**“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, Ph.D. a použil/a jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V..... dne.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. et Ing. Štěpánu Hýsekovi, Ph.D., za vedení a odborné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Fakultě lesnické a dřevařské za možnost pracovat v laboratoři na České zemědělské univerzitě v Praze. Velké poděkování patří také rodině a přátelům za podporu v průběhu celého studia.

Abstrakt

Práce se zabývá zkoumáním dopadů termické modifikace, impregnace a jejich kombinace na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva buku. Konkrétně byl zjišťován účinek termické modifikace, impregnace a jejich kombinace na změnu hmotnosti, bobtnání a pevnost v tlaku. Zkušební vzorky byly rozděleny do šesti skupin podle modifikace. Jedna skupina vzorků byla ponechána bez úprav, jako referenční. Zkoušky probíhaly dle normalizovaných postupů.

Po zpracování naměřených hodnot a porovnání neupravených a modifikovaných zkušebních vzorků bylo zjištěno, že skupiny kombinující termickou modifikaci 210 °C a impregnaci dřeva v koncentracích 1/1 a 1/10 způsobili významné změny fyzikálních a mechanických vlastností dřeva at' už pozitivního, nebo negativního charakteru.

Klíčová slova

Termická úprava, barva dřeva, pevnost v tlaku, impregnace

Abstract

The thesis deals with the investigation of impacts of thermal modification, impregnation and their combination on selected physical and mechanical properties of beech wood. Specifically, the effect of thermal modification, impregnation and their combination on weight change, swelling and compressive strength was investigated. The test samples were divided into six groups according to the modification. One group of samples was left untreated, as a reference. The tests were carried out according to standardized procedures.

After processing the measured values and comparing the untreated and modified test samples, it was found that groups combining thermal modification of 210 °C and wood impregnation in concentrations of 1/1 and 1/10 caused significant changes in the physical and mechanical properties of the wood, whether positive or negative.

Keywords

Thermic treatment, wood color, compressive strength, impregnation

Obsah

1 Úvod	14
2 Cíl	16
3 Termická modifikace dřeva	17
3.1 Technologie termické modifikace.....	19
3.1.1 Thermowood.....	19
3.1.2 Plato	21
3.1.3 OHT	21
3.1.4 Bois Perdure	22
3.1.5 Rectification Process	22
3.2 Účinek termické modifikace na chemické vlastnosti dřeva.....	22
3.2.1 Hemicelulóza	23
3.2.2 Celulóza	23
3.2.3 Lignin	23
3.3 Účinek termické modifikace na fyzikální vlastnosti dřeva.....	24
3.3.1 Hustota.....	24
3.3.2 Vlhkost	24
3.3.3 Bobtnání	25
3.3.4 Barva.....	25
3.4 Účinek termické modifikace na mechanické vlastnosti dřeva.....	27
3.4.1 Pevnost a pružnost.....	27
3.4.1.1 Pevnost	27
3.4.1.2 Pružnost	28
3.4.2 Tvrdost.....	29
3.4.3 Houževnatost	29
4 Impregnace dřeva	30
4.1 Technologie impregnace.....	31
4.1.1 Impregnace fenolickou pryskyřicí.....	31

4.1.2	Acetylace	31
4.1.3	Furfurylace	33
4.1.4	KeyWood.....	33
4.1.5	DMDHEU.....	34
4.1.6	Indurite	34
4.1.7	Modifikační procesy pomocí monomerů.....	35
4.2	Účinek impregnace na vlastnosti dřeva	35
5	Charakteristika vybraných dřevin	39
5.1	Buk.....	39
5.2	Mínulý, současný a budoucí vývoj buku v Evropě.....	40
6	Metodika	43
6.1	Příprava zkušebních těles.....	43
6.2	Modifikace	44
6.3	Testování fyzikálních a mechanických vlastností.....	45
6.3.1	Změna hmotnosti	45
6.3.2	Bobtnání	46
6.3.3	Pevnost v tlaku	46
6.4	Zpracování výsledků v softwaru Statistica 12	49
7	Výsledky a diskuse	50
7.1	Hmotnost.....	50
7.2	Bobtnání.....	51
7.3	Pevnost v tlaku ve směru vláken.....	56
7.4	SWOT analýza vyvinutého materiálu.....	58
8	Závěr	63
9	Seznam literatury a použitých zdrojů	65

Seznam obrázků

Obr. 1: Produkce ThermoWoodu mezi lety 2001 a 2020 (https://ejulkaisu.grano.fi/grano/thermowood_kasikirja_eng#p=4)	19
Obr. 2: Příklad výrobního procesu Thermowood-D (https://ejulkaisu.grano.fi/grano/thermowood_kasikirja_eng#p=4)	20
Obr. 3: Buk (https://lesycr.cz/drevo/charakteristika-dreva-jednotlivych-drevin/buk/) ..	40
Obr. 4: Dřevo buku (https://lesycr.cz/drevo/charakteristika-dreva-jednotlivych-drevin/buk/)	40
Obr. 6: Značení zkušební tělesa (vlastní).....	43
Obr. 5: Značení zkušební tělesa (vlastní).....	43
Obr. 7: Zkušební tělesa po modifikaci (vlastní)	45
Obr. 8: Posuvné měřidlo KINEX ICONIC (vlastní).....	48
Obr. 9: Laboratorní váha KERN PSB/PBJ (vlastní).....	48
Obr. 10: Průběh změny hmotnosti v závislosti na modifikaci	50
Obr. 11: Průběh radiálního bobtnání v závislosti na modifikaci	52
Obr. 12: Průběh tangenciálního bobtnání v závislosti na modifikaci	53
Obr. 13: Průběh axiálního bobtnání v závislosti na modifikaci.....	54
Obr. 14: Průběh objemového bobtnání v závislosti na modifikaci.....	55
Obr. 15: Průběh pevnosti v tlaku v závislosti na modifikaci	57

Seznam tabulek

Tab. 1: Průměrné hodnoty změny hmotnosti pro jednotlivé modifikace (WPG)	50
Tab. 2: Průměrné hodnoty bobtnání	51
Tab. 3: Průměrné změny radiálního bobtnání	51
Tab. 4: Průměrné změny tangenciálního bobtnání	53
Tab. 5: Průměrné změny axiálního bobtnání	54
Tab. 6: Průměrné změny objemového bobtnání	55
Tab. 7: Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku	56
Tab. 8: Porovnání účinků modifikace na pevnost v tlaku pomocí Duncanova testu	57
Tab. 9: Běžná podoba SWOT analýzy	61
Tab. 10: SWOT analýza (TOWS matice) námi vyvinutého materiálu	62

Seznam použitých zkratk a symbolů

Např. – například

Atd. – a tak dále

Cca – přibližně

Obr. – obrázek

Tab. – tabulka

kg – kilogram

g – gram

mm – milimetr

cm – centimetr

% – procento

WPG – procentuální změna hmotnosti

Slovník termínů

Modifikace je úprava materiálu, za účelem změny námi sledovaných vlastností.

Termická úprava je proces, jehož podstatou je zahřívání daného materiálu, za spolupůsobení vzduchu, vodní páry, oleje či jiných látek, za účelem změny jeho vlastností.

Impregnace je proces, při němž je materiál nasycován jinou látkou za účelem změny jeho vlastností.

1 Úvod

Buk v posledních několika desetiletích vykazoval na našem území trend růstového poklesu. Tento trend byl způsoben zejména vysazováním smrkových monokultur, důsledkem čehož se smrk stal značně převyšující dřevinou na našem území. Data z posledních několika let však poukazují na opětovné rozšiřování buku. Data z roku 2020 ukazují, že buk zaujímá asi 9 % plochy našich lesů, což odpovídá zhruba 236 000 ha. (ÚHÚL 2020) Jako jednu z hlavních příčin pro tento vývoj v posledních letech můžeme uvést stále probíhající globální oteplování. Smrk je totiž dřevinou velmi náchylnou na sucha a vzhledem ke stálému zvyšování četnosti suchých a horkých období se předpokládá úbytek jeho růstu. Naproti tomu semenáčky buku jsou značně náchylné na nízké teploty a buk samotný zároveň špatně snáší podmáčené půdy. Proto se tedy v závislosti na pokračujícím zvyšování teploty a sucha předpokládá rozšiřování buku na naše území. Již dnes jsou na mnoha místech v Evropě postižených úbytkem smrkových monokultur vysazovány smíšené lesy s velkým podílem buku, který nabízí ve středoevropských oblastech vysoký reprodukční potenciál.

Buk byl již v dávných dobách hojně využívanou dřevinou. A i když byl ceněn zejména jako zdroj paliva, nelze mu vytknout jeho významnost ani v minulosti. V současné době je jeho využitelnost značně rozšířenější a nachází uplatnění především při výrobě dýh, aglomerovaných materiálů, či parket a velmi ceněn je také při výrobě ohýbaného nábytku. I když je buk z těchto důvodů označován za jednu z nejvýznamnějších evropských listnatých dřevin, jeho uplatnění zdaleka nedosahuje takové míry, jako tomu je u jiných dřevin, například právě smrku. Důvodem toho jsou hlavně špatné vlastnosti jeho dřeva. To poměrně silně sesychá a má nízkou rozměrovou stálost, při změně vlhkosti okolního prostředí. Také trpí nízkou trvanlivostí a odolností vůči biotickým činitelům. Vzhledem k tomu se bukové dřevo v exteriéru v podstatě nevyužívá. Právě to je důvodem, proč se v posledních letech stále častěji zmiňuje bukové dřevo společně s pojmem modifikace. Modifikací dřeva se snažíme zlepšit, popřípadě alespoň zachovat některé jeho vlastnosti a eliminovat vlastnosti nežádoucí. V případě buku je tato snaha zaměřena především na jeho větší využitelnost v exteriéru. Nejrozšířenější modifikací dřeva je bez pochyby modifikace zvýšenou teplotou. Ta je dnes už poměrně dobře prozkoumána a je známo že ačkoli zlepšuje některé vlastnosti dřeva, především potom biologickou odolnost proti škůdcům a rozměrovou stabilitu, má

termická modifikace negativní dopad na mechanické vlastnosti. Tento fakt vedl k myšlence kombinace více typů modifikací, jejichž dopad na vlastnosti dřeva není zdaleka tak prozkoumá.

Jako jedna z nejslibnějších je právě kombinace termické modifikace a impregnace struktury dřeva různými látkami. To bylo také důvodem volby tohoto tématu pro zpracování mé bakalářské práce. V rešerši práce je přiblížena problematika samotné termické modifikace a modifikace pomocí impregnace a dopad těchto úprav, nebo jejich kombinace na vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti námi vybrané dřeviny. Experimentální část práce se zaměřuje na měření, zpracování a vyhodnocení námi naměřených dat. Konkrétně byl zkoumán vliv modifikace na změnu hmotnosti, bobtnání a pevnost v tlaku ve směru vláken.

2 Cíle práce

Cílem práce je provést rešerši se zaměřením na vlastnosti termicky modifikovaného dřeva buku impregnovaného pryskyřicí a experimentální určení vlivu vybraných faktorů na fyzikální a mechanické charakteristiky termicky upraveného dřeva impregnovaného pryskyřicí.

3 Termická modifikace dřeva

Pojem termická úprava popisuje aktivní typ modifikace dřeva zvýšenou teplotou měnící jeho chemii, i fyzikální a mechanické vlastnosti. Hill ve své studii uvádí, že modifikace dřeva může být definována jako proces, který zlepšuje vlastnosti dřeva a vytváří nový materiál, který při likvidaci na konci životního cyklu výrobku nepředstavuje větší riziko pro životní prostředí než nemodifikované dřevo. (Hill 2006)

Termická modifikace je již dlouhou dobu uznávána jako metoda sloužící ke zlepšení vlastností rostlého dřeva, především se jedná o pozitivní vliv na rozměrovou stabilitu a odolnost vůči biotickým činitelům. Za tímto účelem je materiál vystaven teplotám mezi 160 °C a 260 °C, kdy dochází ke změnám v jeho chemické struktuře. Při teplotě nižších než 150 °C byly prokázány pouze nepatrné změny ve vlastnostech dřeva. Naopak, pokud hodnota teploty překročí 300 °C dochází k nežádoucí degradaci upravovaného dřeva. Z tohoto důvodu je teplota u moderních procesů tepelné úpravy omezena na 260 °C. (Militz, 2002; Hill, 2006; Esteves and Pereira, 2009)

Existuje celá řada dalších proměnných, které mají vliv na průběh i výsledek modifikačního procesu. Patří mezi ně následující:

- Atmosférické podmínky
- Druh použitého dřeva
- Rozměry dřeva
- Doba ošetření
- Teplota při úpravě
- Katalyzátory
- Počáteční vlhkost dřeva (Hill 2006)

Jako velká výhoda je brán i fakt, že oproti jiným povrchovým úpravám a modifikacím, při procesu termické modifikace nevznikají žádné chemické látky, které by ohrožovali životní prostředí. Tato skutečnost může být jedním ze zásadních faktorů při rozhodování, jaký druh modifikace dřeva zvolit. (Acosta et al. 2021)

Hlavním cílem při procesu termické modifikace je zlepšení některých vlastností oproti dřevu rostlému. Mezi tyto změny patří především:

- Zlepšení rozměrové stability
- Snížení hygroskopicity dřeva
- Lepší odolnost proti abiotickým a biotickým činitelům
- Nárůst modulu pružnosti v počátečních fázích úpravy (Hill 2006)

Již na počátku 20. století bylo provedeno několik různých studií zaměřujících se na otázky související s aplikací vysokých teplot na dřevo, kdy výsledky těchto studií posloužili jako základ pro rozvoj technologií tepelné úpravy dřeva používaných dnes. Do dnešního dne bylo provedeno nespočet výzkumů zabývajících se různými metodami modifikace dřeva, přičemž proces termická modifikace je v současnosti jednoznačně komerčně nejúspěšnější. (Acosta et al. 2021; Militz 2002)

Již Tieman v roce 1915 jako jeden z prvních popsal vliv vysokoteplotního ošetření na vlastnosti dřeva. Zahříval vysušené dřevo pomocí přehřáté páry o teplotě 150 °C po dobu 4 hodin a zjistil, že kromě změna barvy na tmavší odstín došlo ke snížení hydroskopičnosti, a tudíž ke zlepšení rozměrové stability. Proces měl však negativní dopad na pevnost dřeva. V roce 1936 poté použil Kollman vysoké teploty a zhušťování tlakem. To vedlo ke vzniku komerčního procesu používaném v Německu nesoucí název Lignoston. Další výzkumy byly prováděny například v USA, z nichž vzešli procesy známe pod názvy Staypack a Staybwood. Žádný z těchto výrobků však neměl na trhu velký úspěch pravděpodobně kvůli dostupnosti kvalitního dřeva, vysokým počátečním a provozním nákladům, velké spotřebě energie a nutným atmosférickým požadavkům při výrobě. Termická modifikace nebyla však zcela zapomenuta a počátkem 21. století se v Evropě začal objevovat větší zájem o problematiku HT. Tento narůstající trend odrážející rozšíření zájmu o dřevo ošetřené metodou HT lze přisuzovat snaze o zlepšení některých vlastností dřeva a problémům týkajících se nedostatku tvrdých dřevin. Dnes existuje 4-5 nejrozšířenějších technologií. Jedná se o Thermowood ve Finsku, PLATO v Holandsku, Rectification Process a Bois Perdure ve Francii a Oil Heat Treatment (OHT) v Německu. (Acosta et al. 2021; Esteves and Pereira 2009; Hill 2006)

V současné době používané procesy HT se dají rozdělit do 3 stupňů.

- Předehřátí dřeva na teploty 180 °C až 230 °C při nízké koncentraci kyslíku, aby se zabránilo spalování dřeva.

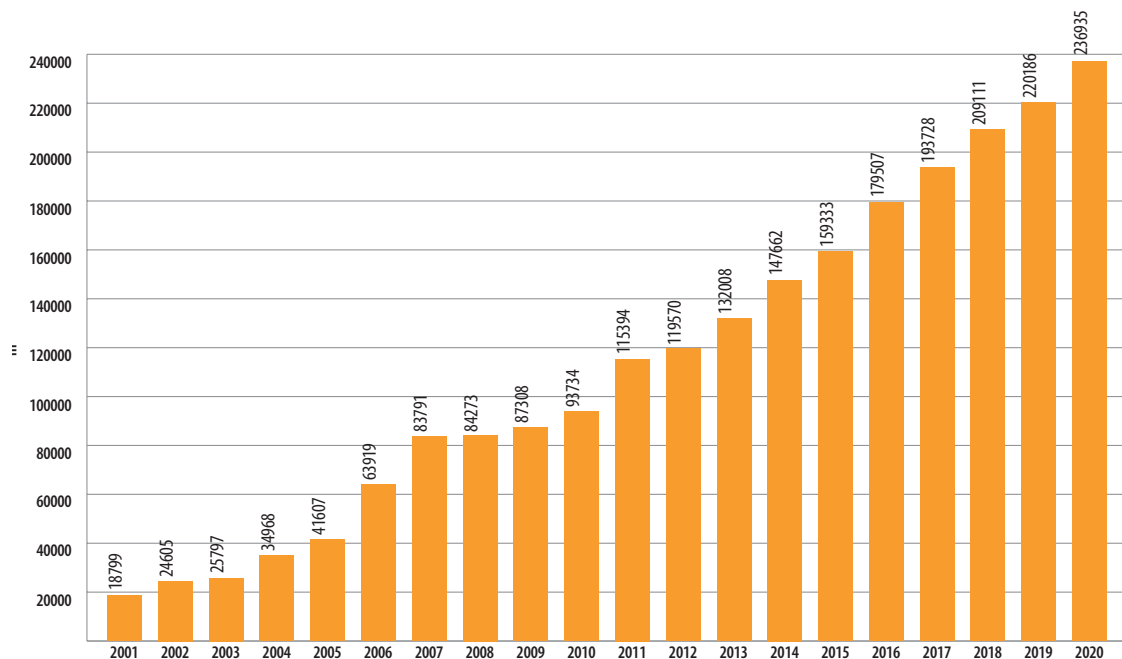
- Při samotném procesu termické úpravy je dřevo po určitou dobu vystaveno konstantní teplotě.
- Na konci procesu probíhá kondicionování, kdy je teplota upraveného dřeva snižována na teploty nižší než 100 °C, aby nedošlo ke spalování.

(Acosta et al. 2021)

3.1 Technologie termické modifikace

3.1.1 Thermowood

Technologie vyvinutá finskou výzkumnou a technologickou organizací byla patentována roku 1997 a dnes se jedná zřejmě o nejúspěšnější technologii s tímto zaměřením v Evropě s přibližně 90 % podílem na trhu s termicky upraveným dřevem v roce 2007. (Esteves and Pereira, 2009; Acosta, Montoya Arango and da Silva, 2021)



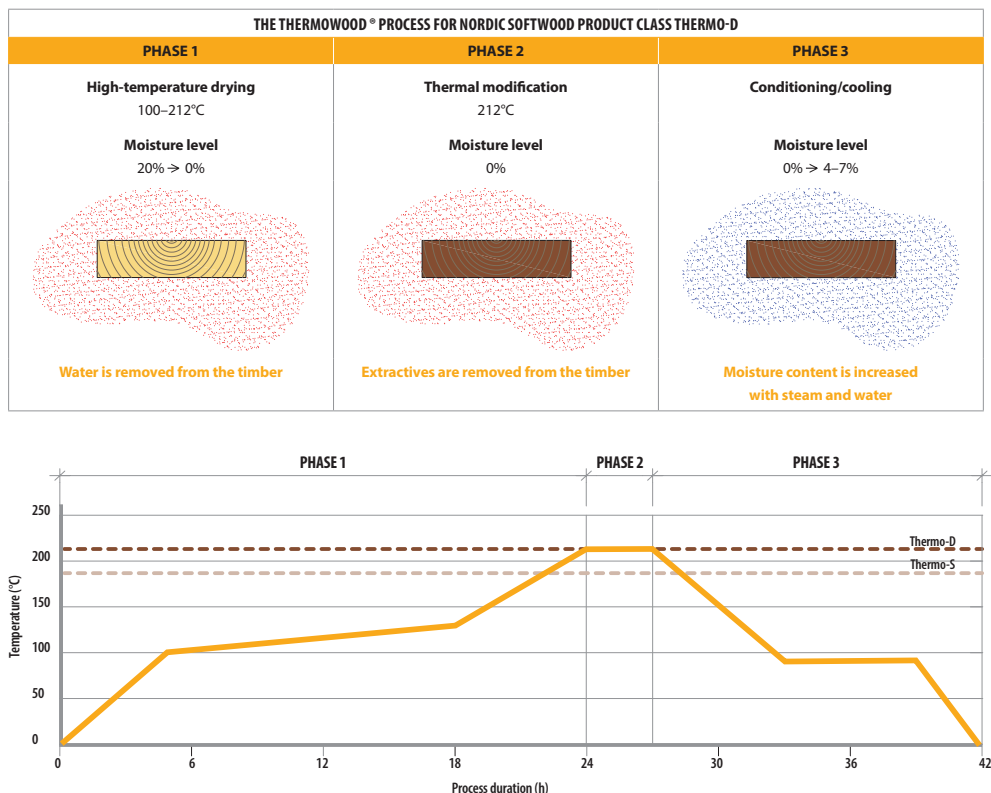
Obr. 1: Produkce ThermoWoodu mezi lety 2001 a 2020
https://ejulkaisu.grano.fi/grano/thermowood_kasikirja_eng#p=4

Proces se běžně dělí do 3 fází.

První fáze zajišťuje snížení obsahu vody ve dřevě téměř na nulu. K tomuto účelu je dřevo umístěno v komoře, kde se pomocí tepla a páry (zabraňuje spalování dřeva) rychle zvyšuje teplota na úroveň 100 °C. Následným postupným zvyšováním teploty na 130 °C se dosáhne téměř nulové vlhkosti dřeva.

Následuje proces samotné termické úpravy, kdy se teplota uvnitř pece zvyšuje na hodnoty v rozsahu 185 °C až 230 °C. Jakmile je požadovaná teplota dosažena, zůstává konstantní po dobu 2-3 hodin v závislosti na plánované aplikaci výsledného produktu.

V poslední fázi je dřevo ochlazováno na teplotu 80-90 °C a následně hydratováno na přibližně 5 % až 7 %. Ochlazování probíhá kontrolovaným způsobem, aby nedocházelo k praskání povrchových a vnitřních částí dřeva. Celý tento proces vyžaduje zhruba 5 až 15 hodin. (Esteves and Pereira 2009; Acosta et al. 2021; Militz 2002)



Obr. 2: Příklad výrobního procesu Thermo-D
(https://ejulkaisu.grano.fi/grano/thermowood_kasikirja_eng#p=4)

3.1.2 Plato

Jedná se o technologii vyvinutou roku 1972 v Nizozemsku výzkumníkem Hermanem Ruyterem. PLATO (providing lasting advanced timber option) neboli „dřevo trvale poskytující pokročilé vlastnosti“ je proces tepelné úpravy dřeva, při němž se jako topné médium používá vodní pára, nebo horký vzduch a můžeme ho rozdělit do čtyř kroků. Do prvního kroku zvaného hydrotermolýza vstupuje dřevo čerstvé, popřípadě sušené v exteriéru. Dřevo je ve vlhkém prostředí a za zvýšeného tlaku vystaveno teplotám od 160 °C do 190 °C po dobu 4 až 5 hodin. Poté následuje fáze, která se dá rozdělit na dva kroky, kdy je dřevo během 3-5 dní vysušeno na vlhkost přibližně 10 % a následně během 14 až 16 hodin vytvrzováno při zvýšených teplotách pohybujících se mezi 170 °C a 190 °C. V posledním kroku se dřevo ochlazuje a zvyšuje se jeho rovnovážná vlhkost v závislosti na okolních podmínkách. Celý tento proces a jeho jednotlivé aspekty závisí na mnoha faktorech. Mezi ně může patřit například druh použitého dřeva, tloušťka a tvar, konečné použití modifikovaného dřeva a mnoho dalších. (Esteves and Pereira 2009; Acosta et al. 2021; Militz 2002)

3.1.3 OHT

Proces OHT neboli „oil-heat treatment“ vyvinutý a používaný v Německu se liší oproti již zmíněným procesům v používaném topném médiu, které zde tvoří olej o vysoké teplotě. Důvodem volby oleje jako topného média může být jeho schopnost rychlého a rovnoměrného přenosu tepla ve dřevě a zároveň snižování obsahu kyslíku, aby nemohlo dojít k nechtěnému vzplanutí. Konkrétně se používá surový rostlinný olej, který však i přes své dobré teplo vodivé vlastnosti skýtá dvě hlavní nevýhody. První z nich představuje zápach oleje při samotném procesu tepelné úpravy a druhou je váha absorbovaného oleje. Ta způsobuje nárůst hmotnosti zhruba o 50-70 %. Proces probíhá v uzavřené nádobě tzv. procesní, do které je po umístění daného modifikovaného prvku přepuštěn ze zásobní nádoby olej do nádoby procesní. Zde se udržuje po dobu 2-4 hodin teplota dřeva mezi 180 °C a 220 °C v závislosti na rozměrových parametru vstupního produktu a požadovaných výstupních vlastnostech. Po skončení fáze samotné termické úpravy se olej vrací zpět do zásobní nádoby. Celý proces úpravy trvá přibližně 18 hodin. Tato hodnota odpovídá rozměrům použitého výřezu 100 x 100 mm o délce 4 metrů a je v ní promítnut čas potřebný pro zahřátí výřezu na požadovanou teplotu i čas potřebný

na chlazení výsledného produktu. (Esteves and Pereira 2009; Acosta et al. 2021; Militz 2002)

3.1.4 Bois Perdure

Tato technologie představuje jeden ze dvou hlavních typů výroby termicky modifikovaného dřeva ve Francii. Je založen na čtyřech hlavních fázích, přičemž v první fázi je dřevo předehráno na teplotu 110 °C až 120 °C a tím je docíleno odpaření volné vody ve dřevě. Ve druhém stupni označovaném jako sušení, je teplota zvýšena na hodnoty mezi 200 °C a 240 °C, čímž se zároveň zajistí odpaření zbylé vody z předchozího stupně. Celý tento proces je zajištěn pomocí horké páry a spalín. Třetí stupeň odpovídá termické modifikaci, kdy je snížen obsah kyslíku, aby se zabránilo hoření. V poslední fázi probíhá ochlazování dřeva, při němž se snažíme docílit nejvyšší možné homogenosti ochlazování materiálu. (Esteves and Pereira 2009; Acosta et al. 2021; Militz 2002)

3.1.5 Rectification Process

Druhý hlavním typem výroby termicky modifikovaného dřeva nacházejícího se ve Francii je Rectification proces. Od ostatních uvedených procesů se liší ve dvou aspektech, kdy prvním je prostředí, ve kterém se celý proces úpravy odehrává. Dřevo je při volbě této metody modifikováno v dusíkaté atmosféře bránící hoření dřeva s obsahem kyslíku maximálně 2 %. V případě této technologie vstupuje dřevo o vlhkosti přibližně 12 % do procesu úpravy, který má pouze jednu fázi. Dřevo je pomalu zahříváno při teplotách v rozmezí 210 °C a 240 °C. Takto upravené dřevo se prodává s ochrannou známkou Retiwood. (Esteves and Pereira 2009; Acosta et al. 2021; Militz 2002)

3.2 Účinek termické modifikace na chemické vlastnosti dřeva

Při působení zvýšených teplot nastávají významné změny v chemické struktuře dřeva až při teplotách od 180 °C do 250 °C. Právě v tomto rozmezí teplot operují běžně používané technologie termické úpravy. Toto tvrzení však závisí na mnoha faktorech, jako jsou upravovaný materiál, nebo procesní parametry samotného experimentu, zejména pak doba a míra ohřevu a atmosférické podmínky. V závislosti na to je obtížné určit přesné míry degradace jednotlivých chemických složek. Hodnoty teplot vyšší než

250 °C mají za následek vznik oxidu uhličitého a dalších produktů pyrolýzy, právě při těchto teplotách totiž nastává zuhelnatění dřeva. Chemie tepelné modifikace je složitou problematikou, která není zdaleka zcela pochopena. Je však zřejmé, že vlivem zvyšující se teploty dochází k výrazným změnám v chemii dřeva. Méně známe jsou ale přesné hodnoty, ve kterých se jednotlivé reakce stávají dominantními. (Kačík and Kačíková 2010; Hill 2006)

3.2.1 Hemicelulóza

Při termické modifikaci se jedná o první chemickou složku, která prochází změnou. Dochází k tomu již při poměrně nízkých teplotách zhruba 100 °C. Ve dřevě nastává rozklad polysacharidů. Pokles sacharidů se odvíjí od druhu upravované dřeviny a podmínek při procesu termické úpravy, kdy množství sacharidů klesá úměrně s teplotou a časem úpravy. Je také známo, že tvrdé dřeviny jsou v tomto ohledu méně tepelně stabilní nežli dřeviny měkké. To lze přičíst rozdílnému chemickému složení tvrdých a měkkých dřevin. V tvrdém dřevě se nachází větší podíl pentosanů, které jsou náchylnější k tepelné degradaci oproti hexosanům vyskytujících se ve větší míře v měkkém dřevě. Kromě toho mají tvrdé dřeviny obecně vyšší podíl hemicelulózy. (Kačík and Kačíková 2010; Hill 2006)

3.2.2 Celulóza

Krystalická struktura celulózy má za následek její vyšší odolnost vůči působení termické úpravy oproti hemicelulózám. Konkrétně degraduje krystalická celulóza až v teplotním rozmezí 300 °C až 340 °C. (Kačík and Kačíková 2010; Hill 2006)

3.2.3 Lignin

Lignin představuje nejodolnější chemickou složku dřeva, při jeho vystavení vyšším teplotám. K významným degradačním změnám dochází až od teploty 280 °C se silnou závislostí na teplotě a době jejího působení. Také bylo zjištěno, že lignin v měkkém dřevě disponuje menší náchylností vůči degradaci. (Kačík and Kačíková 2010; Hill 2006)

3.3 Účinek termické modifikace na fyzikální vlastnosti dřeva

3.3.1 Hustota

Jednou z nejvýznamnějších charakteristik značně ovlivňujících fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva je jeho hustota. I přes hydrofobickou povahu dřeva jakožto materiálu a fakt, že hodnoty hmotnosti a objemu, jsou výrazně ovlivňovány vlhkostí, se dá hustota považovat za nejlepší kritérium pro hodnocení vlastností dřeva. Je dána podílem hmotnosti dřeva a jeho objemu. V praxi rozeznáváme několik druhů hustoty. Hustotu dřevní substance, hustotu dřeva, redukovanou hustotu dřeva a konvenční hustotu dřeva. (Horáček 1998)

Hustota při termické modifikaci klesá, a to úměrně se zvyšující se teplotou a dobou modifikace. Je to zapříčiněno především ztrátou vázané vody, odbourání hemicelulózy i odpařením některých doprovodných látek. (Hill 2006)

3.3.2 Vlhkost

Dřevo řadíme mezi materiály hydrofobické. To znamená, že je schopné přijímat a odevzdávat vodu podle vlhkosti okolního prostředí, a to jak ve skupenství kapalném, tak plynném. Z pohledu vazby vody na dřevní hmotu a jejího uložení ve dřevě můžeme vodu rozdělit následovně:

a) Chemicky vázaná voda

Jedná se o vodu, která je součástí chemických sloučenin dřeva, a proto ji ze dřeva nelze odstranit sušením, ale pouze spálením. Z toho důvodu je ve dřevě přítomná i při jeho nulové absolutní vlhkosti. Z pohledu fyzikálních a mechanických vlastností nemá žádný význam. (Horáček 1998; Matovič 1993)

b) Vázaná voda

Nazýváme jí také vodou hydrofobickou a nachází se v buněčných stěnách, kde je vázána vodíkovými můstky na OH hydroxylové skupiny amorfní části celulózy a hemicelulózy. Ve dřevě je přítomna při vlhkosti v průměru 0-30 %. Z toho důvodu má největší vliv na fyzikální a mechanické charakteristiky dřeva. (Horáček 1998; Matovič 1993)

c) Volná voda

Volná neboli kapilární voda vyplňuje mezibuněčné prostory a lumény buněk dřeva. Určitý vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva má, tento vliv je však o poznání menší v porovnání s vodou vázanou. (Horáček 1998; Matovič 1993)

Jako vlhkost je běžně označován vztah mezi hmotností vody přítomné ve dřevě a samotnou hmotností dřeva. Na vlhkost můžeme pohlížet dvěma způsoby a na základě nich rozeznáváme vlhkost absolutní a vlhkost relativní. Vlhkost absolutní vyjadřuje množství vody, vztažené k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu a využívá se především při fyzikálně mechanických charakteristikách dřeva. Vlhkost relativní se uplatňuje zejména při nákupu a prodeji surového dříví, kde je zapotřebí znát procentuální zastoupení vody v celkovém množství mokrého dřeva. (Horáček 1998; Matovič 1993)

3.3.3 Bobtnání

Jedná se o jev, kdy dřevo zvětšuje své rozměry v závislosti na množství přijaté vázané vody v rozsahu od 0 % - MH. Jev se odehrává v buněčné stěně, kde dochází k přibližování a oddalování fibrilární struktury, čímž se mění rozměry jednotlivých elementů dřeva a tím i dřeva samotného. Velkou roli hraje především sekundární vrstva buněčné stěny. V ní je umístěno až 90 % všech fibril, jejichž orientace je hlavním faktorem při velikosti bobtnání. Podélná orientace fibril v S2 vrstvě s odklonem od průběhu vláken pouze 15-30° zapříčiňuje bobtnání dřeva napříč vláken, zatím co podélné bobtnání je téměř zanedbatelné. (Horáček 1998)

Termicky upravené dřevo vykazuje lepší rozměrovou stabilitu oproti neošetřenému dřevu. Rozměrová stabilita se zvyšuje s rostoucí teplotou a dobou modifikace, přičemž její míra závisí na typu použité modifikace. (Hill 2006)

3.3.4 Barva

Matovič 1993 popisuje barvo jako určitý zrakový vjem, který závisí na spektrálním složení odražených světelných paprsků od povrchu dřeva. Přesným měřením těchto hodnot se zabývá obor zvaný kolorimetrie. Ta zkoumá metody sloužící k určení barvy a odstínu dřeva. Existují tři základní ukazatele, které se používají pro charakteristiku barvy dřeva. Jedná se o tón, čistotu a světlost. (Matovič 1993)

U dřeva jsou hlavními faktory, které určují výslednou barvu vnímanou lidským okem, jeho chemické složky. Těmito chemickými složkami se rozumí celulóza, hemicelulóza a lignin. Opomenuty nesmí zůstat však ani extraktivní látky vyskytující se ve dřevě, právě ty totiž určují výslednou barvu dřeva. Přestože největší zastoupení má ve dřevě celulóza bílé barvy, často je překryta barvou právě méně zastoupených extraktiv. Z toho vyplývá, že je mnohem důležitější faktor barevnosti a výraznosti nežli objemový podíl. (Horáček 1998)

Barva je velmi důležitou vlastností dřeva, pokud chceme charakterizovat jeho vzhled. V komerčním odvětví hraje významnou roli například při výrobě sportovních potřeb, hudebních nástrojů, uměleckých děl a v neposlední řadě při výrobě nábytku. Jedná se také o zohledňovaný znak při určování druhu dřeva a diagnostice jeho vad. Faktorem předurčujícím barvu dřeva jsou klimatické podmínky. Příkladem může být porovnání bledého odstínu dřevin mírného pásu s výraznou a intenzivní barvou dřevin tropického pásu, pokrývající o mnoho větší část barevné škály. Barvení pomocí chemikálií a moření jsou další metody, jimiž se provádí úprava barvy dřeva, přičemž se používají hlavně v nábytkářství. (Matovič 1993)

Při ohřevu dřeva nastává hydrolyza hemicelulóz za vzniku rozpustných cukrů. Teplota aplikovaná na dřevo následně vzniklé cukry karamelizuje, což způsobuje ztmavnutí dřeva. Zvyšující se teplota zároveň proces degradace hemicelulóza urychluje. To má za následek, že se při modifikaci barva mění do tmavších odstínů se zvyšující se teplotou. Vliv na výsledný odstín tepelně modifikovaného dřeva má kromě teploty i doba ošetření. Studie však uvádí, že teplota má na barevné změny větší vliv než doba, po kterou je dřevo teplotě vystaveno. Mimo faktoru teploty a času hraje velkou roli i zvolený druh dřeva a jeho hustota. Bylo také zjištěno, že pokud proces úpravy probíhá ve vzduchu jsou barevné změny výraznější, oproti použití dusíkaté atmosféry. Ayadi a jeho spolupracovníci provedli zrychlenou zkoušku odolnosti vůči povětrnostním vlivům a dospěli k závěru, že tepelně modifikované dřevo disponuje v těchto podmínkách větší barevnou stálostí nežli rostlé dřevo. Vyblednutí dřeva však zabránit přesto nelze. (Mitani 2013; Baysal et al. 2014; Hill 2006)

3.4 Účinek termické modifikace na mechanické vlastnosti dřeva

3.4.1 Pevnost a pružnost

3.4.1.1 Pevnost

Vlastnost, která udává schopnost dřeva odolat jeho porušení vlivem mechanického namáhání. Jako ukazatel popisující tuto vlastnost slouží mez pevnosti. Ta je charakterizována jako maximální hodnota zatížení dřeva bez jeho porušení. Běžně je stanovována pro tlak, tah, smyk, ohyb a krut. U rostlého dřeva jsou tyto charakteristiky určovány podél vláken, nebo napříč vláken a u materiálů aglomerovaných se odlišuje působení síly kolmo na rovinu desky, nebo ve směru roviny desky. (Matovič 1993)

Obecně má termická modifikace za následek pokles pevnosti dřeva. Tento pokles je silně ovlivněn použitou technologií termické modifikace. Bylo také zjištěno, že tvrdé dřeviny vykazují znatelnější pokles pevnosti než dřeva jehličnanů při ošetření ve stejných podmínkách. (Hill 2006)

Pevnost v tlaku ve směru vláken

Při působení tlaku na těleso ve směru vláken nastává deformace, jejíž výsledkem je zkrácení délky tělesa. Jde o velmi důležitou vlastnost závisující na mnoha faktorech. Vliv zvyšující se vlhkosti na tlakovou pevnost je negativní. Pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken se snižuje se stoupající vlhkostí, a to až do meze hydroskopicity. Tabulky uvádí změnu pevnosti o 4 % při změně vlhkosti o 1 %. Naopak dřeviny s vyšší hustotou mají i vyšší tlakovou pevnost, kdy vztah mezi oběma veličinami je lineární. Důležitým parametrem je také samotná stavba dřeva, především poté směr vláken ve dřevě. Uvádí se, že při odklonu dřevních vláken o 15° může nastat pokles pevnosti až o 20 %. Změnu v pevnosti může způsobit i přítomnost suků. Výsledný vliv na pevnost v tlaku má jejich četnost, rozměry i umístění ve dřevě. Obecně je uznáván fakt, že jejich přítomnost obvykle pevnost dřeva ve směru vláken snižuje. (Matovič 1993)

Zvýšená teplota má na pevnost v tlaku negativní účinky. K trvalému snížení pevnosti však dochází pouze pokud je dřevo vystaveno zvýšené teplotě dlouhodobě a její hodnota je vyšší než 65-70 °C. Při teplotách nad 200 °C nastává prudký pokles pevnosti. (Matovič 1993)

Pevnost v tlaku napříč vláken

S tímto typem zatížení se setkáváme v praxi často. Pozorovat jej můžeme například u prážců, nebo při lisování dřeva. Jsou známy dva možné způsoby deformace, ke kterým při tlakovém zatížení napříč vláken dochází. Prvním je deformace jednofázová. Charakterizuje ji stlačení elementů jarního i letního dřeva současně, které je zapříčiněno působením tlaku v tangenciálním směru. Jednofázová deformace je typická pro jehličnaté dřeviny a dřeviny s kruhovitě pórovitou strukturou vyjímaje dubu. Třífázová deformace se vyskytuje u všech našich dřevin s výjimkou dubu při tlaku v radiálním směru a pro listnaté dřeviny s roztroušeně pórovitou stavbou při tlaku ve směru tangenciálním. Odlišnosti hodnot při zatížení v radiálním a tangenciálním směru jsou pouze minimální. (Matovič 1993)

Existují tři druhy pevnosti v tlaku napříč vláken, které se běžně rozlišují:

- Tlak na celou plochu
- Tlak na část délky
- Tlak na část délky a šířky (Matovič 1993)

Hlavní vlivy s dopadem na pevnost dřeva v tlaku napříč vláken jsou vlhkost, hustota, stavba dřeva a teplota. Při stoupající vlhkosti do meze hygroscopicity se projevuje negativní účinek na pevnost v tlaku. Podle normy dochází při změně vlhkosti o 1% pokles pevnosti o 3,5 %. Vliv hustoty, stavby a teploty je podobný jako tomu je u pevnosti v tlaku ve směru vláken. (Matovič 1993)

3.4.1.2 Pružnost

Pokud není překročena mez pevnosti, má dřevo schopnost po odstranění vnějších sil zpětně nabývat svých původních rozměrů a tvarů. Tuto jeho vlastnost popisuje pružnost dřeva. V případě pouze krátkodobého působení zatížení je pružnost charakterizována modulem pružnosti, modulem pružnosti v smyku a koeficientem příčné deformace. (Matovič 1993)

V mnoha studiích bylo prokázáno, že při termické modifikaci došlo na krátkou dobu ke mírnému zvýšení modulu pružnosti a následně k jeho poklesu. Přičemž rychlost poklesu je závislá na teplotě požití modifikace a dalších podmínkách. (Hill 2006)

3.4.2 Tvrdość

Tvrdość je další důležitou vlastností dřeva, která je termickou úpravou do určité míry ovlivněna. Představuje schopnost materiálu odporovat vnikání cizího tělesa do jeho struktury. (Matovič 1993)

K jejímu určení se užívá dvou nejrozšířenějších metod, podle Brinela a podle Jenky. V obou metodách je do dřeva vtlačován cizí předmět. Za pomoci použité síly a velikosti otlačené plochy je poté vypočítána výsledná hodnota tvrdosti. Hustota a vlhkost dřeva, jsou hlavními faktory, na kterých výsledné hodnoty tvrdosti závisí. S nárůstem vlhkosti do meze hygroskopicity se tvrdost snižuje. Konkrétně je udáváno, že změna vlhkosti o 1 % má za následek změnu tvrdosti o 3 %. Vyšší hustota dřeva odpovídá vyšší naměřené tvrdosti vzorků. (Matovič 1993)

3.4.3 Houževnatost

Udává schopnost dřeva odolávat porušení v důsledku dynamického zatížení rázem a je charakterizována rázovou houževnatostí v ohybu. Rozhodující je tzv. přerážecí práce neboli práce nutná na přeražení vzorku. Její hodnoty se u většiny dřevin stanovují v tangenciálním směru. Některé jehličnaté dřeviny a dřeviny s kruhovitě pórovitou stavbou však vykazují značně vyšší rázovou houževnatost v radiálním směru (o 20-50 %), k čemuž dochází v důsledku rozdílné skladby jarního a letního dřeva. Pro tyto dřeviny se provádí zkouška rázové houževnatosti v obou příčných směrech. Významný vliv na hodnoty rázové houževnatosti má vlhkost dřeva. Literatura uvádí, mírné snížení rázové houževnatosti při stoupající velikosti dřeva v rozmezí od 5 % do 25 %. Poté se její hodnoty již nemění. Rozdíly pozorujeme i v závislosti na volbě druhu dřeviny. U listnatých dřevin je rázová houževnatost průměrně 2x vyšší, než je tomu u dřevin jehličnatých. (Matovič 1993)

4 Impregnace dřeva

Impregnaci můžeme definovat jako proces, při kterém dochází k impregnaci buněčné stěny dřeva jednou nebo kombinací chemických látek, vedoucí ke vzniku materiálu uzamčeného v buněčné stěně. (Hill 2006)

Své uplatnění získává impregnace v případech, kdy je nutné zvýšit přirozenou trvanlivost dřeva a volba vhodné dřeviny, nebo aplikace jiných druhů ochrany není dostačující. Konkrétně je tento druh ochrany využívá především u výrobků, které jsou dlouhodobě vystaveny přímému kontaktu se zemí či vodou. Je známo mnoho technologií a postupů aplikace impregnační látky do dřeva lišící se jak procesními podmínkami, tak samotnou impregnační látkou. Základní dělení je na technologie beztlakové a technologie tlakové. (Reinprecht and Pánek 2016)

Velkou část prvních publikací zabývající se problematikou impregnace uvedl Stammen společně se svými spolupracovníky. Z této studie vzešli dva nové produkty na bázi dýhy, Impreg a Compreg. Jejich rozsáhlejším popisem se zabývám v kapitole 4.1.1 této práce. (Hill 2006)

Stammen a Sborg také uvedli tři základní kritéria nutná pro zajištění účinné impregnace:

- Molekuly pryskyřice musí být dostatečně malé, aby mohl být zajištěn jejich vstup do buněčné stěny.
- Molekuly pryskyřice by měly být rozpustné v polárních rozpouštědlech, aby byla zajištěna jejich difuze dovnitř buněčné stěny i v jejím nabobtnalém stavu.
- Molekuly pryskyřice by měly disponovat dobrou polaritou. (Hill 2006)

Aby došlo k plné penetraci buněčné stěny impregnovanou látkou, je nutné zajistit pro tento proces dostatek času. Množství studií uvádí jako ideální dobu několik dní. Je nutno uvést, že pokud je dřevo při procesu impregnace vystaveno jinému než atmosférickému tlaku, tyto hodnoty se mnohou významně liší. (Hill 2006)

Přítomnost impregnačních látek v buněčné stěně, jenž je výsledkem této úpravy ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Mezi ty nejdůležitější patří:

- Zvyšuje se rozměrová stabilita upraveného dřeva

- Snižuje se hydroskopicita dřeva, neboť volný prostor uvnitř buněčných stěn je vyplněn impregnační látkou.
- Dochází k zablokování mikroporů buněčné stěny, což vede ke snížení nasáklivosti dřeva. (Altgen et al. 2020; Hill 2006)

4.1 Technologie impregnace

4.1.1 Impregnace fenolickou pryskyřicí

Proces, při kterém jsou dřevěné dýhy impregnovány ve vodě rozpustnými fenolickými pryskyřicemi představuje první z uvedených technologií impregnací dřeva. Z několika výzkumů vzešli dva produkty pod názvem Impreg a Compreg lišící se vytvrzovací fází. Po impregnaci následuje fáze susění u které je důležité zachování dostatečně nízké teploty aby nedocházelo k předčasnému vytvrzování pryskyřice. Vysušené dýhy jsou poté vytvrzovány, kdy při výrobě produktu Impreg je použito pouze vyšších teplot a pro Compreg je kromě vyšších teplot aplikován i zvýšený tlak. (Stamm a Seborg, 1941)

Dřevo impregnované fenolickou pryskyřicí bylo značně využíváno za druhé světové války, a to zejména na výrobu letadlových vrtulí. Tento fakt se však kolem poloviny 20. století mění s vývojem nových syntetických polymerů a kompozitů, které takto upravené dřevo nahradili. Dnes stále probíhá výroba produktu Compreg v řadě výrobních závodů po celém světě. Výrobky upravené touto metodou disponují velmi dobrou rozměrovou stabilitou, vysokou pevností v tlaku, tvrdostí a odolností proti oděru. (Hill 2006)

4.1.2 Acetylace

První experiment s acetylací dřeva provedl v Německu Fuchs už v roce 1928. Práce, která posunula tuto technologii na produkční úroveň byla zpracována až během 90. let v Nizozemsku Militzem a jeho kolegy. Odůvodnění účinnosti této modifikace je stále i dnes diskutována. Mnoho vědců se domnívá, že acetylace způsobuje snížení počtu hydroxylových skupin, které na sebe váží vodu pomocí vodíkových vazeb, a tak snižují rovnovážný obsah vlhkosti a bod nasycení vláken. Jako důvod účinnosti modifikace je

tedy upřednostňováno zjištění, že vlhkost dřeva modifikovaného procesem acetylace je příliš nízká pro jeho napadení houbami. (Sandberg et al. 2017)

Velkým současným výrobcem acetylovaného dřeva je společnost Accsys Technologies v Nizozemsku. Materiál je na trh uváděn pod obchodním názvem Accoya a na jeho výrobu se používá dřevo borovice a olše. Svě uplatnění dnes nachází především ve výrobě exteriérových oken a dveří, palubek, obkladů a jiných stavebních aplikacích. Do značné míry byly prokázány fyzikální, mechanické a biologické vlastnosti tohoto materiálu za pomoci několika studií. Ty jsou diskutovány následovně:

- Acetylované dřevo vykazuje zvýšenou biologickou odolnost. Biologická trvanlivost dřeva byly vylepšeny na nejvyšší třídu trvanlivosti (třída 1), podobně jako extrémně trvanlivé tropické druhy.
- Výrazně se snížil bod nasycení vláken až pod 15 % a buněčná stěna vykazovala lepší vyloučení vlhkosti. V důsledku toho jsou vlastnosti bobtnání a smršťování sníženy o 70-80 % ve srovnání s neošetřeným dřevem. Důvodem je, že buněčná stěna je naplněna chemicky vázanými acetylovými skupinami, které využívají prostor uvnitř buněčné stěny namísto molekul vody.
- Bylo prokázáno, že acetylované dřevo je mimořádně odolné vůči některým druhům termitů.
- Při koncentracích > 20 % bylo zjištěno, že dřevo Accoya má vynikající odolnost vůči mořským červům i po 16 letech expozice. (Sandberg et al. 2017)
- Acetylované dřevo může být o 15-30 % tvrdší než neošetřené dřevo. (Rowell 2012)
- Acetylační technologie má zanedbatelný dopad na mechanické vlastnosti materiálu.
- Acetylované dřevo vykazuje mnohem nižší uhlíkovou stopu než ocel, nebo beton. (Sandberg et al. 2017)

Vzhledem ke zmíněným výhodám má tento materiál velký potenciál pro jeho rozšíření a používání v řadě aplikací. Jediné jeho současné omezení spočívá v malém výběru využitelných dřevin, který je třeba rozšířit. (Sandberg et al. 2017)

4.1.3 Furfurylace

Nejúspěšnější z procesů pochází původem z USA a nese název Furfurylace. V roce 1950 začal s výzkumem této technologie Alfred J. Stamm, což vedlo k její industrializaci v roce 1960. Jednalo se tehdy o produkty jako rukojeti nožů, nebo desky laboratorních stolů. V následujících několika desetiletích docházelo k řadě výzkumů, ale žádný z nich však nedokázal zajistit produktu místo na trhu. To se podařilo až roku 2000 a dnes existují na trhu dva produkty, každý s jinými vlastnostmi a použitím. Jedná se o Kebony Clear a Kebony Character. Jako impregnační médium se používá směs katalyzátoru a furfuryalkoholu, který se vyrábí ze zemědělských odpadů, jako je cukrová třtina a kukuřičné klasy. Proces výroby se skládá z impregnačního kroku, po kterém následuje mezisúšení. Materiál je dále vytvrzován a v konečné fázi sušen v peci. (Hill 2006)

Takto modifikovaný dřevěný výrobek má prokázané následující vlastnosti:

- Zvýšená biologická trvanlivost dřeva na "třídu 1".
- Lepší mechanické vlastnosti dřeva, kromě odolnosti proti nárazu. Furfurylátové dřevo je charakterizováno větší tvrdostí, pružností a pevností v ohybu ve srovnání s neošetřeným dřevem. Je však také křehčí.
- Kebonové dřevo vykazuje silnou rozměrovou stabilitu a odolnost vůči povětrnostním vlivům a jeho hodnoty bobtnání a smršťování vody jsou o více než 50% nižší než u neošetřeného dřeva.
- Furfurylátové dřevo je extrémně odolné vůči mořským červům při vysokých úrovních (>50 %) procentuálního přírůstku hmotnosti. (Westin et al. 2016)
- Nedávné studie týkající neprokázaly žádnou významnou toxicitu materiálu, a to ani při spalování.
- Furfurylátové dřevo je „zelený“ dřevěný výrobek, který má na skandinávském trhu ekologickou značku s názvem „Swan“.

Furfurylace dřeva je proto považována za bezpečný proces ve vztahu k životnímu prostředí. (Sandberg et al. 2017)

4.1.4 KeyWood

V rámci projektu „Eco-binders“ byl podle Larssona-Brelida v roce 2013 vyvinut nový produkt podobající se furfurylátovému dřevu nesoucí název KeyWood. Jako

impregnační látka je používán reaktant s malým množstvím tri-hydroxy-methylfuranu (THMF) a furfurylalkoholu. Výsledný produkt má ale v porovnání s furfurylátovým dřevem vyšší rovnovážný obsah vlhkosti při stejné úrovni relativní vlhkosti a vysoké teploty potřebné pro vytvrzení způsobují problémy s praskáním a křehkostí materiálu. Zřejmě z těchto důvodů byly pozorovány pouze malé hodnoty objemu výroby, a i další vývoj tohoto procesu je nejasný. (Sandberg et al. 2017)

4.1.5 DMDHEU

Tato technologie byla převzata z úpravy nedřevěných systémů a spočívá v impregnaci dřeva činidlem 1,3-dimethylol-4,5-dihydroxy-ethylenurea (DMDHEU). První hlášení s pozitivními výsledky o použití DMDHEU k ošetření dřeva podal roku 1993 Militz. Z dalších výzkumů vzešel v Německu komerční proces pod obchodním názvem Belmadur. Při tomto procesu, který je považován za inovační dochází k impregnování typicky borovicového dřeva pod vysokým tlakem s následným vysušením a vytvrzením při vysokých teplotách. Výsledný produkt má značně snížené hydrokopické vlastnosti, přičemž lze dosáhnout až 70 % účinnosti proti bobtnání a sesychání. Typicky se však hodnoty pohybují v rozmezí 30-40 %. Nevýhodou je křehkost, tendence k praskání a vysoké emise formaldehydu z produktu. (Sandberg et al. 2017)

Dřevo Bemadur je v dnešní době využíváno hlavně na výrobu palubek, zahradního nábytku a exteriérových oken. (Sandberg et al. 2017)

4.1.6 Indurite

Na Novém Zélandu vznikl proces Indurite pod záminkou zvýšení tvrdosti měkkých dřevin. Základem je impregnace materiálu ve vodě rozpustným roztokem polysacharidů, které tvoří sójový a kukuřičný škrob. Po jednodenním uskladnění je v další fázi materiál vytvrzován. Tento krok se uskutečňuje v peci s řízenou teplotou. Pro usnadnění a zrychlení vytvrzovací fáze, jsou do impregnačního roztoku přidávány katalyzátory. (Hill 2006)

Takto upravený materiál je přednostně určen pro vnitřní aplikace, kdy se pro svou dobrou rozměrovou stabilitu často využívá například k výrobě podlah. I přes jeho určení do vnitřních prostor, může být Indurite použit i v exteriéru. Musí se však jednat o

aplikace, kdy nedochází k dlouhodobému působení vody na materiál. Příkladem jsou různé formy opláštění. (Hill 2006)

4.1.7 Modifikační procesy pomocí monomerů

Další slibný způsob, jak zvýšit mechanickou, rozměrovou a tepelnou stabilitu, tak i odolnost proti napadení houbami a hmyzem na málo trvanlivé dřeviny představuje impregnace dřeva vinylovými monomery. Různé komerčně dostupné látky tohoto charakteru byly zkoumány několika vědci. K iniciaci polymerizace je často používáno rentgenové záření, které proniká hluboko do struktury dřeva a umožňuje polymeraci monomerů uvnitř buněčné stěny. Po tomto ošetření disponovalo dřevu lepší rozměrovou stabilitou v porovnání s neupraveným dřevem. Avšak doposud se tato technologie nedočkala komerční aplikace. (Sandberg et al. 2017)

4.2 Účinek impregnace na vlastnosti dřeva

Procentní nárůst hmotnosti a hustoty

Wang spolu s kolegy provedli roku 2019 studii kde zkoumali procentní nárůst hmotnosti a hustoty borovice v důsledku impregnace PF pryskyřicí. Výsledky ukázali, že hmotnost i hustota se zvyšovali s rostoucí koncentrací PF pryskyřice. Nárůst hustoty koreloval se zvyšující se hmotností. Při aplikaci PF pryskyřice o koncentraci 30 % se zvýšila hmotnost vzorků až o 39,6 % spolu s pozitivní korelací hustoty. Nárůst hodnoty byl ve studii přisuzován především zaplnění buněčných stěn impregnační látkou. Bylo však pozorováno, že pokud bylo použito impregnačního roztoku v koncentraci 20 % a vyšší, ke zvyšování hmotnosti i hustoty docházelo pomaleji. Toto zjištění je v souladu s předchozími studii, která uvádí, že viskozita impregnačního roztoku ovlivňuje jeho pronikání do struktury dřeva. Vyšší koncentrace PF pryskyřice by tedy mohla mít za následek snížení propustnosti dřeva. (Wang et al. 2019). Ve studii, kterou provedli Qin, Dong and Li v roce 2019 byly impregnovány MUF pryskyřicí vzorky dřeva eukalyptu a topolu. Všechny ošetřené vzorky vykazovali zvýšení hustoty. U topolu vzrostla hustota o 29,32 % a u eukalyptu o 12,50 %. U topolu i eukalyptu byl pozorován procentuální nárůst hmotnosti, který se zvyšoval lineárně se zvyšováním koncentrace impregnované pryskyřice. Při 40 % koncentraci vykazovalo topolové dřevu nárůst hmotnosti o 59 %,

kdežto dřevo eukalyptu pouze o 10,7 %. Tyto výsledky indikují, že eukalyptus je obtížně impregnovatelný, což je způsobeno hlavně rozdílnou mikroskopickou strukturou této dřeviny oproti topolu. (Qin et al. 2019). Další studie z roku 2021 zjišťovala změnu některých fyzikálních a mechanických vlastností dřeva Kanárníku modifikovaného PF pryskyřicí. Dřevo bylo impregnováno pryskyřicí v koncentracích 15 %, 20 % a 30 %. Největší hmotností přírůstek 15,55 % byl zaznamenán u vzorků ošetřených 30 % pryskyřicí a přírůstek nejmenší s hodnotou 6,45 % při použití pryskyřice v koncentraci 15 %. Hmotnost tedy rostla společně s rostoucí koncentrací PF pryskyřice. Hustota Kanárníku se při ošetření PF pryskyřicí s různými koncentracemi zvýšila. Při ošetření 15 % pryskyřicí se hustota vzorků zvýšila přibližně o 0,8 % a v případě 30 % koncentrace došlo k nárůstu hustoty až o 5,8 % ve srovnání s kontrolními vzorky. (Boneka et al. 2021)

Bobtnání a sesychání

Studie z roku 2019 zjišťovala dopad impregnace dřeva borovice na její rozměrovou stálost a mechanické vlastnosti. Vzorky byly modifikovány PF pryskyřicí v koncentracích 15 %, 20 %, 25 % a 30 %. Z výsledků je patrný pozitivní účinek impregnace pryskyřicí na charakteristiky bobtnání a sesychání dřeva. Bylo sledováno bobtnání a sesychání u dvou skupin vzorků. U první skupiny byly vzorky vysušeny v peci a poté ponechány na vzduchu. Při 20 % koncentraci PF pryskyřice se hodnoty radiálního, tangenciálního a objemového bobtnání snížili asi o 45 %, 58 % a 54 % oproti kontrolní skupině. A u druhé skupiny byly vzorky vysušeny v peci a poté vystaveny vlhkosti. Zde se při koncentraci PF pryskyřice 20 % snížilo radiální, tangenciální a objemové bobtnání asi o 49 %, 50 % a 51 %. Účinnost impregnace vůči bobtnání a sesychání byla pozitivně ovlivněna koncentrací impregnované pryskyřice. Účinnost dosáhla maximálních hodnot 59 % a 62 % při koncentraci pryskyřice 30 %. (Wang et al. 2019). Qin, Dong and Li ve své studii z roku 2019 kde impregnovali MUF pryskyřicí vzorky dřeva eukalyptu a topolu uvádějí, že společně s nárůstem hustoty a hmotnosti byl pozorováno značné snížení bobtnání obou dřevin. Vzorky topolu vykazovali bobtnání menší než 7 % zatímco u dřeva eukalyptu bylo bobtnání vyšší než 10 %. Zajímavé bylo zjištění, že míra bobtnání se neměnila s různou mírou koncentrace pryskyřice. Zároveň byla zjištěna korelace mezi hmotnostním přírůstkem vzorků účinkem impregnace a jejich odolností proti bobtnání. U eukalyptu došlo vlivem impregnace ke zvýšení hmotnosti pouze o 10,7 %, účinnost proti

bobtnání však překračovala 40 %. Nárůst hmotnosti o 16,5 % impregnovaného dřeva topolu způsobil až 86 % účinnost vůči bobtnání. (Qin et al. 2019). Boneka *et al.* pozorovali u dřeva Kanárníku modifikovaného PF pryskyřicí významné zlepšení z hlediska absorpce vody a tloušťkového bobtnání. Původní hodnoty absorpce vody a tloušťkového bobtnání byly 42,8 % a 3,3 %. Znovu byly zaznamenány nejlepší výsledky při ošetření dřeva 30 % PF pryskyřicí s hodnotami absorpce 18,9 % a tloušťkového bobtnání 2,29 %. V souladu s tím bylo dosaženo lepšího koeficientu bobtnání a byla potvrzena pozitivní účinnost impregnace proti bobtnání s hodnotami v rozmezí od 20,33 % do 31,50 %. Ve studii byly zkoumány také některé vlhkostní charakteristiky dřeva Kanárníku a dopad impregnace na jejich hodnoty. Obecně bylo zaznamenán pokles rovnovážné vlhkosti po impregnaci. Při relativní vlhkosti neupravených vzorků 95 % byla rovnovážná vlhkost rovna 19,10 %. Po impregnaci pryskyřicí v koncentracích 15 %, 20 % a 30 % došlo k poklesu hodnot rovnovážné vlhkosti na 18,27 %, 18,14 % a 17,12 %. (Boneka et al. 2021)

Mechanické vlastnosti

(Wang et al. 2019) ve své studii provedli zkoušku tvrdosti a pevnosti v tlaku na vzorcích dřeva borovice modifikovaných PF pryskyřicí v koncentracích 15 %, 20 %, 25 % a 30 % a výsledky porovnávali s kontrolní skupinou. U kontrolní skupiny byly naměřeny hodnoty tvrdosti $39,5 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a pevnosti v tlaku $49,1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Obě charakteristiky vykazovali nárůst společně s rostoucí koncentrací impregnované pryskyřice. Maximálních hodnot bylo dosaženo při koncentraci pryskyřice 30 %, kdy byla naměřena tvrdost $54,9 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a pevnost v tlaku $59,7 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Avšak při zvyšování koncentrace nad 20 % se již hodnoty tvrdosti a pevnosti v tlaku měnili jen minimálně a dalo by se tvrdit, že zůstávali stabilní. Z toho vyplývá, že 20 % koncentrace impregnační látky by mohla být upřednostňována při modifikaci borového dřeva. (Wang et al. 2019). Simsek, Baysal a Peker impregnovali dřevo buku a borovice boritanem sodným. Následkem použití boritanu, jakožto impregnační látky došlo ke snížení pevnosti v tlaku u všech vzorků oproti kontrolní skupině. U buku představoval tento pokles vlivem modifikace 20 %. Bylo zjištěno, že se zvyšující se koncentrací boritanu dochází ke snížení pevnosti v tlaku ve směru vláken. V případě impregnace boritanem sodným nastal pokles hodnot i u meze pevnosti v ohybu oproti kontrolním vzorkům. (Simsek et al. 2010).

V nové studii byl zjišťována také mez pevnosti v ohybu, modul pružnosti a tvrdost dřeva Kanárníku modifikovaného PF pryskyřicí. Mezi kontrolními vzorky a těmi ošetřenými fenolickou pryskyřicí nebyl zjištěn významný rozdíl v těchto charakteristikách. Při aplikaci 15 % pryskyřice se dokonce MOR a MOE snížili. Pozitivní vliv měla koncentrace 20 %, opět však došlo ke snížení při použití pryskyřice v koncentraci 30 %. Zároveň byl pozorován pokles tvrdosti se zvyšující se koncentrací pryskyřice. Neošetřené vzorky disponovali tvrdostí 3,48 Nmm² která se při ošetření 30 % pryskyřicí snížila na 3,01 Nmm². (Boneka et al. 2021)

5 Charakteristika vybraných dřevin

5.1 Buk

Jedná se o listnatý strom s výškou 35 až 40 m, který se dožívá průměrně 200-400 let. Buk patří mezi hladkokorou dřevinu. Štíhlý a průběžný kmen buku disponuje hladkou kůrou v mládí nahnědlé barvy, která se během stárnutí stromu mění na světlejší až šedou barvu. Dřevo je tvrdé, dobře opracovatelné, ale málo pružné a trpí nižší trvanlivostí a malou odolností vůči biotickým činitelům. Buk se řadí mezi roztroušeně pórovité dřeviny s charakteristickými dřeňovými paprsky viditelnými na všech řezech. Dřevina je bez zřetelného pravého jádra, občas se však vyskytuje jádro nepravé. Běl má světlou narůžovělou (plet'ovou barvu). (Musil et al. 2005; Dubovský et al. 2001; Zeidler et al. 2016)

V dobách středověku byl ceněn pro své použití jakožto nejkvalitnější zdroj paliva. Velký význam je přikládán jeho plodům bukvicím. Ty představovali a stále představují formu výživného krmiva pro lesní zvěř. Dnes je bukové dřevo hojně využíváno především v odvětví výroby dých, aglomerovaných materiálů a parket. Pro svoji stavbu má významné uplatnění při výrobě ohýbaného nábytku aj. Sadovnictví. Z těchto důvodů je buk označován jako jedna z nejvýznamnějších evropských listnatých dřevin. (Musil et al. 2005)



Obr. 3: Buk
(<https://lesycr.cz/drevo/charakteristika-dreva-jednotlivych-drevin/buk/>)



Obr. 4: Dřevo buku (<https://lesycr.cz/drevo/charakteristika-dreva-jednotlivych-drevin/buk/>)

5.2 Minulý, současný a budoucí vývoj buku v Evropě

V nedávné době byl proveden výzkum zaměřený na zastoupení smrku ztepilého a buku lesního v NP Šumava na území ponechaném přirozenému vývoji. Dle výsledků bylo zjištěno, že dominantní dřevinou je smrk na 82 % ploch, buk převažuje pouze na 7 %

ploch. Podobné rozdělení je i v případě zmlazení, kdy na 80 % všech ploch má hlavní zastoupení smrk a buk jen na více než 7 % ploch. Ostatní dřeviny jsou zastoupeny pouze nepatrně. Rozdílné hodnoty vykazují obě dřeviny i pokud jako faktor zařadíme nadmořskou výšku jejich výskytu. Plochy s většinovým zastoupením smrku se nachází v nadmořských výškách od 1100 do 1200 m n. m. Buk převažuje na plochách v nadmořských výškách od 800 do 1185 m n. m. Příčin tohoto nerovnoměrného rozložení je mnoho a obtížně se dá určit, který z nich hraje nejdůležitější roli. Již historické záznamy uvádí dominantu smrku v této oblasti. Výše uvedené hodnoty, tudíž nemusí být tak vzdáleny od stavu přirozeného. Jako faktory podporující tento fakt můžeme u smrku uvést oproti buku menší váhu a vyšší počet semen, vyšší odolnost vůči působení povětrnostních vlivů i poškození zvěří, nebo nižší nároky na půdu. Kritický dopad má pro smrk hlavně sucho. Buk zároveň špatně snáší podmáčené a rašelinité půdy a jeho semenáčky jsou velmi náchylné na nízké teploty. Výsledky této studie naznačují, že v blízké budoucnosti bude v oblasti NP Šumava převažovat trend smrku, jakožto dominantní dřeviny. Zároveň se předpokládá na většině území výskyt smrku a buku ve stejných lokalitách jako tomu je dnes. (Čížková Pavla et al. 2017)

V další studii byly zjišťovány reakce růstu smíšených bukových lesů ve střední Evropě na klimatické změny, různé způsoby hospodaření a působení zvěře. Globální změny představují hrozbu pro lesní ekosystémy a jejich funkce. Byl zaznamenán trend poklesu růstu v souvislosti s klimatickými změnami. Hlavní dopady jsou přisuzovány zvýšené koncentraci CO₂ v atmosféře, zvýšené depozici dusíku, zvýšení koncentrace troposférického ozonu a dostupnosti světla. Vzhledem k neustálému zvyšování četnosti suchých a horkých letních období, je i v budoucnu předpokládán závažný dopad těchto faktorů na bukové lesy střední Evropy. Přirozeným východiskem výše uvedených problémů, je nahrazení nesmíšených lesů těmi smíšenými. Smíšené lesní porosty vykazují vyšší odolnost vůči klimatickým podmínkám a extrémním jevům podnebí. Zároveň může tato změna přispět k lepší produktivitě dřevní hmoty, díky lepšímu využití dané lokality. Na mnoha místech v Evropě postižených úbytkem smrku jsou již dnes tyto monokultury nahrazeny smíšenými lesy s velkým podílem buku, který nabízí vysoký reprodukční potenciál právě ve středoevropských oblastech. Ohrožení pro budoucí lesní porosty představuje zvyšující se četnost divoké zvěře, která má negativní dopad na přirozenou regeneraci lesa. (Vacek et al. 2019)

V oblasti NP Nízké Tatry představovaly hlavní příčinu proměny krajinného pokryvu větrné kalamity mezi roky 1990 až 2018. Závažnost jejich dopadu pramení ze špatného lesního hospodářství v druhé polovině 20. století, kdy byly vysazovány smrkové monokultury. V kombinaci s výraznou změnou klimatu byly tyto skutečnosti v neposlední řadě podpořeny nárůstem cestovního ruchu a rekreační infrastruktury. Aby v oblasti NP Nízké Tatry došlo k nápravě poškozených lesů a předešlo se podobným problémům v budoucnu, měl by být kladen větší důraz na druhovou skladbu lesů. Ta by se měla blížit složení původních lesů a smrky by tak měli být nahrazovány bukovými a bukovo-jedlovými lesy. (Žoncová et al. 2020)

Další studie analyzovala růstové tendence buku v Evropě mezi lety 1955 až 2016. Studováno bylo 5800 buků z 324 lokalit, což představuje celý geografický a klimatický rozsah druhu. Výsledky ukazují, že v jižních oblastech rozšíření buku došlo k růstovému poklesu, a to až o 20 %, naopak v severních oblastech rozšíření byly hodnoty pozitivní se zvýšením růstu až o 20 %. Oblasti s pozitivními růstovými tendencemi jsou však mnohem méně rozsáhle nežli oblasti vykazující růstový pokles, což ve výsledku poukazuje na snižující se růstové tendence buku v Evropě. Jako hlavní faktory byly prezentovány klimatické změny v posledních desetiletích, převážně pokles srážek a nárůst teploty. Zvláště velký dopad má poté současné působení obou faktorů. Předpokládané zvyšování globální průměrné teploty do konce 21. století v rozmezí od 1,5 do 5,5 °C a odhadovaný pokles srážek v jižní Evropě a nárůst v severních oblastech podporuje tendence postupného snižování růstu buku i v budoucnu. Konkrétní scénář uvádí předpoklad poklesu produkce buku ve většině lesů střední Evropy o 20 až 30 % mezi roky 2020 a 2050. Tento pokles by mohl na jihu Evropy v období mezi roky 2040 až 2070 přesáhnout až 50 %. Současně je v severních oblastech výskytu očekáván nárůst kolem 30 %. Tyto trendy poklesu růstu v posledních desetiletích obzvláště v jižních oblastech výskytu budou vzhledem k neustálému oteplování klimatu a poklesu srážek pokračovat. (Martinez del Castillo et al. 2022)

Hédl v roce 2004 vydal studii kde uvádí tři hlavní vlivy mající dopad na růst buku v Rychlebských horách na severovýchodě České republiky. Jako tři hlavní faktory uvádí lesnické využití, nelesnické využití a látky znečišťující ovzduší. (Hédl 2004)

6 Metodika

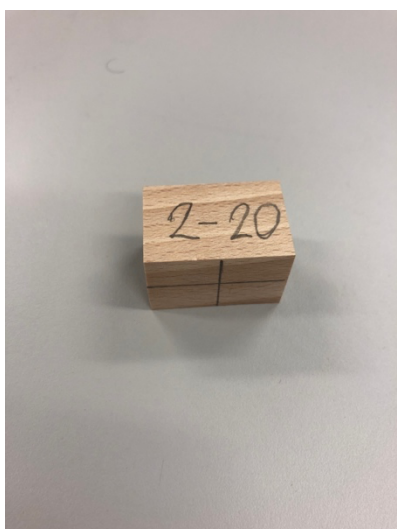
6.1 Příprava zkušebních těles

Všechny zkoušky byly prováděny vy vzorcích dřeva Buku.

Vzorky byly rozděleny do 6 skupin podle koncentrace impregnované pryskyřice a přítomnosti termické modifikace.

- Ref. – referenční vzorky bez úprav
- Termo 210 °C – termická úprava při teplotě 210 °C
- Impr.1/0 – impregnace pryskyřicí v poměru 1:0
- Impr.1/0+termo. – termická úprava při teplotě 210 °C a impregnace pryskyřicí v poměru 1:0
- Impr.1/1+termo. – termická úprava při teplotě 210 °C a impregnace pryskyřicí v poměru 1:1
- Impr.1/10+termo. – termická úprava při teplotě 210 °C a impregnace pryskyřicí v poměru 1:10

Samotná zkušební tělesa byla pro zjednodušení a přehlednost označena pouze dvojicí čísel. První číslo reprezentovalo přítomnost termické modifikace a míru koncentrace impregnované pryskyřice (1–6). Za ním následující číslo sloužilo k označení vzorku v dané skupině (1–20).



Obr. 5: Značení zkušebního tělesa (vlastní)



Obr. 6: Značení zkušebního tělesa (vlastní)

6.2 Modifikace

Impregnace pryskyřicí

Pro účely této práce byl požit tlakový druh impregnace dřeva. Tlakovou impregnací se rozumí speciální technologický proces, během kterého je impregnační látka, v našem případě pryskyřice, aplikována do dřeva za pomoci podtlaku. Nižší tlak, nežli atmosférický umožňuje impregnační látce proniknout hluboko do struktury dřeva.

Proces tlakové impregnace byl aplikován na 4 skupiny vzorků. Vzorky Impr.1/0 a Impr.1/0+termo. byly impregnovány pryskyřicí v poměru 1:0 lišící se následnou přítomností termické modifikace. Vzorky Impr.1/1+termo. byly impregnovány pryskyřicí v poměru 1:1 a vzorky Impr.1/10+termo. podstoupily impregnaci pryskyřicí v poměru 1:10.

Následoval samotný proces impregnace, kdy jsme vzorky rozdělili do jednotlivých skupin a umístili do čtyř nádob. Jednotlivé skupiny vzorků jsme zalili pryskyřicí v daném poměru a zajistili, aby zůstali vzorky ponořené po celou dobu trvání procesu impregnace. Poté byly vzorky vloženy do tlakové komory, kde byly nejdříve vystaveny tlaku 0,8 Bar po dobu 1 hodiny. Následně byl tlak zvýšen na hodnotu 8,0 Bar, který na vzorky působil 22 hodin. Po ukončení procesu byly vzorky vyjmuty a opláchnuty vodou.

Termická modifikace

Po dokončení impregnace byly vzorky termicky modifikovány. Proces termické modifikace byl aplikován na 5 skupiny vzorků. Mimo impregnovaných skupin vzorků byla termicky modifikovány také vzorky Termo 210 °C, které se procesu impregnace neúčastnily.

Proces termické modifikace probíhal v termokomoře v následujících třech fázích:

- V první fázi byly vzorky vysušeny na nulovou vlhkost za pomoci horkého vzduchu a páry, kdy se teplota nejdříve rychle zvyšovala na 100 °C a poté postupně rostla až na hodnotu 130 °C.
- V další fázi již probíhá samotná termická modifikace. Teplota se zvýšila na hodnotu 210 °C a působila na vzorky po dobu 2 až 3 hodin.
- V poslední fázi došlo k ochlazení vzorků na teplotu 80 až 90 °C a vlhkostní stabilizaci na konečnou vlhkost 4 až 7 %.



Obr. 7: Zkušební tělesa po modifikaci (vlastní)

6.3 Testování fyzikálních a mechanických vlastností

6.3.1 Změna hmotnosti

Příprava těles pro zkoušku změny hmotnosti nebyla provedena dle konkrétní normy. Měření probíhalo na vzorcích buku, které byly rozřezány na tvar pravoúhlého hranolu se čtvercovou základnou 20 mm x 20 mm a délkou hranolu podél vláken 30 mm.

Tělesa byla před modifikací vysušena na vlhkost $w=0\%$, označena a zvážena váhou s přesností vážení 0,01g. Hodnoty byly následně vepsány do tabulky. Po příslušné modifikaci byly vzorky opět vysušeny na vlhkost $w=0\%$ a zváženy váhou s přesností vážení 0,01g. Hodnoty byly následně vepsány do tabulky a použity k výpočtu průměrné změny hmotnosti pro jednotlivé modifikace.

Procentuální změna hmotnosti se vyjadřuje vzorcem:

$$\text{WPG} = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100$$

(1)

m_0 – hmotnost zkušebního tělesa před modifikací

m_1 – hmotnost zkušební tělesa po modifikaci

6.3.2 Bobtnání

K dané zkoušce byla použita normovaná tělesa dle ČSN 49 0126. Zkouška byla provedena na vzorcích buku. Zkušební tělesa byla tvaru pravoúhlého hranolu se základnou 20 × 20 mm a výškou 30 mm. Z každé skupiny bylo na zkoušku bobtnání použito 10 vzorků. Po příslušném označení a změření zkušebních těles, byly hodnoty zapsány do tabulek.

Pro zkoušku bobtnání jsme zkušební tělesa po příslušné modifikaci umístěna do sušárny, kde byla vystavena teplotě 105 °C. Tím se docílilo jejich vysušení na vlhkost $w=0$ %. Tělesa v absolutně suchém stavu jsme poté ponořili na do nádoby s vodou, aby došlo k plnému nasycení jejich buněčných stěn. Vzorky jsme zatížili, aby bylo zajištěno, že jsou ponořena pod vodou celá. Maximálně nabobtnalé vzorky jsme zvážili a změřili a ze zjištěných hodnot vypočítali míru bobtnání v jednotlivých směrech i celkové objemové bobtnání.

Bobtnání se vyjadřuje vzorcem:

$$a_{r \max} = \frac{l_{r \max} - l_{r \min}}{l_{r \min}} \cdot 100 \quad (2)$$

$a_{r \max}$ – maximální nabobtnání

$l_{r \max}, l_{t \max}, l_{a \max}$ – maximální rozměry zkušební tělesa

$l_{r \min}, l_{t \min}, l_{a \min}$ – minimální rozměry zkušební tělesa

6.3.3 Pevnost v tlaku

Tělesa pro tuto zkoušku byla připravena dle normy ČSN 49 0110. Zkušební tělesa byla upravena na tvar pravoúhlého hranolu o základně 20x20 mm a délce po směru vláken

30 mm. Podle koncentrace impregnované pryskyřice a přítomnosti termické modifikace jsme připravili 6 souborů zkušebních těles. V každém souboru se nacházelo 10 kusů zkušebních těles. Po příslušném označení a změření zkušebních těles, byly hodnoty zapsány do tabulek.

Zkouška měření pevnosti v tlaku byla provedena podle normy ČSN 49 0110. Pro účely zkoušky byl použit stroj UTS 50. Vzorky byly jednotlivě umístěny do středu nehybné spodní hlavy, která slouží pouze jako podpěra, aby bylo zabezpečeno rovnoměrné zatěžování. Následně začala působit vrchní zátěžová hlava konstantní silou F na měřené těleso. Zkouška se vykonává po dobu 60 ± 30 sekund, a to až do porušení tělesa, nebo poklesu působící síly o 10 %. Zátěžová hlavice se poté navrácí do své nulové polohy.

Výsledné naměřené hodnoty se vždy po dokončení zkoušky automaticky zapisovali do integrovaného softwaru TIRA-test. Odečtené hodnoty F_{max} nám následně posloužili pro výpočet pevnosti v tlaku podél vláken při dané vlhkosti.

Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken se vyjadřuje vzorcem:

$$\sigma_w = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \quad (3)$$

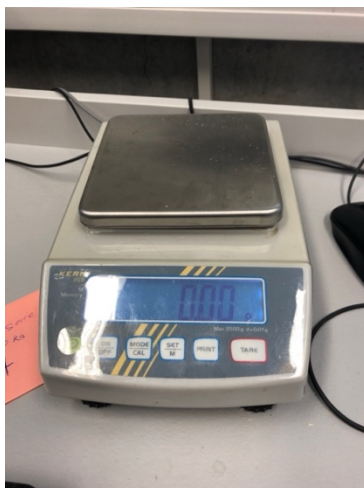
σ_w – mez pevnosti v tlaku ve směru vláken [MPa]

F_{max} – maximální zatížení [N]

a, b – rozměry zkušebního tělesa [mm]



Obr. 8: Posuvné měřidlo KINEX ICONIC (vlastní)



Obr. 9: Laboratorní váha KERN PSB/PBJ (vlastní)

6.4 Zpracování výsledků v softwaru Statistica 12

Ke statistickému vyhodnocení naměřených hodnot byl použit software Statistica 12. Data zde byla statisticky vyhodnocena použitím více-faktorové analýzy rozptylu, která hodnotí účinky jednotlivých faktorů a jejich vzájemných kombinací. Pro hodnocení účinku jednotlivých faktorů i jejich vzájemných kombinací byl použit Fisherův F-test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. F-test na základě hladiny významnosti P stanoví, zda a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný nebo nevýznamný. Testovaný faktor lze hodnotit na základě hodnoty parametru P takto:

- $P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky významný,
- $P > 0,05$ vliv faktoru není statisticky významný,
- $P = 0,05$ vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti,
- $P = 0$ faktor působí,
- $P < 0,001$ vliv faktoru je statisticky velmi významný,
- $0,001 < P < 0,01$ vliv faktoru je statisticky středně významný,
- $0,01 < P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky málo významný

7 Výsledky a diskuse

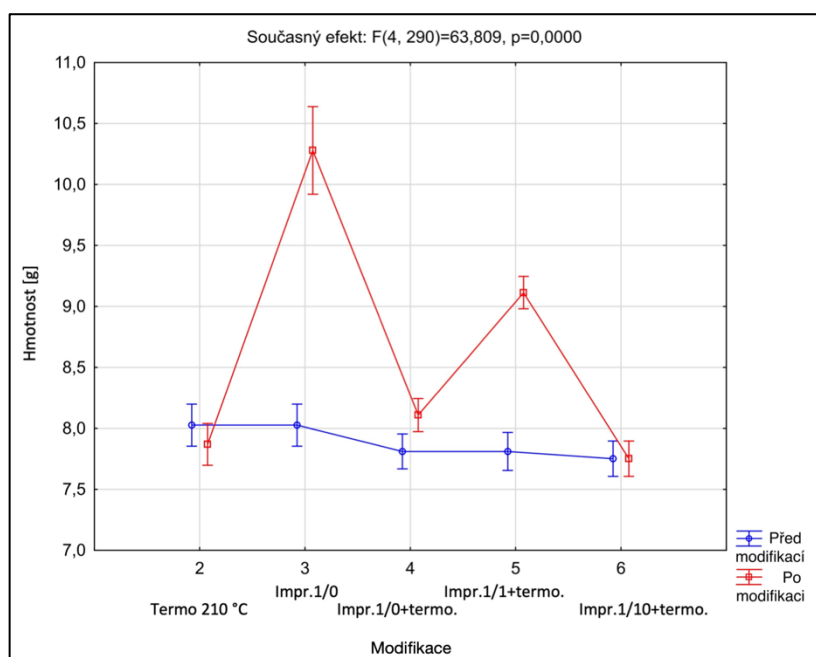
7.1 Hmotnost

Pro přehlednost jsou v Tab. 1 uvedeny průměrné hodnoty změny hmotnosti pro jednotlivé modifikace.

Tab. 1: Průměrné hodnoty změny hmotnosti pro jednotlivé modifikace (WPG)

WPG [%]					
Dřevina	Modifikace	Minimum	Maximum	Směr. odchylka	Průměr
Buk	Termo 210°C	-2,8	-1,4	0,3	-2,0
Buk	Impr. 1/0	4,8	55,1	11,2	28,2
Buk	Impr. 1/0+termo	-7,5	15,4	4,8	3,9
Buk	Impr. 1/1+termo	8,2	22,7	2,7	16,8
Buk	Impr. 1/10+termo	-13,0	5,4	4,8	-1,9

Na Obr. 10 jsou graficky znázorněny průměrné hmotnostní změny vzorků ve vztahu k jednotlivým modifikacím. U termicky modifikované skupiny můžeme pozorovat mírný pokles hmotnosti v průměru o 2 %. Naopak v případě vzorků impregnovaných pryskyřicí v koncentraci 1/0 je patrný značný nárůst hmotnosti, a to



Obr. 10: Průběh změny hmotnosti v závislosti na modifikaci

v průměru o 28,2 %. Skupina kombinující impregnaci v koncentraci 1/0 a termickou modifikaci došlo také k nárůstu hmotnosti, ale pouze mírnému v průměru o 3,9 %. Znatelný nárůst hmotnosti nastal, když byly vzorky společně s termickou úpravou impregnovány pryskyřicí v nižší koncentraci 1/1. Průměrně vzrostla hmotnost o 16,8 %. U poslední skupiny ošetřené termickou modifikací a impregnací v koncentraci 1/10 se hmotnost mírně snížila průměrně o 1,9 %.

Na základě hladiny významnosti $P = 0$, lze konstatovat, že faktor modifikace na hmotnost působí.

7.2 Bobtnání

Pro přehlednost jsou v Tab. 2 uvedeny průměrné hodnoty naměřených bobtnání v jednotlivých směrech a objemového bobtnání pro dané modifikace.

Tab. 2: Průměrné hodnoty bobtnání

Dřevina	Modifikace	Bobtnání Ra [%]	Bobtnání Ta [%]	Bobtnání Ax [%]	Objemové bobtnání [%]
Buk	Ref.	7,0	10,2	0,3	16,7
Buk	Termo 210°C	6,4	10,0	-0,2	15,6
Buk	Impr. 1/0	6,1	13,2	0,2	18,6
Buk	Impr. 1/0+termo	5,0	8,7	0,1	13,4
Buk	Impr. 1/1+termo	4,6	7,2	0,3	11,8
Buk	Impr. 1/10+termo	5,9	10,1	0,0	16,1

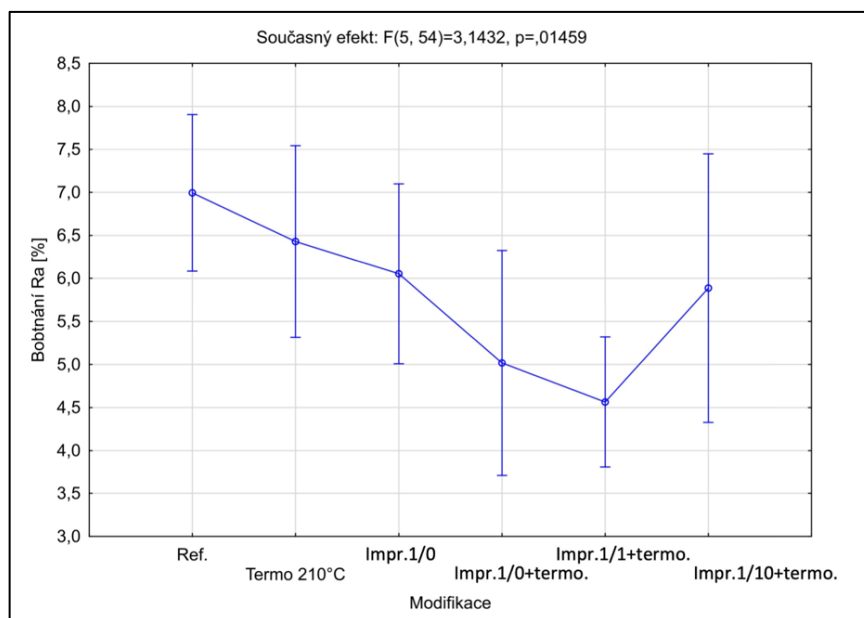
V Tab. 3 jsou uvedeny průměrné procentuální změny radiálního bobtnání oproti referenční skupině, v závislosti na modifikaci.

Tab. 3: Průměrné změny radiálního bobtnání

Průměrná změna Bobtnání Ra [%]					
Dřevina	Modifikace	Minimum	Maximum	Směr. odchylka	Průměr
Buk	Termo 210°C	-3,6	2,6	2,0	-0,6
Buk	Impr. 1/0	-3,3	2,8	1,7	-0,9
Buk	Impr. 1/0+termo	-4,8	1,4	2,2	-2,0
Buk	Impr. 1/1+termo	-5,9	-0,3	1,8	-2,4
Buk	Impr. 1/10+termo	-4,9	2,7	2,4	-1,1

Na Obr. 11 můžeme vidět vlivy jednotlivých úprav na velikost radiálního bobtnání uváděnou v procentech. Vzorky, které prošli termickou úpravou 210 °C vykazují snížení bobtnání v radiálním směru o 0,6 % vzhledem k referenčním hodnotám. O něco lepších výsledků dosáhly vzorky impregnovány pryskyřicí v koncentraci 1/0, u nichž bylo dosaženo poklesu radiálního bobtnání oproti referenčním vzorkům o 0,9 %. K výraznějšímu poklesu radiálního bobtnání došlo u dvou skupin vzorků, které kombinovali oba druhy modifikace. U skupiny upravené termickou modifikací 210 °C a impregnované pryskyřicí v koncentraci 1/0 pozorujeme snížení radiálního bobtnání o 2,0 % a v případě koncentrace pryskyřice 1/1 dokonce o 2,4 % oproti referenční skupině. Zároveň se také jedná o skupinu s nejnižší hodnotou radiálního bobtnání z celého souboru. Naopak u skupiny vzorků kombinující termickou úpravu a impregnaci s nejnižší koncentrací pryskyřice 1/10 nastalo zvýšení hodnoty bobtnání oproti předchozím dvěma skupinám přibližně na úroveň skupiny vzorků ošetřených pouze procesem impregnace. Konkrétně kleslo bobtnání v porovnání s referenční skupinou o 1,1 %.

Na základě hladiny významnosti $P < 0,05$ lze konstatovat, že vliv faktoru modifikace na hodnoty radiálního bobtnání je statisticky významný.



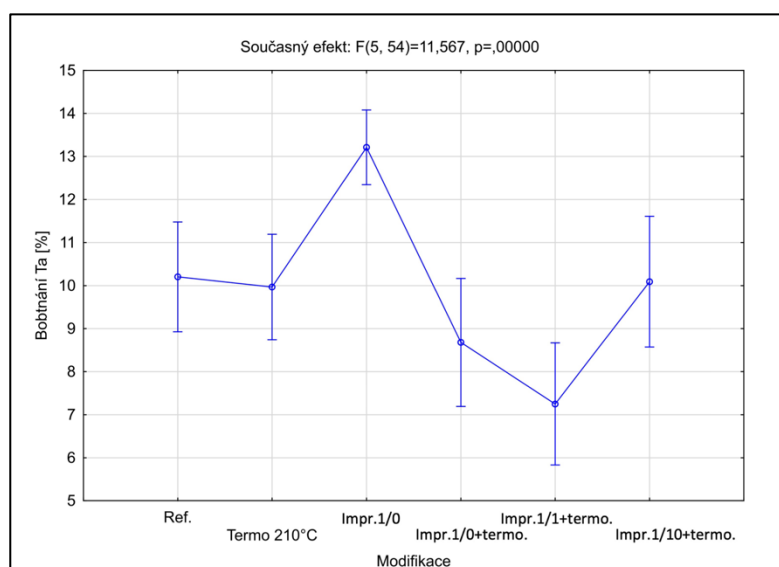
Obr. 11: Průběh radiálního bobtnání v závislosti na modifikaci

V Tab. 4 jsou uvedeny průměrné procentuální změny tangenciálního bobtnání oproti referenční skupině, v závislosti na modifikaci.

Tab. 4: Průměrné změny tangenciálního bobtnání

Průměrná změna Bobtnání Ta [%]					
Dřevina	Modifikace	Minimum	Maximum	Směr. odchylka	Průměr
Buk	Termo 210°C	-4,0	4,8	2,4	-0,2
Buk	Impr. 1/0	1,2	7,8	2,3	3,0
Buk	Impr. 1/0+termo	-7,7	3,3	3,1	-1,5
Buk	Impr. 1/1+termo	-5,6	1,8	2,7	-3,0
Buk	Impr. 1/10+termo	-4,4	3,1	2,3	-0,1

U tangenciálního bobtnání pozorujeme podobný trend jako u bobtnání radiálního s výjimkou u skupiny pouze impregnované pryskyřicí. Z grafu můžeme vyčíst, že hodnoty termicky upravených vzorků se téměř nezměnili v porovnání s těmi referenčními. Již zmíněná skupina vzorků impregnovaných pryskyřicí, jako jediná vykazovala zvýšení tangenciálního bobtnání vzhledem k referenčním vzorkům, a to o 3,0 %. U zbývajících skupin kombinujících obě modifikace průběh hodnot přibližně kopíroval radiální bobtnání. V případě prvních dvou skupin nastal pokles tangenciálního bobtnání o 1,5 % a 3,0 %. Oproti nim tangenciální bobtnání u poslední skupiny vzrostlo a jeho hodnota se zhruba shodovala s referenčními a impregnovanými vzorky. Vše je patrné z Obr. 12.



Obr. 12: Průběh tangenciálního bobtnání v závislosti na modifikaci

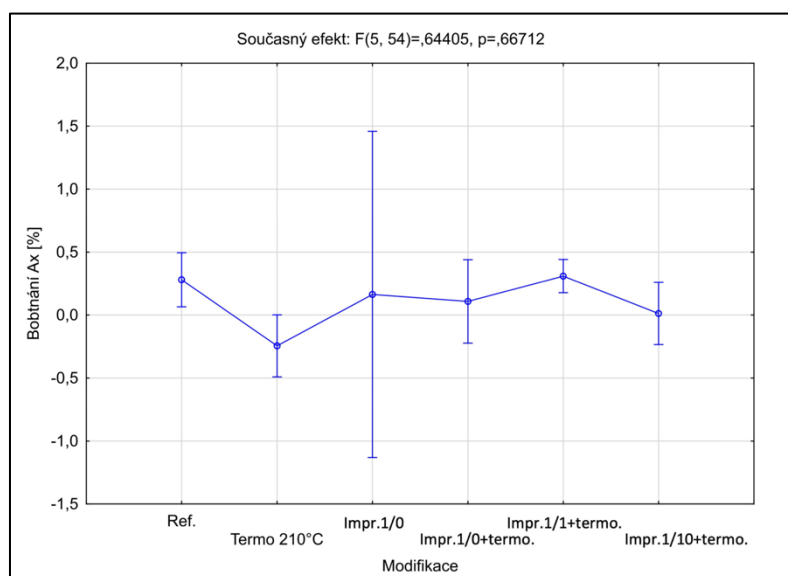
Na základě hladiny významnosti $P = 0$, lze konstatovat, že faktor modifikace na hodnoty tangenciálního bobtnání působí.

V Tab. 5 jsou uvedeny průměrné procentuální změny axiálního bobtnání oproti referenční skupině, v závislosti na modifikaci.

Tab. 5: Průměrné změny axiálního bobtnání

Průměrná změna Bobtnání Ax [%]					
Dřevina	Modifikace	Minimum	Maximum	Směr. odchylka	Průměr
Buk	Termo 210°C	-1,4	0,0	0,4	-0,5
Buk	Impr. 1/0	-3,2	3,3	1,8	-0,1
Buk	Impr. 1/0+termo	-1,1	1,1	0,6	-0,2
Buk	Impr. 1/1+termo	-0,6	0,5	0,3	0,0
Buk	Impr. 1/10+termo	-1,2	0,3	0,5	-0,3

Obr. 13 ukazuje u vzorků termicky upravených teplotou 210 °C záporné hodnoty axiálního bobtnání. Tuto chybu lze připsat degradaci vzorků vlivem vysoké teploty při modifikaci, kdy došlo k rozpraskání dřeva na čelních plochách vzorku. Záslouhou toho byly nesprávně změřeny podélné rozměry vzorků v této skupině. Na vině byl tedy jak faktor samotné modifikace, tak lidský faktor. Do záporných hodnot zasahuje graf i u zbylých skupin, a to i když byly všechny naměřené hodnoty kladné. Děje se tak kvůli



Obr. 13: Průběh axiálního bobtnání v závislosti na modifikaci

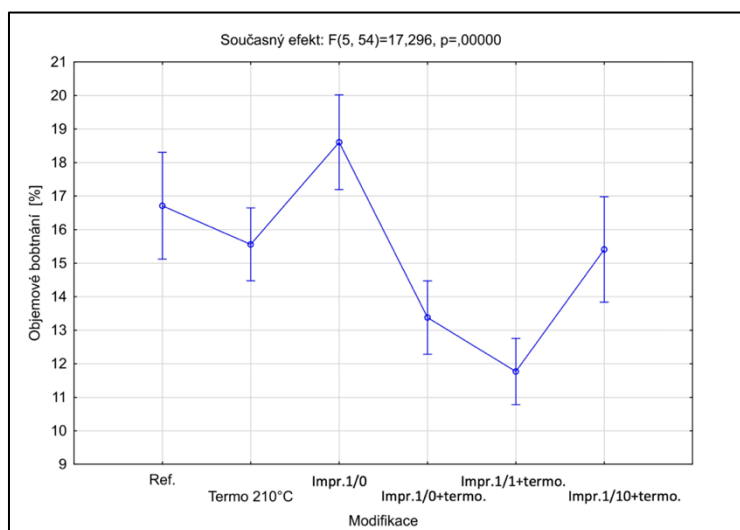
statistickému zpracování dat s velkým rozptylem. Hodnoty byly však přibližně stejné jako hodnoty referenční a jsou tedy statisticky nevýznamné.

V Tab. 6 jsou uvedeny průměrné procentuální změny objemového bobtnání oproti referenční skupině, v závislosti na modifikaci.

Tab. 6: Průměrné změny objemového bobtnání

Průměrná změna Objemového bobtnání [%]					
Dřevina	Modifikace	Minimum	Maximum	Směr. odchylka	Průměr
Buk	Termo 210°C	-4,2	1,9	2,3	-1,2
Buk	Impr. 1/0	-2,6	6,6	3,1	1,9
Buk	Impr. 1/0+termo	-6,8	2,1	3,0	-3,3
Buk	Impr. 1/1+termo	-10,1	-1,1	2,6	-4,9
Buk	Impr. 1/10+termo	-5,2	2,9	2,2	-1,3

Z grafu na Obr. 14 je patrné, že křivka objemové bobtnání svým průběhem kopíruje křivku bobtnání tangenciálního. Hodnoty objemového bobtnání klesly u vzorků termicky upravených. V případě impregnovaných vzorků hodnoty objemového bobtnání stoupli a jako jediná skupina vykazuje vyšší hodnoty v porovnání s referenční skupinou. K prudkému poklesu oproti referenčním vzorkům došlo u skupin kombinující termickou úpravu a impregnaci v koncentraci 1/0 a termickou úpravu a impregnaci v koncentraci 1/1. A to o 3,3 % v případě koncentrace 1/0 a o 4,9 % u skupiny s koncentrací pryskyřice



Obr. 14: Průběh objemového bobtnání v závislosti na modifikaci

1/1. Naměřené hodnoty u poslední skupiny se přibližně shodovali s hodnotami skupiny ošetřené pouze impregnací.

Na základě hladiny významnosti $P = 0$, lze konstatovat, že faktor modifikace na hodnoty objemového bobtnání působí.

7.3 Pevnost v tlaku ve směru vláken

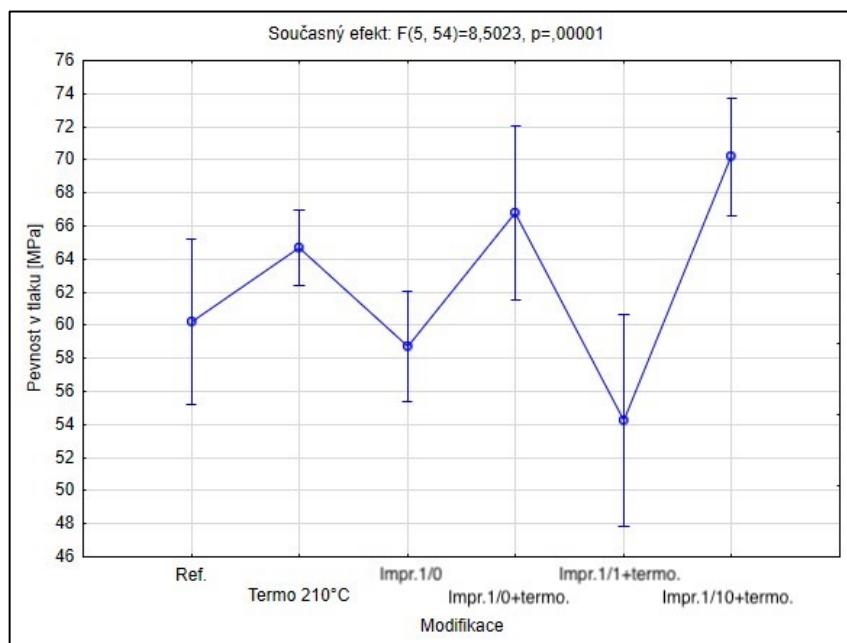
Pro přehlednost jsou v Tab. 7 uvedeny průměrné hodnoty naměřených pevností v tlaku podél vláken pro jednotlivé modifikace.

Tab. 7: Průměrné hodnoty pevnosti v tlaku

Dřevina	Modifikace	Pevnost v tlaku ve směru vláken [Mpa]
Buk	Ref.	60,2
Buk	Termo 210°C	64,7
Buk	Impr. 1/0	58,7
Buk	Impr. 1/0+termo	66,8
Buk	Impr. 1/1+termo	54,2
Buk	Impr. 1/10+termo	70,2

Z Obr. 15 je patrný nárůst pevnosti v tlaku u vzorků ošetřených termickou modifikací 210 °C oproti referenční skupině. Pevnost v tlaku poklesla mírně pod hodnoty referenčních vzorků u skupiny impregnované pryskyřicí v poměru 1/0. Obě tyto změny však nejsou statisticky významné. Ke statisticky významným změnám došlo při kombinaci termické úpravy a impregnace pryskyřicí v různých koncentracích. U vzorků, které byly vystaveny termické úpravě 210 °C a zároveň impregnovány pryskyřicí v koncentraci 1/0 došlo k nárůstu pevnosti v tlaku. Při snížení koncentrace impregnované pryskyřice na hodnotu 1/1 můžeme pozorovat výrazný pokles pevnosti v tlaku v porovnání s koncentrací vyšší. Zároveň se jedná o nejnižší naměřenou hodnotu pevnosti. Naopak nejvyšší pevnost v tlaku a největší statistickou významnost vykazovali vzorky ošetřené termickou úpravou 210 °C a impregnovány nízkou koncentrací pryskyřice 1/10.

Statistické významnosti jednotlivých změn v závislosti na aplikované modifikaci jsou zobrazena v tabulce Duncanova testu (Tab. 8).



Obr. 15: Průběh pevnosti v tlaku v závislosti na modifikaci

Tab. 8: Porovnání účinků modifikace na pevnost v tlaku pomocí Duncanova testu

Duncanův test; proměnná Pevnost v tlaku [MPa] Přibližné pravděpodobnosti pro post hoc testy Chyba: meziskup. PČ = 39,997, SV = 54,000						
	Ref.	Termo 210°C	Impr.1/0	Impr.1/0+termo.	Impr.1/1+termo.	Impr.1/10+termo.
Ref.		0,121539	0,597992	0,030546	0,049770	0,001601
Termo 210°C	0,121539		0,050554	0,452651	0,001006	0,069562
Impr.1/0	0,597992	0,050554		0,010023	0,119869	0,000393
Impr.1/0+termo.	0,030546	0,452651	0,010023		0,000132	0,237300
Impr.1/1+termo.	0,049770	0,001006	0,119869	0,000132		0,000029
Impr.1/10+termo.	0,001601	0,069562	0,000393	0,237300	0,000029	

Hmotnost

Z výsledných hodnot experimentální části jsme dospěli k následujícím závěrům:

K největšímu nárůstu hmotnosti vlivem modifikace došlo u skupiny impregnované pryskyřicí v koncentraci 1/0, a to průměrně o 28,2 %. Pro porovnání Qin, Dong and Li (2019) ve své studii impregnovali pryskyřicí dřevo eukalyptu a topolu. Při koncentraci pryskyřice 40 % vykazovaly vzorky topolu nárůst hmotnosti o 59 %, oproti tomu vzorky eukalyptu pouze o 10,7 %, což bylo způsobeno jeho mikroskopickou stavbou, která zapříčiňuje obtížnou impregnaci stejně jako je tomu u bukového dřeva.

Hodnoty hmotnosti u skupiny ošetřené termickou modifikací 210 °C vykazují vlivem modifikace jen velmi mírný pokles v průměru o 2 %. Podobných výsledků dosáhla i skupina kombinující termickou úpravu a impregnaci pryskyřicí v koncentraci 1/10. K nárůstu hmotnosti došlo u skupiny ošetřené termickou modifikací i impregnací v koncentraci 1/0, avšak pouze malému. Výraznější zvýšení hmotnosti nastalo u vzorků zároveň termicky upravených a impregnovaných koncentrací pryskyřice 1/1. Konkrétně vzrostla hmotnost o 16,8 %.

Bobtnání

Z výsledných hodnot experimentální části jsme dospěli k následujícím závěrům:

V případě radiálního bobtnání došlo ke zlepšení této charakteristiky oproti referenci u všech modifikačních skupin. Nejlepších výsledků dosáhla skupina kombinující termickou úpravu a impregnaci v koncentraci 1/1. Zde se radiální bobtnání snížilo v průměru o 2,4 %. Je zajímavé pozorovat, že při snížení koncentrace impregnované pryskyřice na hodnotu 1/10 nastal pouze zhruba poloviční pokles radiálního bobtnání oproti předchozí skupině. Zároveň se tato hodnota téměř shodovala se skupinou ošetřenou pouze impregnací v koncentraci 1/0. Nejhorších výsledků poté dosáhly vzorky termicky modifikované s poklesem průměrně pouze o 0,6 % v porovnání s referenčními vzorky.

Jediné zvýšení tangenciálního bobtnání vykazovala skupina ošetřená pouze impregnací. Ta dosáhla oproti referenční skupině vyššího bobtnání o 3 %. Nejnižšími hodnotami disponovala skupina kombinující termickou modifikaci a impregnaci v koncentraci 1/1, stejně jako u bobtnání radiálního. V porovnání s touto skupinou dosáhly vzorky ošetřené termickou modifikací a impregnované čistou pryskyřicí

polovičního poklesu tangenciálního bobtnání. Konkrétně bobtnání pokleslo o 1,5 % v průměru. Výsledné hodnoty u skupiny termicky modifikovaných vzorků a vzorků ošetřených jak termickou modifikací, tak impregnací v koncentraci 1/10 byly téměř totožné s hodnotou skupiny referenční.

Hodnoty podélného bobtnání se u všech modifikačních skupin velmi blížili referenčním hodnotám. Nejlepších výsledků dosáhla skupina ošetřená termickou modifikací, kdy došlo k poklesu o 0,5 %. Nejhorší výsledek vykazovala skupina kombinující termickou úpravu a impregnaci v koncentraci 1/1, přičemž u ní v porovnání s referenční skupinou k žádné změně podélného bobtnání nedošlo.

Výsledné hodnoty objemového bobtnání mají podobný průběh jako je tomu u bobtnání tangenciálního. K jedinému nárůstu oproti referenčním vzorkům došlo u skupiny ošetřené pouze impregnací, a to o 1,9 %. Nejnižší hodnotou disponovali opět vzorky podrobené jak termické modifikaci, tak impregnaci v koncentraci 1/1. Objemové bobtnání v tomto případě kleslo o 4,9 %. Kombinace termické modifikace a impregnace čistou pryskyřicí měla za následek také snížení, konkrétně o 3,3 %. Nejmenší účinek na změnu objemového bobtnání měla skupina pouze termicky modifikovaná a skupina ošetřena jak termicky, tak impregnací v poměru 1/10.

Pro porovnání ve studii z roku 2019 Wang *et al.* impregnovali pryskyřicí v koncentraci 20 % dřevo borovice a zjistili pokles radiálního bobtnání zhruba o 49 %. U tangenciálního a objemového bobtnání došlo také ke snížení a to o 50 % a 51 %. Ve studii, kterou provedli Qin, Dong and Li v roce 2019, kdy impregnovali pryskyřicí dřevo topolu a eukalyptu zjistili, že topol vykazoval pokles objemového bobtnání o 7 % a u dřevo eukalyptu bylo bobtnání sníženo o 10 %. Výsledky změny tangenciálního a objemového bobtnání v těchto studiích jsou v rozporu z našimi výsledky, neboť naše hodnota radiálního i objemového bobtnání mírně vzrostla. To však může být způsobeno vysokou koncentrací námi použité pryskyřice.

V souladu s našimi výsledky skupin kombinující termickou modifikaci i impregnaci je studie z roku 2016. V té bylo termicky modifikováno dřevo borovice a následně impregnováno různými látkami. Všechny výsledky ukazují pokles jak radiálního, tak tangenciálního bobtnání. (Lahtela and Kärki 2016)

Pevnost v tlaku

Z výsledných hodnot experimentální části jsme dospěli k následujícím závěrům:

Zajímavý výsledek vykazují vzorky buku ošetřené termickou modifikací 210 °C. U nich došlo k mírnému nárůstu pevnosti v tlaku podél vláken průměrně o 4,5 % oproti referenční skupině. Tento výsledek je však v rozporu s odbornou literaturou. Hill (2006) ve své publikaci uvádí, že termická modifikace má obecně za následek pokles pevnosti dřeva. Zároveň tvrdí, že tvrdé dřeviny vykazují znatelnější pokles pevnosti nežli dřeviny jehličnaté. Stejně tvrzení předkládá i Matovič (1993), podle nějž dokonce nastává prudký pokles pevnosti při vystavení dřeva teplotě nad 200 °C. U vzorků impregnovaných pryskyřicí v koncentraci 1/0 došlo oproti referenční skupině k mírnému poklesu naměřených hodnot pevnosti tlaku v průměru o 1,5 %. Tento výsledek je poměrně těžké porovnat, neboť nebylo provedeno mnoho studií, pokud vůbec nějaké, které by zkoumali impregnaci dřeva neředěnou pryskyřicí. Ve většině studií bylo dřevo impregnováno pryskyřicí maximálně do koncentrace cca 40 %. Takovou studii provedl Wang *et al.* (2019), kdy impregnovali pryskyřicí dřevo borovice a při 30 % koncentraci pryskyřice zjistily nárůst pevnosti v tlaku. Uvedli však, že při zvyšování koncentrace nad 20 % zůstávaly hodnoty pevnosti téměř stabilní. Je tedy možné, že při vyšších koncentracích impregnované pryskyřice může docházet i k mírnému poklesu pevnosti v tlaku. V případě skupin kombinující termickou modifikaci a impregnaci pryskyřicí pozorujeme značně rozdílné výsledky. U vzorků impregnovaných čistou pryskyřicí vzrostla pevnost v tlaku o 6,6 % oproti referenční skupině. Skupina s koncentrací impregnované pryskyřice 1/1 naopak vykazuje pokles pevnosti, a to o 6 %. Vzorky s nejnižší koncentrací pryskyřice dosáhli nejlepších výsledků, kdy jejich pevnost v tlaku vzrostla oproti referenci v průměru o 10 %.

7.4 SWOT analýza vyvinutého materiálu

Swot analýza představuje univerzální analytický nástroj využívaný pro hodnocení vnitřních a vnějších faktorů, které v našem případě ovlivňují úspěšnost vyvinutého materiálu. Název této analýzy je odvozen od počátečních písmen anglických názvů jednotlivých faktorů. Ty můžeme vysvětlit takto:

- Strengths (S) – silné stránky
- Weaknesses (W) – slabé stránky
- Opportunities (O) – příležitosti
- Threats (T) – hrozby (Management mania, 2020)

Tab. 9 ukazuje běžně užívanou vizuální podobu SWOT analýzy.

Tab. 9: Běžná podoba SWOT analýzy

Silné stránky (S)	Slabé stránky (W)
Příležitosti (O)	Hrozby (T)

SWOT analýza má však také své nevýhody. A to že značně je statická a také velmi subjektivní. Z toho důvodu je stále častěji nahrazována dynamickou variantou této analýzy, tzv. analýzou strategických scénářů. Možné strategické scénáře jsou následující:

- Strategie (SO) – jde o ideální stav, kdy se snaží pomocí silných stránek využít příležitostí
- Strategie (WO) – zaměřuje se na zlepšení slabých stránek a využití příležitostí
- Strategie (ST) – snaží se o využití svých silných stránek a vyvarování se hrozeb
- Strategie (WT) – snaží se o minimalizaci slabých stránek a čelení hrozeb (Jakubíková 2013)

Pro určení jednotlivých strategií je z analýzy SWOT odvozena matice TOWS, kterou jsme použili i v této práci (Tab. 10).

Tab. 10: SWOT analýza (TOWS matice) námi vyvinutého materiálu

<p>SWOT</p>	<p>Silné stránky (S):</p> <p>Změna hmotnosti: Nejlepších výsledků dosáhly skupiny Termo. 210 °C a Impr.1/10+termo.</p> <p>Objemové bobtnání: Nejlepších výsledků dosáhla skupina Impr.1/1+termo.</p> <p>Pevnost v tlaku: Nejlepších výsledků dosáhla skupina Impr.1/10+termo.</p>	<p>Slabé stránky (W):</p> <p>Změna hmotnosti: Nejhorších výsledků dosáhla skupina Impr.1/0</p> <p>Objemové bobtnání: Nejhorších výsledků dosáhla skupina Impr.1/0</p> <p>Pevnost v tlaku: Nejhorších výsledků dosáhla skupina Impr.1/1+termo.</p>
<p>Příležitosti (O):</p> <p>Při vhodné volbě technologie modifikace, může dojít ke zlepšení vlastností: rozměrové stability, mechanických vlastností, odolnosti vůči abiotickým a biotickým činitelům atd. Např. v našem případě u pevnosti v tlaku u skupiny Impr.1/10+termo.</p>	<p>Strategie SO</p> <p>Zvolit kombinaci termické modifikace a impregnace. Zároveň zjistit a zvolit vhodnou koncentraci pryskyřice k dosažení ideálních výsledků u všech vlastností.</p>	<p>Strategie WO</p> <p>Zjistit a zvolit vhodnou koncentraci pryskyřice k dosažení ideálních výsledků u všech vlastností. Případně impregnaci kombinovat s termickou úpravou.</p>
<p>Hrozby (T):</p> <p>Při volbě nevhodné technologie modifikace, může dojít místo ke zlepšení ke zhoršení cílených vlastností modifikovaného materiálu. Např. v našem případě u skupiny Impr.1/0 při bobtnání, kdy byla zřejmě použita příliš velká koncentrace pryskyřice.</p>	<p>Strategie ST</p> <p>Zvolit kombinaci termické modifikace a impregnace v ideální koncentraci. Vyvarovat se impregnace v tak vysoké koncentraci jako v našem případě. (Impr.1/0)</p>	<p>Strategie WT</p> <p>Zvolit kombinaci termické modifikace a impregnace. V případě pouze impregnace se vyvarovat v tak vysoké koncentraci jako v našem případě. (Impr.1/0)</p>

8 Závěr

Cílem práce bylo provést rešerši se zaměřením na vlastnosti termicky modifikovaného dřeva buku impregnovaného pryskyřicí a experimentální určení vlivu vybraných faktorů na fyzikální a mechanické charakteristiky termicky upraveného dřeva impregnovaného pryskyřicí. Na základě naměřených dat byly učiněny tyto závěry:

K největšímu nárůstu hmotnosti došlo u vzorků pouze impregnovaných pryskyřicí v koncentraci 1/0. Když byla tato koncentrace impregnované pryskyřice skombinována s termickou modifikací, hodnoty hmotnosti značně klesly. Z toho vyplývá, že aplikace termické modifikace na impregnované vzorky významně ovlivňuje jejich výslednou hmotnost. U vzorků kombinujících termickou modifikaci 210 °C a impregnaci pryskyřicí v koncentraci 1/1 došlo k nárůstu hmotnosti. Naopak vzorky kombinující termickou modifikaci 210 °C a impregnaci pryskyřicí v koncentraci 1/10 představovali skupinu s nejnižšími hodnotami hmotnosti. Lze tedy tvrdit že pokud jsou přítomny obě modifikace, má koncentrace impregnované pryskyřice velký vliv na výslednou hmotnost.

Z naměřených hodnot bobtnání dosáhly nejlepších výsledků vzorky kombinující termickou modifikaci 210 °C a impregnaci pryskyřicí v koncentraci 1/1. Toto zjištění bylo shodné jak pro radiální, tangenciální tak i objemové bobtnání. U podélného bobtnání vykazovali nejlepší výsledky vzorky ošetřené termickou modifikací 210 °C. Tyto vzorky však zároveň disponovali nejhoršími výsledky u bobtnání radiálního. Pro tangenciální a objemové bobtnání byly zjištěny nejhorší výsledky u skupiny pouze impregnované pryskyřicí v koncentraci 1/0. Nejhorší výsledky podélného bobtnání vykázali vzorky kombinující termickou modifikaci 210 °C a impregnaci pryskyřicí v koncentraci 1/1, kdy nedošlo k žádné změně v porovnání s referenční skupinou.

Nejvyšších hodnot pevnosti v tlaku podél vláken dosáhla skupina vzorků kombinující termickou modifikaci 210 °C a impregnaci pryskyřicí v koncentraci 1/10. Naopak nejnižší hodnoty byly zjištěny u vzorků kombinující termickou modifikaci 210 °C a impregnaci pryskyřicí v koncentraci 1/1. U skupiny, která byla pouze impregnována pryskyřicí v koncentraci 1/0 došlo překvapivě také k poklesu pevnosti v tlaku. Vzorky kombinující termickou modifikaci 210 °C a impregnaci pryskyřicí v koncentraci 1/0 však

dosáhli zvýšení pevnosti v tlaku. Z těchto výsledků můžeme vyvodit závěr, že koncentrace impregnované pryskyřice má významný vliv na hodnoty pevnosti v tlaku podél vláken, a to jak při současné přítomnosti i absenci termické modifikace.

Ze všech experimentálně naměřených dat můžeme prohlásit, že všechny varianty modifikace působili v menší či větší míře na fyzikální i mechanické vlastnosti dřeva, a to jak pozitivně, tak negativně. Po vyhodnocení naměřených hodnot jsme zjistili, že v největší míře ovlivnili vlastnosti dřeva skupiny kombinující termickou modifikaci 210 °C a impregnaci dřeva v koncentracích 1/1 a 1/10 ať už pozitivně, nebo negativně. Pro bližší určení vhodné kombinace modifikací, by bylo za potřebí provést rozsáhlejší výzkum s větším počtem variant koncentrace pryskyřice a větším počtem zkušebních těles.

9 Seznam literatury a použitých zdrojů

1. ACOSTA, Ricardo, Jorge Augusto MONTOYA ARANGO and Emilin Joma DA SILVA, 2021. Technologies Applied to Wood Heat Treatments, a Review. *Scientia et Technica* [online]. **26**(2), 129–136. ISSN 0122-1701. Available at: doi:10.22517/23447214.22641
2. ALTGEN, Michael, Muhammad AWAIS, Daniela ALTGEN, André KLÜPPEL, Mikko MÄKELÄ and Lauri RAUTKARI, 2020. Distribution and curing reactions of melamine formaldehyde resin in cells of impregnation-modified wood. *Scientific reports* [online]. **10**(1), 3366. ISSN 20452322. Available at: doi:10.1038/s41598-020-60418-3
3. BAYSAL, Ergun, Saban KART, Hilmi TOKER and Selim DEGIRMENTEPE, 2014. Some physical characteristics of thermally modified oriental-beech wood. *Maderas: Ciencia y Tecnologia* [online]. **16**(3), 291–298. ISSN 0718221X. Available at: doi:10.4067/S0718-221X2014005000022
4. BONEKA, Arfah Shawati, Mohd Khairun Anwar UYUP, Lee Seng HUA, Nordahlia Abdullah SIAM, Sabiha SALIM and Zaidon ASHAARI, 2021. Sorption isotherm and physico-mechanical properties of kedondong (*Canarium* spp.) wood treated with phenolic resin. *Construction and Building Materials* [online]. **288**. ISSN 09500618. Available at: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123060
5. ČÍŽKOVÁ PAVLA, HUBENÝ PAVEL and SVOBODA MIROSLAV, 2017. *SOUČASNÉ ROZŠÍŘENÍ SMRKU ZTEPILÉHO A BUKU LESNÍHO V NÁRODNÍM PARKU ŠUMAVA V ÚZEMÍ PONECHANÉM SAMOVOLNÉMU VÝVOJI: DOCHÁZÍ KE ZMĚNĚ DRUHOVÉ SKLADBY VE PROSPĚCH BUKU LESNÍHO?*
6. DUBOVSKÝ, Ján, Marián BABIAK and Igor ČUNDERLÍK, 2001. Textúra, štruktúra a úžitkové vlastnosti dreva. 106. ISBN 80-228-1014-2.
7. ESTEVES, Bruno M and Helena M PEREIRA, 2009. *Heat treatment of wood*.
8. HÉDL, Radim, 2004. *Vegetation of beech forests in the Rychlebské Mountains, Czech Republic, re-inspected after 60 years with assessment of environmental changes*.
9. HILL, Callum A. S., 2006. Wood modification : chemical, thermal and other processes. 239.

10. HORÁČEK, Petr, 1998. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. B.m.: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-7157-347-7.
11. JAKUBÍKOVÁ, Dagmar, 2013. *Strategický marketing : strategie a trendy*. B.m.: Grada. ISBN 978-80-247-4670-8.
12. KAČÍK, František and Danica KAČÍKOVÁ, 2010. *CHEMICKÉ ZMENY PRI TERMICKEJ MODIFIKÁCI DREVA*.
13. LAHTELA, Ville and Timo KÄRKI, 2016. Effects of impregnation and heat treatment on the physical and mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris*) wood. *Wood Material Science and Engineering* [online]. **11**(4), 217–227. ISSN 17480280. Available at: doi:10.1080/17480272.2014.971428
14. MARTINEZ DEL CASTILLO, Eurne, Christian S. ZANG, Allan BURAS, Andrew HACKET-PAIN, Jan ESPER, Roberto SERRANO-NOTIVOLI, Claudia HARTL, Robert WEIGEL, Stefan KLESSE, Victor RESCO DE DIOS, Tobias SCHARNWEBER, Isabel DORADO-LIÑÁN, Marieke VAN DER MAATEN-THEUNISSEN, Ernst VAN DER MAATEN, Alistair JUMP, Sjepan MIKAC, Bat-Enerel BANZRAGCH, Wolfgang BECK, Liam CAVIN, Hugues CLAESSENS, Vojtěch ČADA, Katarina ČUFAR, Choimaa DULAMSUREN, Jozica GRICAR, Eustaquio GIL-PELEGRÍN, Pavel JANDA, Marko KAZIMIROVIC, Juergen KREYLING, Nicolas LATTE, Christoph LEUSCHNER, Luis Alberto LONGARES, Annette MENZEL, Maks MERELA, Renzo MOTTA, Lena MUFFLER, Paola NOLA, Any Mary PETRITAN, Ion Catalin PETRITAN, Peter PRISLAN, Álvaro RUBIO-CUADRADO, Miloš RYDVAL, Branko STAJIĆ, Miroslav SVOBODA, Elvin TOROMANI, Volodymyr TROTSIUK, Martin WILMKING, Tzvetan ZLATANOV and Martin DE LUIS, 2022. Climate-change-driven growth decline of European beech forests. *Communications Biology* [online]. **5**(1), 163. ISSN 2399-3642. Available at: doi:10.1038/s42003-022-03107-3
15. MATOVIČ, Anton, 1993. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva : určeno pro posl. lesnické fak., obor dřevařský a lesnický*. B.m.: Vysoká škola zemědělská. ISBN 80-7157-086-9.
16. MILITZ, Holger, 2002. *Heat Treatment Technologies in Europe: Scientific Background and Technological State-of-Art*.

17. MITANI, Andromachi, 2013. HEAT TREATMENT EFFECT ON COLOUR CHANGES OF BEECH (FAGUS SYLVATICA) WOOD PRO LIGNO [online]. ISSN 1841-4737. Available at: www.linocolor.com
18. MUSIL, Ivan, Jana MÖLLEROVÁ and ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. LESNICKÁ A ENVIRONMENTÁLNÍ FAKULTA., 2005. *Lesnická dendrologie. 2, Listnaté dřeviny: přehled dřevin v rámci systému rostlin krytosemenných*. B.m.: Česká zemědělská univerzita. ISBN 8021313676.
19. QIN, Yinluan, Youming DONG and Jianzhang LI, 2019. EFFECT OF MODIFICATION WITH MELAMINE–UREA–FORMALDEHYDE RESIN ON THE PROPERTIES OF EUCALYPTUS AND POPLAR. *Journal of Wood Chemistry and Technology* [online]. **39**(5), 360–371. ISSN 15322319. Available at: [doi:10.1080/02773813.2019.1636821](https://doi.org/10.1080/02773813.2019.1636821)
20. REINPRECHT, Ladislav and Miloš. PÁNEK, 2016. *Trvanlivost a ochrana dřeva*. ISBN 978-80-213-2660-6.
21. ROWELL, Roger M., 2012. Moisture properties. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, Second Edition* [online]. 75–98 [accessed. 2022-04-08]. Available at: [doi:10.1201/B12487/HANDBOOK-WOOD-CHEMISTRY-WOOD-COMPOSITES-ROGER-ROWELL](https://doi.org/10.1201/B12487/HANDBOOK-WOOD-CHEMISTRY-WOOD-COMPOSITES-ROGER-ROWELL)
22. SANDBERG, Dick, Andreja KUTNAR and George MANTANIS, 2017. *Wood modification technologies - A review* [online]. 1. December 2017. B.m.: SISEF - Italian Society of Silviculture and Forest Ecology. ISSN 19717458. Available at: [doi:10.3832/ifor2380-010](https://doi.org/10.3832/ifor2380-010)
23. SIMSEK, Hakan, Ergun BAYSAL and Huseyin PEKER, 2010. Some mechanical properties and decay resistance of wood impregnated with environmentally-friendly borates. *Construction and Building Materials* [online]. **24**(11), 2279–2284. ISSN 09500618. Available at: [doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.028](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.028)
24. ÚHÚL, 2020. Informace o stavu lesů .
25. VACEK, Stanislav, Anna PROKUPKOVÁ, Zdenek VACEK, Daniel BULU EK, Václav SIMUNEK, Ivo KRÁLÍČEK, Romana PRAUSOVÁ and Vojtech HÁJEK, 2019. Growth response of mixed beech forests to climate change, various management and game pressure in Central Europe. *Journal of Forest Science*

- [online]. **65**(9), 331–345. ISSN 1805935X. Available at: doi:10.17221/82/2019-JFS
26. WANG, Xinzhou, Xuanzong CHEN, Xuqin XIE, Shaoxiang CAI, Zhurun YUAN and Yanjun LI, 2019. Multi-scale evaluation of the effect of phenol formaldehyde resin impregnation on the dimensional stability and mechanical properties of *Pinus massoniana* Lamb. *Forests* [online]. **10**(8). ISSN 19994907. Available at: doi:10.3390/f10080646
 27. WESTIN, Mats, Pia LARSSON-BRELID, T NILSSON, A RAPP, J DICKERSON, Stig LANDE and Simon CRAGG, 2016. *Marine Borer Resistance of Acetylated and Furfurylated Wood – Results from up to 16 years of Field Exposure e.*
 28. ZEIDLER, Aleš, Vlastimil. BORŮVKA and ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA., 2016. *Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin - podklady pro cvičení.* ISBN 978-80-213-2674-3.
 29. ŽONCOVÁ, Michaela, Pavel HRONČEK and Bohuslava GREGOROVÁ, 2020. Mapping of the land cover changes in high mountains of western carpathians between 1990–2018: Case study of the low tatras national park (Slovakia). *Land* [online]. **9**(12), 1–20. ISSN 2073445X. Available at: doi:10.3390/land9120483

Internetové zdroje:

1. SWOT analýza. In: ManagementMania.com [online]. Wilmington (DE) 2011-2022, 30.09.2020 [cit. 10.04.2022]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/swot-analyza>