

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**VLIV IMPREGNACE PRYSKYŘICÍ NA VLASTNOSTI
LISTNATÉHO DŘEVA**

**THE INFLUENCE OF RESIN IMPREGNATION ON
THE PROPERTIES OF HARDWOOD**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

Bc. Filip Janoušek

VEDOUCÍ PRÁCE

doc. Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

PRAHA 2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Filip Janoušek

Dřevařské inženýrství

Název práce

Vliv impregnace pryskyřicí na vlastnosti listnatého dřeva

Název anglicky

The influence of resin impregnation on the properties of hardwood

Cíle práce

Cílem práce je zjistit vlastnosti listnatého dřeva, které je impregnováno pomocí pryskyřice. Na nemodifikovaném a pryskyřicí modifikovaném dřevě budou testovány jeho fyzikální, mechanické nebo technologické vlastnosti.

Metodika

Metodiku práce je možné rozdělit do následujících bodů dle časového harmonogramu:

- červenec – září 2023: Zpracování literární rešerše o metodách modifikace dřeva s důrazem na impregnaci pomocí polymerů.
- říjen – listopad 2023: Příprava materiálu a výroba modifikovaného dřeva pomocí impregnace pryskyřicí. Výroba, třídění a značení zkušebních těles z nemodifikovaného dřeva, jako i ze dřeva impregnovaného pryskyřicí.
- prosinec 2023 – únor 2024: Experimentální zjišťování vlivu impregnace pryskyřicemi na různé vlastnosti dřeva z listnatých dřevin. V rámci fyzikálních vlastností bude ověřován vliv impregnace na hustotu, vlhkost, bobtnání a sesychání nemodifikovaného dřeva a impregnovaného dřeva pomocí pryskyřice. Dále bude ověřována tvrdost nemodifikovaného dřeva, jako i dřeva impregnovaného pomocí pryskyřice.
- březen 2024: Zpracování výsledků v textové, tabulkové a grafické podobě. Diskuze a závěry.
- duben 2024: Odevzdání diplomové práce.

Doporučený rozsah práce

60 – 80 stran

Klíčová slova

impregnace, pryskyřice, fyzikální vlastnosti, mechanické vlastnosti

Doporučené zdroje informací

- BODIG, J., JAYNE, B. A. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold Company New York, Cincinnati, Toronto, London, Melbourne, 1982, 712 s.
- HILL, C. A. S. Wood modification: Chemical, thermal and other processes. Chichester: John Wiley & Sons, 2006, 249 s. ISBN 0-470-02172-1.
- KOLLMANN, F. F. P., COTE, W. A. Jr. Principles of wood science and technology: I. Solid wood. Springer Science & Business Media, 2012, 592 s. ISBN: 978-3-642-87928-
- NICHOLAS, D. D. Wood deterioration and its prevention by preservative treatments: Degradation and protection of wood. Syracuse University Press, 1982, 380 s. ISBN: 978-0-81562-285-7
- RAHMAN, M. D. Wood polymer nanocomposites: Chemical modifications, properties and sustainable applications. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2017, 314 s. ISBN: 978-3-319-65734-9
- REINPRECHT, L. Wood deterioration, protection, and maintenance. Chichester: John Wiley & Sons Inc., 2016, 340 s. ISBN 978-1-119-10653-1.
- ROWELL, R. M. Handbook of wood chemistry and wood composites. 2. vydání, Boca Raton: CRC Press, 2012, 703 s. ISBN: 978-1-43985-380-1
- SANDBERG, D., KUTNAR, A., KARLSSON, O., JONES, D. Wood modification technologies: Principles, sustainability, and the need for innovation. Boca Raton, USA: CRC Press, 2021, 442 s. ISBN: 978-1-138-49177-9
- SMITH, R. Biodegradable polymers for industrial applications. Boca Raton: CRC Press, 2005, 532 s. ISBN 0-8493-3466-7.
- THAKUR, V. K. Lignocellulosic polymer composites: Processing, characterization, and properties. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014, 584 s. ISBN: 978-1-118-77357-4.
-

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Kateřina Hájková, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 9. 5. 2023

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 28. 7. 2023

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 12. 02. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „**Vliv impregnace pryskyřicí na vlastnosti listnatého dřeva**“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Miroslava Gašparíka, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne

.....

Filip Janoušek

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Miroslavu Gašparíkovi, PhD. za vstřícný přístup a poskytnutí četných doporučení a informací, ze kterých jsem čerpal v průběhu zpracování práce. Dále patří mé poděkování paní Ing. Kateřině Hájkové, PhD. a panu Ing. Tomáši Holečkovi za provedení chemické modifikace.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá stanovením vlivu modifikace dřeva melamin-formaldehydovou pryskyřicí na barvu, tvrdost a vlhkostní charakteristiky dřeva. Modifikace byla provedena podtlakově-tlakovou impregnací vodným roztokem pryskyřice o dvou koncentracích a sice 40 % a 70 %. Testovanými dřevinami byly dub letní, buk lesní a bříza bělokorá.

Tvrdost byla měřena metodou podle Brinella se zatížením 500 N. Barva byla měřena v barevném prostoru CIEL*a*b*. Z vlhkostních charakteristik byla zjišťována rovnovážná vlhkost dřeva a celkové bobtnání a sesychání dřeva při vlhkosti nad mezi nasycení buněčných stěn. Rovněž byla zjišťována hustota dřeva a množství přijaté pryskyřice po impregnaci.

Výsledky potvrzují, že modifikace má na sledované vlastnosti významný vliv. Byl pozorován pokles světlosti barvy úměrně použité koncentraci. Tvrdost se zvýšila o 32–55 % při nižší koncentraci a o 55–74 % při vyšší koncentraci. Ve vlhkostních vlastnostech bylo zaznamenáno zhoršení účinků modifikace při vyšší koncentraci pryskyřice, kromě rovnovážné vlhkosti, která se snížila o 8 % při nižší koncentraci a o 7–17 % při vyšší. Celkový příjem vody byl při nižší koncentraci snížen o 17–22 % a bobtnání pokleslo o 15 %–32 %, při vyšší koncentraci se jednotlivé dřeviny velmi lišily, buk dosáhl snížení 30 %, bříza dosáhla 14 % a dub pouze 7 %. Výsledky bobtnání i hustoty odpovídají příjmu pryskyřice u jednotlivých dřevin.

Zjištěné efekty mají pozitivní vliv na využití dřeva tam, kde je vyžadována vysoká povrchová tvrdost a rozměrová stabilita, zejména se jedná o podlahoviny, pracovní desky, vybavení veřejných prostor, barové a pracovní stoly apod.

Klíčová slova: impregnace, pryskyřice, fyzikální vlastnosti, mechanické vlastnosti

Abstract

The diploma thesis deals with determining the influence of wood modification with melamine-formaldehyde resin on the color, hardness and moisture characteristics of wood. The modification was carried out by vacuum-pressure impregnation with an aqueous resin solution of two concentrations, namely 40% and 70%. The tested woods were summer oak, forest beech and white birch.

Hardness was measured by the Brinell method with a load of 500 N. Color was measured in the CIEL*a*b* color space. From the moisture characteristics, the equilibrium moisture of the wood and the overall swelling and drying of the wood at moisture above the saturation limit of the cell walls were determined. Wood density and the amount of resin received after impregnation were also determined.

The results confirm that the modification has a significant effect on the monitored properties. A decrease in color lightness was observed in proportion to the concentration used. Hardness increased by 32–55% at the lower concentration and by 55–74% at the higher concentration. In moisture properties, a deterioration of the modification effects was noted at higher resin concentration, except for equilibrium moisture, which decreased by 8% at the lower concentration and by 7–17% at the higher concentration. Total water uptake was reduced by 17–22% at the lower concentration and swelling was decreased by 15%–32%, at higher concentrations individual species varied greatly, beech achieved a 30% reduction, birch achieved 14% and oak only 7%. The swelling and density results correspond to the resin intake of individual wood species.

The observed effects have a positive effect on the use of wood, where high surface hardness and dimensional stability are required, especially flooring, worktops, equipment of public spaces, bar and work tables, etc.

Key words: impregnation, resin, physical properties, mechanical properties

Obsah

1. ÚVOD.....	10
2. CÍLE PRÁCE.....	11
3. ROZBOR PROBLEMATIKY	12
3.1. Struktura dřeva.....	12
3.1.1. Chemické složení.....	12
3.1.2. Anatomická stavba.....	14
3.1.3. Morfologická stavba	16
3.2. Voda ve dřevě	19
3.2.1. Rozložení vody ve dřevě	19
3.2.2. Rozměrové změny dřeva.....	21
3.3. Barva	23
3.3.1. Barevný prostor CIEL *a*b*	24
3.4. Tvrdost	25
3.5. Chemická modifikace dřeva	27
3.5.1. Modifikace syntetickými pryskyřicemi.....	28
3.5.2. Neformaldehydové modifikační látky	29
3.5.2.1. Acetanhydrid	29
3.5.2.2. Furfuryl-alkohol.....	30
3.5.2.3. Epoxidové pryskyřice	31
3.5.2.4. Silikony	32
3.5.3. Formaldehydové modifikační látky	33
3.5.3.1. Močovino-formaldehydové pryskyřice.....	33
3.5.3.2. Fenol-formaldehydové pryskyřice	34
3.5.3.3. Melamin-formaldehydové pryskyřice.....	35
4. METODIKA	39
4.1. Testované dřeviny	39
4.1.1. Buk lesní	39
4.1.2. Dub letní	40
4.1.3. Bříza bělokorá	41
4.2. Příprava testovacích těles	42
4.3. Vlhkostní charakteristiky	43

4.3.1. Stanovení hustoty	45
4.4. Měření barvy	46
4.5. Tvrdost	47
4.6. Impregnace	48
4.7. Vyhodnocení dat	50
5. VÝSLEDKY A DISKUSE	51
5.1. Nárůst hmotnosti po modifikaci (WPG)	51
5.2. Hustota	53
5.3. Vlhkost	55
5.4. Bobtnání	59
5.5. Barva	63
5.6. Tvrdost	64
6. ZÁVĚR	69
7. SEZNAM ZDROJŮ	70
8. PŘÍLOHY	80

1. ÚVOD

Dřevo je jedním z nejstarších a nejrozšířenějších materiálů, využívá se v mnoha odvětvích od energetického průmyslu, přes stavebnictví, nábytkářství, až k umělecké tvorbě. Dřevo má mnohé ceněné kvality jako například vzhled, haptické vlastnosti, pružnost, vysoký poměr pevnosti a hmotnosti, nicméně jakožto organický materiál je zatíženo i negativními vlastnosti, především má nízkou odolnost vůči biotickým i abiotickým činitelům, je nehomogenní, anizotropní, hygroskopické a vlivem vody mění rozměry. Právě bobtnání a sesychání je hlavním faktorem komplikujícím užití dřeva.

V posledních letech se zvyšuje tlak na rozšiřování využití obnovitelných materiálů, a tedy i dřeva. Pro úspěšnější uplatnění dřeva mezi jinými materiály je zapotřebí najít způsoby minimalizace jeho negativních vlastností při zachování ekonomické a ekologické výhodnosti těchto modifikací. Jednoduchým způsobem ochrany dřeva je jeho izolace od prostředí pomocí nátěrů a jiných povrchových úprav. Tyto ale mají velkou slabinu, při jakémkoli porušení této povrchové vrstvy dochází k okamžité ztrátě ochrany. Hlubkové modifikace dřeva touto slabinou netrpí a zároveň je možno tímto zásahem současně ovlivnit více vlastností dřeva najednou. I přesto, že se modifikace dřeva studuje na akademické úrovni již více než 70 let, teprve v posledních dekáдах došlo k významnému komerčnímu rozvoji. Základními skupinami jsou termická a chemická modifikace. Termická modifikace nabízí relativně nízké náklady a vysokou ekologičnost procesu, avšak výrazně snižuje mechanické vlastnosti. Modifikace chemickými látkami je obecně dražší, ale trpí menší ztrátou mechanických vlastností a je schopna pozitivně ovlivnit více vlastností najednou.

Chemická modifikace spočívá v synergickém efektu dřeva a jiné látky, která je vpravena do dřeva. Modifikace pryskyřicemi je základní metodou, kde se pryskyřice (UF, MF, PF, FA a jiné) vytvrzuje ve dřevě, spojí se se dřevem a výrazně posílí jeho strukturu. Tímto lze docílit zvýšení pevnostních charakteristik a rozměrové stability. Zvýšením tvrdosti se docílí vyšší odolnosti dřeva vůči poškrábání a opotřebení. Vysoká tvrdost povrchu umožňuje aplikovat dřevo do mechanicky náročných podmínek, například podlahy či pracovní desky. Vlivem pryskyřice mnohdy dochází k barevným změnám dřeva, což může být bráno negativně a je nutno s tím před modifikací dřeva uvažovat.

Tato práce se zaměřuje právě na popsání a změření těchto vlastností a může tak poskytnout užitečné poznatky pro další rozvoj využití melaminové pryskyřice pro modifikaci dřeva.

2. CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem této diplomové práce je posouzení vlivu chemické modifikace melamin-formaldehydovou pryskyřicí ve dvou odlišných koncentracích (40 a 70 %) na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti masivního listnatého dřeva. Masivní listnaté dřevo bylo reprezentováno dřevinami dub letní, buk lesní a bříza bělokorá. Sledované vlastnosti byly srovnávány na referenčním nemodifikovaném dřevě.

Na základě cíle práce lze stanovit tyto dílčí úkoly:

- stanovit rovnovážnou vlhkost a hustotu dřeva
- stanovit bobtnání dřeva
- stanovit Brinellovu tvrdost dřeva
- stanovit barevnou odchylku dřeva

3. ROZBOR PROBLEMATIKY

3.1. Struktura dřeva

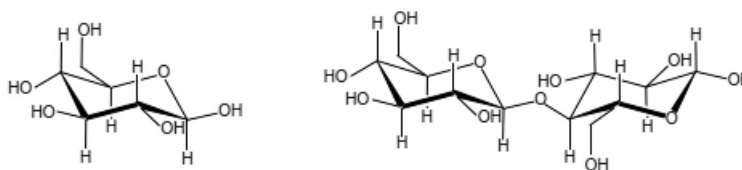
3.1.1. Chemické složení

Dřevo je vysoce složitý komplex různých látek. Základ tvoří biopolymery celulóza, hemicelulózy a lignin. Tyto složky dosahují 90–97 % dřevní hmoty, zbytek označujeme jako doprovodné složky dřeva, mezi něž řadíme především anorganické sloučeniny a extraktivní látky. Přesný podíl základních chemických složek se liší od dřeviny i části stromu, v literatuře se autoři (např. Lysý a Jirů, 1961; Gandelová et al., 2009; Borůvka a Babiak, 2016) obecně shodují na rozsahu u listnatých stromů:

- celulóza 41–48 % (jehličnany 46–56 %)
- hemicelulózy 20–35 % (jehličnany 20–25 %)
- lignin 15–30 % (jehličnany 25–35 %).

Celulóza vytváří nosnou kostru zdřevnatělých buněčných stěn anatomických elementů. Základní stavební jednotkou celulózy je disacharid celobióza, která vzniká spojením dvou molekul β -D glukopyranózy pomocí glykozidové vazby (viz. obrázek 1). Délka řetězce celulózy je charakterizována polymerizačním stupněm n , který je velmi variabilní, v nativním stavu se uvádí rozpětí 5 až 14 tisíc, po izolaci se zkracuje na 500 až 1500 (Šlezingerová a Gandelová, 2014). Celulóza má dvě pravidelně se střídající části.

Krystalická část má uspořádaný prostorový systém, je chemicky velice stálá, neváže vodu a tvoří průměrně 70 % celulózy. Zbytek je amorfni část, která nemá prostorové uspořádání, váže vodu a je vysoce reaktivní. Přesný podíl krystalické a amorfni části určuje mnoho vlastností dřeva. Nárůst krystalického podílu pozitivně ovlivňuje hustotu dřeva, Youngův modul pružnosti, pevnost v tahu, tvrdost. Naopak vyšší podíl amorfni části má za následek vyšší navlhavost a rozměrové změny dřeva (Požgaj et al., 1993).



Obrázek 1: Molekulární struktura celulózy (Hill, 2006)

molekula β -D-glukopyranózy (vlevo) a celobiózy (vpravo)

Celulóza má velmi vysokou pevnost v tahu díky vláknité struktuře a podélným kovalentním vazbám. V příčném směru jsou jednotlivá vlákna spojena slabšími vodíkovými vazbami, do kterých snadno vniká voda, což má za následek výrazný nepoměr mezi příčným a podélným bobtnáním (Hill, 2006; Gandelová et al., 2009; Rowell, 2012; Borůvka a Babiak, 2016).

Hemicelulózy je souhrnné označení dalších polysacharidů, které se od celulózy liší složením. Kromě D-glukózy obsahují D-xyulózu, D-galaktózu, D-arabinózu a další. Podle hlavní stavební složky rozlišujeme xylany, manany, galaktany a další. V listnatém dřevě je nejvyšší podíl xylanů, v jehličnatém se více vyskytují manany a galaktany. Hemicelulózy mají rovněž lineární uspořádání, avšak polymerizační stupeň dosahuje pouze 100–200 (xylany), nebo 60–70 (manany) (Fengel, 1989). Hemicelulózy doprovází celulózu a tvoří tmelící vrstvu mezi celulózou a ligninem. Převládá zde amorfni část, díky čemuž mají vysoký počet volných OH skupin. Jsou chemicky i termicky méně stálé a dají se snadno extrahovat roztokem alkálií (Gandelová et al., 2009; Čunderlík, 2010; Rowell, 2012).

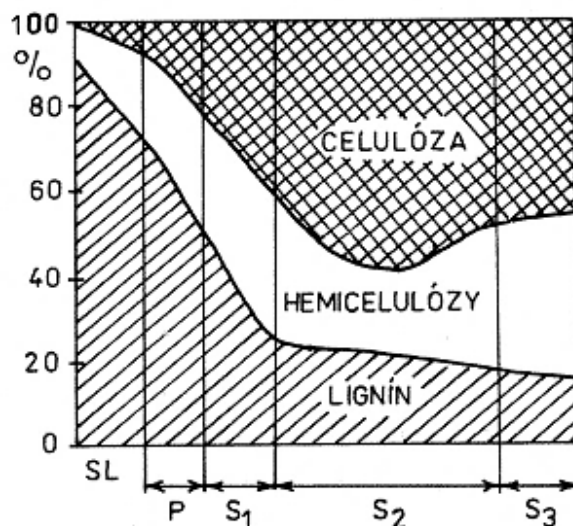
Lignin je vysokomolekulární hydrofobní polymer aromatické povahy a neurčité molekulové hmotnosti, jeho makromolekuly mají náhodnou trojrozměrnou strukturu bez uspořádání. Dodává dřevu pevnost, váže se na boční řetězce hemicelulózy pomocí různých typů vazeb a vyplňuje celulózovou kostru, tvoří tzv. lignopolysacharidové komplexy. Lignin obaluje polysacharidy a snižuje tak přístup vody do vazeb. Po celulóze je nejdůležitější a nejzastoupenější polymer dřeva. Ukládání ligninu do buněčné stěny je nerovnoměrné, nejvíce je obsaženo ve střední lamelle a primární buněčné stěně. Po chemické stránce nebyl dosud přesně definován, vzhledem k náhodné povaze polymerační reakce neexistuje definitivní struktura. Relativní molekulové hmotnosti se velmi různí v rozmezí od 2 100 do 85 000. Lignin dodává dřevu mechanickou pevnost (zejména tlakovou, ohybovou a rázovou), snižuje propustnost dřeva a podílí se na ochraně před biotickou degradací. Lignin je při pokojové teplotě tuhý, ale při teplotě kolem 140 °C měkne a v tomto stavu je pak možné dřevo tvarovat (Požgaj et al., 1993; Hill, 2006; Gandelová et al., 2009; Rowell, 2012; Šlezingerová a Gandelová, 2014).

Doprovodné složky mají ve dřevě malé zastoupení, obvykle 3–10 %. Mezi doprovodné složky řadíme anorganické látky, sacharidy, fenolické látky, terpeny, alkoholy a další. Tyto látky mají malé zastoupení ve dřevě, ale mnohdy mají výrazný vliv na fyzikální a technologické vlastnosti dřeva. Organické látky můžeme ze dřeva extrahovat pomocí rozpouštědel (např. vodou), takže se mnohdy označují jako extraktiva.

Složení a množství látek se výrazně mění od dřeviny, od pozice v kmeni, od stanoviště, ročního období apod. Hlavními složkami anorganických látek jsou vápenaté, draselné a hořečnaté soli, mangan, sodík, fosfor, chlor ad. Extrahování ze dřeva je možné pouze spálením (Lysý a Jirů, 1961; Gandelová et al., 2009; Rowell, 2012).

3.1.2. Anatomická stavba

Dřevo se skládá většinou z mrtvých anatomických elementů, tedy z buněčných stěn a lumenů buněk. Řetězce makromolekul celulózy o rozměrech přibližně $0,6 \times 1500$ nm se pomocí vodíkových vazeb seskupují po čtyřiceti do elementárních fibril. 20–60 elementárních fibril se spojuje do mikrofibril a ty se dále spojují po 20 do makrofibril. Makrofibrily dosahují tloušťky 400 nm a délky i několika mm (Požgaj et al., 1993). Mezi fibrilami na všech úrovních jsou prostory o velikosti jednotek nm, které jsou vyplněny amorfní látkou tvořenou zejména ligninem a hemicelulózami. Makrofibrily dále tvoří lamely, lamely tvoří vrstvy a z vrstev se skládá buněčná stěna. V rámci jednotlivých vrstev buněčné stěny se rovněž mění poměr jednotlivých chemických složek, jejich přibližné zastoupení v jednotlivých vrstvách znázorňuje obrázek 2 (Gandelová et al., 2009; Reinprecht, 2016).

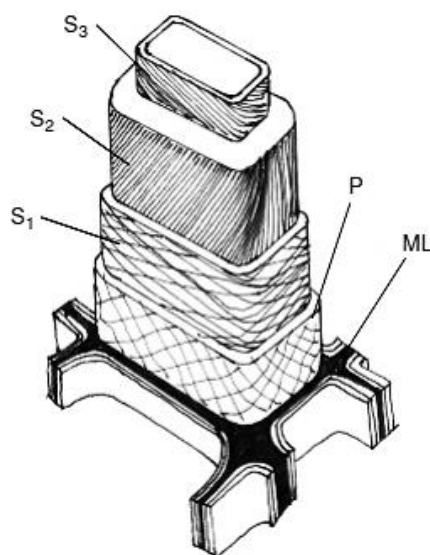


Obrázek 2: Přibližné zastoupení chemických složek ve vrstvách buněčné stěny (Požgaj et al., 1993)

Buněčná stěna je přítomna pouze u rostlinných buněk, ohraničuje buňku a určuje její tvar. U živých buněk rostoucích stromů je buněčná stěna díky celulózové fibrilární kostře velmi elastická, podílí se na příjmu, transportu a sekreci látek. U živých buněk je tvořena střední lamelou a primární buněčnou stěnou, která obklopuje cytoplazmu s organelami.

Po ukončení plošného růstu buněk dochází k tloušťnutí buněčné stěny, postupné lignifikaci a k odumření cytoplasmy. Lignifikovaná buněčná stěna není homogenní, má jednotlivé vrstvy a liší se podle typu buňky a stupně diferenciaci. Buněčné elementy dřeva jsou charakterizovány rozdělením na střední lamelu (ML), primární vrstvu (P), tři sekundární stěny (S1–S3) a lumen (viz. obr. 3) (Šlezingerová a Gandelová, 2014).

Střední lamela a primární vrstva jsou velice tenké vrstvy (0,1–0,5 μm) a velmi často se společně označují jako tzv. složená střední lamela. Střední lamela je koloidní, amorfni a silně lignifikuje, ve složení dominují pektinové látky, hemicelulózy a lignin, téměř neobsahuje celulózu. V primární vrstvě je vyšší obsah celulózy (7–15 %) a fibrily tvoří síť, přestože ve složení stále dominují pektiny a hemicelulózy. Orientace fibril vytyčuje dvě vrstvy primární stěny. Vnější vrstva (P1) má disperzní strukturu bez orientace, ve vnitřní vrstvě (P2) však můžeme pozorovat tendenci orientace fibril kolmo na podélnou osu (Požgaj et al., 1993; Horáček, 1998; Gandelová et al., 2009; Čunderlík, 2010).



Obrázek 3: Schéma buněčné stěny

(Hill, 2006)

Sekundární stěna tvoří převážnou část buněčné stěny, udává tvar buňky a skládá se ze tří vrstev. Směrem od vnější vrstvy (S1) k vnitřní (S3) klesá podíl ligninu ve prospěch polysacharidů. Lignin nezaplňuje všechny mezifibrilární prostory, do části je ukládána voda. Vnější vrstva (S1) je složením blízká primární stěně, fibrily jsou však orientovány do dvou vzájemně kolmých polí, s podélnou osou svírají úhel 45–80°. Vrstva S2 je jednoznačně nejširší, tvoří až 89 % celé buněčné stěny a zásadním způsobem ovlivňuje vlastnosti dřeva. Má nejvyšší podíl celulózy a fibrily jsou uloženy na husto rovnoběžně v pravotočivých spirálách v úhlu 5–15°. Úhel odklonu fibril předurčuje anizotropní

vlastnosti dřeva. Na okrajích vrstvy může být odklon fibril vyšší. Vnitřní (S3) vrstva je opět velmi tenká, obsah ligninu je nízký a u listnáčů vůbec nemusí lignifikovat. Fibrily jsou orientovány pod úhlem 50–90° (Požgaj et al., 1993; Horáček, 1998; Gandelová et al., 2009; Čunderlík, 2010; Sandberg, 2021).

Buněčná stěna v tomto složení nevymezuje celý povrch buňky. V pravidelném rozložení se vyskytují ztenčeniny (dvojtečky), kde chybí sekundární vrstva a v místě střední lamely je propustná membrána. Přes tyto ztenčeniny probíhá výměna látek mezi živými buňkami. Po odumření buňky může být propustnost ztenčenin velmi malá (např. u smrku), přesto však tudy voda prochází výrazně snadněji než přes stěnu buňky. Ztenčeniny jsou významné zejména u jehličnanů a jejich tvar je charakteristický pro jednotlivé dřeviny (Požgaj et al., 1993).

3.1.3. Morfologická stavba

Listnaté dřeviny jsou vývojově mladší než jehličnaté dřeviny. Jsou složeny z několika typů pletiv s dobře specializovanou funkcí. Základními elementy jsou libriformní vlákna, která zastávají mechanickou funkci. Vodivou funkci zastávají cévy a zásobní parenchymatické buňky. Kromě toho listnáče rovněž obsahují tracheidy, které se podílejí na vodivé i mechanické funkci. Přibližný podíl jednotlivých buněčných elementů na výběru listnatých dřevin ukazuje tabulka 1 (Dubovský et al., 2001).

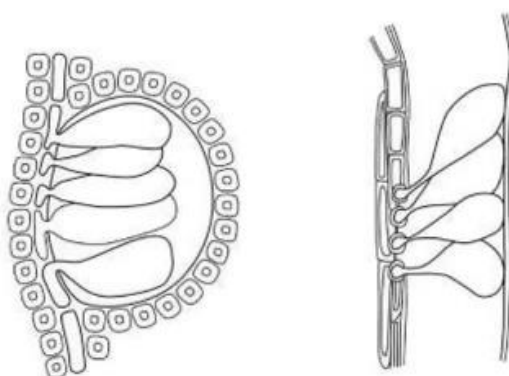
*Tabulka 1: Procentuální zastoupení buněčných elementů v listnatém dřevě
(Balabán, 1955)*

Dřevina	Cévy	Vlákna*	Dřeňové paprsky	Dřevní parenchym
Bříza	25	65	9	2
Buk	31	37	27	5
Dub	40	44	16	/
Habr	10	66	22	2
Javor	7	76	17	<1
Lípa	17	72	9	2
Olše	29	58	12	<1
Topol	26	61	13	/
Vrba	52	31	17	<1

**libriformní vlákna a tracheidy*

Cévy jsou svým tvarem uzpůsobeny k maximálně efektivnímu vedení vody, jedná se o válcovité buňky s dutým jádrem. Mohou dosahovat velkých průměrů, a právě podle velikosti a rozmístění cév dělíme listnaté dřeviny na roztroušeně a kruhovitě pórovité. Kruhovitě pórovité dřeviny mají cévy soustředěny u letokruhů a jsou dobře viditelné pouhým okem, mohou dosahovat průměru až 0,5 mm (Böhm a Zeidler, 2018). Jednotlivé cévní články se napojují do cévních systémů, tento systém má zcela otevřené příčné přihrádky (perforace). Cévní systémy jsou nejdelším typem buněk ve dřevě, běžně dosahují délky do 10 cm, např. u dubu však mohou být dlouhé až 7 m (Borůvka a Babiak, 2016).

Pohyb vody je způsoben kapilárními silami a tahovým napětím vody. Aby tyto síly působily, nesmí do systému vniknout vzduch. V případě poškození kmene (např. hmyzem) jsou porušené cévy rychle zacpány thylem, což jsou výrůstky parenchymatických buněk (viz. obr. 4). Takové cévy se stávají trvale neprůchozí, avšak systém transportu vody může nadále fungovat. U jehličnanů se cévy nevyskytují, transport vody zajišťují tenkostěnné tracheidy, mezi kterými se voda přesouvá pomocí ztenčenin (dvojteček). V případě poškození jsou tyto ztenčeniny uzavřeny. Výskyt thyl a uzavřených dvojteček se zvyšuje i ve zdravém dřevě vlivem stárnutí a vysychání dřeva. Oba tyto mechanismy jsou významným faktorem zhoršující proimpregnovatelnost dřeva (Lysý a Jírů, 1961; Horáček, 1998; Gandelová et al. 2009).

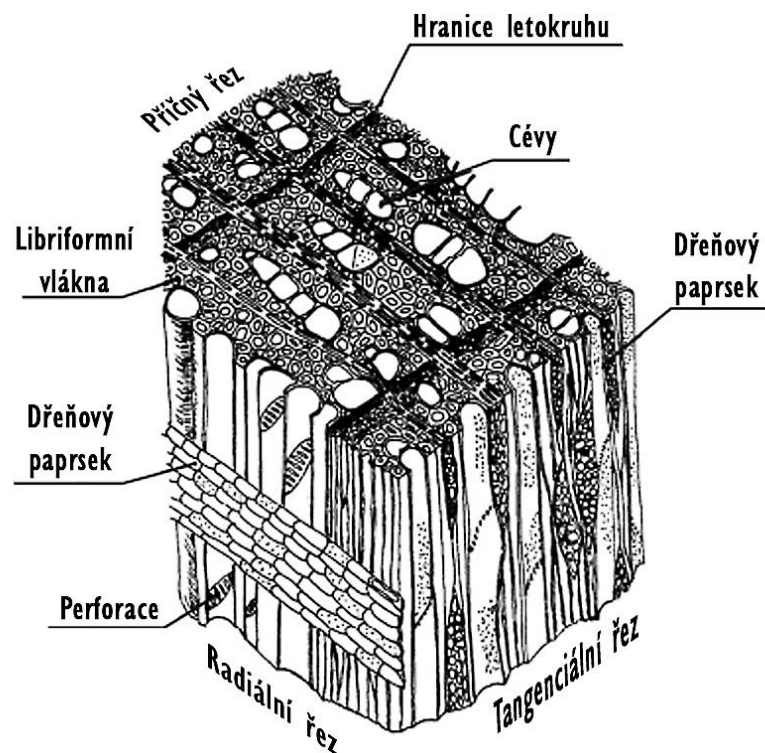


Obrázek 4: Thyly v cévě (Sandberg, 2021)
v příčném řezu (vlevo) a v podélném řezu (vpravo)

Librifonní vlákna, přesněji sklerenchymatické buňky, zabezpečují mechanickou funkci, mají silnější buněčné stěny, malý průměr lumenu (5 až 30 μm) a jejich délka dosahuje nanejvýš 2 mm. Jejich zastoupení ve dřevě činí 36 až 76 % (Borůvka a Babiak, 2016). Mají zahrocené konce, kterými se do sebe vzájemně vклиňují, jejich vzájemná

výměna živin je ale minimální kvůli nízkému počtu ztenčenin. Libriformní vlákna a tracheidy mají velice podobnou stavbu (Schmulsky a Jones, 2011; Čunderlík, 2010).

Parenchymatické buňky plní podobně jako v jehličnatém dřevě zásobní funkci, jejich zastoupení je u listnáčů do 15 %, u jehličnanů pouze 5–10 %. Kromě zásobní funkce plní parenchym i funkci vodivou, zajišťuje asimilační proud v radiálním směru (Čunderlík, 2009; Borůvka a Babiak, 2016). Parenchymatické buňky mají oproti všem ostatním buňkám tvar kvádrů, nebo krychle a zůstávají dlouho živé. Řady parenchymatických buněk probíhající paprsčitě od dřene směrem ke kůře nazýváme dřevové paprsky, které jsou významným vodítkem určování dřevin. Přestože se vyskytují ve všech dřevinách, jejich velikost a struktura jsou charakteristické pro každou dřevinu. U jehličnanů jsou obecně velice úzké, naopak u listnáčů mohou být velmi výrazné (např. buk). Právě dřevové paprsky jsou hlavním důvodem rozdílných vlastností dřeva v radiálním a tangenciálním směru. Kromě dřevových paprsků tvoří parenchymatické buňky i tzv. podélný (dřevní) parenchym. Obrázek 5 zachycuje obecnou strukturu listnatého dřeva (Gandelová et al., 2009; Čunderlík, 2010; Böhm a Zeidler, 2018).



Obrázek 5: Schématická struktura listnatého dřeva (Čunderlík, 2010)

3.2. Voda ve dřevě

3.2.1. Rozložení vody ve dřevě

Dřevo je hygroskopický materiál a v přirozené formě do své struktury váže vodu. Voda se ve dřevě může vyskytovat ve třech formách. První formou je voda chemicky vázaná. Tato je obsažena v samotné struktuře chemických sloučenin a z dřeva je odstranitelná pouze jeho spálením, není možné ovlivnit její množství. Její podíl v sušině je do 2 % a při hodnocení vlastností dřeva se s ní neuvažuje. Druhou formou je voda volná, která se vyskytuje v lumenech buněk a mezibuněčných prostorech, je vázaná kapilárními silami (Lysý a Jírů, 1961). Tato voda neovlivňuje výrazně vlastnosti dřeva, pouze zvyšuje jeho hmotnost a začíná se ve dřevě hromadit až po překročení meze nasycení buněčných stěn. Pro technologické využití dřeva představuje komplikaci pouze u ohýbání dřeva (Požgaj et al., 1993; Horáček, 1998; Schmulsky a Jones, 2011).

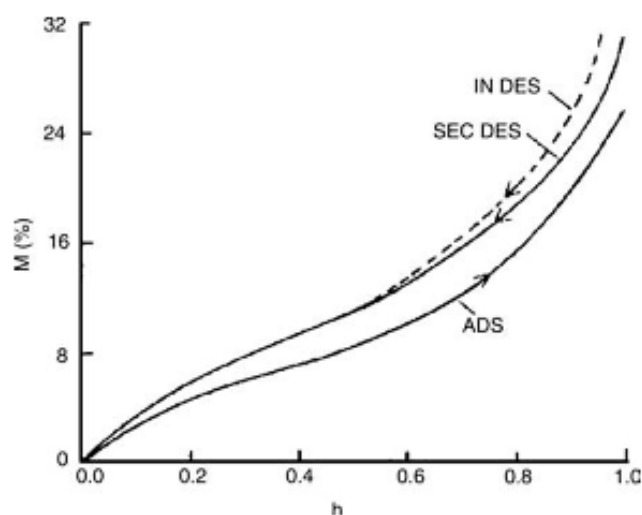
Nejdůležitější je z hlediska změn vlastností dřeva voda hygroskopická (vázaná), která je lokalizovaná v buněčných stěnách. Váže se prostřednictvím vodíkových můstků na volné hydroxylové (OH) skupiny hemicelulózy a amorfni části celulózy. Tato voda se ukládá ve dřevě v rozmezí absolutní vlhkosti od 0 % do meze nasycení buněčných stěn, která se mírně liší od dřeviny (u našich dřevin se běžně uvažuje 30 %). Voda ve vazbách výrazně snižuje pevnostní vlastnosti dřeva, zpravidla negativně ovlivňuje fyzikální vlastnosti a urychluje degradaci dřeva biotickými činiteli (Lysý a Jírů, 1961; Požgaj et al., 1993; Gandelová et al., 2009).

Jak bylo řečeno, užité vlastnosti dřeva ovlivňuje především voda vázaná, která zvyšuje svůj podíl přibližně do tzv. meze nasycení buněčných stěn (MNBS), která se pohybuje mezi 22–32 % absolutní vlhkosti dřeva. Nad touto mezí se již vlastnosti dřeva mění pouze nevýrazně. MNBS udává hranici, kdy jsou všechny buněčné stěny plně nasyceny vodou, ale lumény buněk ani mezibuněčné prostory neobsahují žádnou vodu. Jedná se tedy o hranici mezi vodou vázanou a volnou. Tato hranice závisí především na druhu dřeviny, tj. anatomické a chemické stavbě dřeva, je nezávislá na teplotě. Průměrně se počítá tato hranice 30 % absolutní vlhkosti (Požgaj et al., 1993; Horáček, 1998; Hill, 2006; Rowell, 2012).

Podobný význam má i tzv. mez hygroskopicity (MH), která udává stejnou hranici. Oproti MNBS se liší především prostředím, kterému je dřevo vystaveno, zatímco MNBS předpokládá ponoření dřeva do kapalné vody, mez hygroskopicity předpokládá vystavení dřeva pouze vzdušné vlhkosti. Jedná se tedy o vlhkost, kterou dřevo dosáhne při

dlouhodobé expozici v relativní vzdušné vlhkosti plného nasycení. Tato charakteristika byla zavedena kvůli tomu, že je problematické v kapalné vodě dosáhnout prázdných buněčných prostor. Mez hygroskopicity je závislá na teplotě prostředí, s rostoucí teplotou klesá (Horáček, 1998; Hill, 2006).

Dřevo vystavené působení vzdušné vlhkosti a teplotě reaguje změnami vlhkosti. V případě konstantních vnějších podmínek dojde časem k ustálení vlhkosti dřeva, což nazýváme vlhkostní ekvilibrium, tedy rovnovážná vlhkost. Dosažení rovnovážného stavu v přirozeném prostředí není možné, neboť teplota i vlhkost jsou neustále proměnné a adsorpce i desorpce vody probíhá v různých částech dřeva současně. Pokud však umístíme dřevo do kontrolovaného stabilního prostředí, je možné definovat vztah vnější vlhkosti a vlhkosti dřeva. Tento vztah je stálý a definovatelný charakteristickou sigmoidou (tzv. sorpční isothermou), která se mírně liší pro jednotlivé dřeviny, tvar však zůstává stejný (viz. obr. 6). Charakteristický je rovněž odlišný průběh křivky ve směru adsorpce a desorpce, kdy křivka desorpce (tj. při snižování vlhkosti) vykazuje vyšší rovnovážnou vlhkost dřeva při identických podmínkách prostředí (např. při relativní vzdušné vlhkosti 60 % může tento rozdíl činit 3 %). Toto chování dřeva nazýváme jako tzv. hystereze sorpce, která je charakteristická pro všechny celulózové materiály. Z názvu isoterma je patrné, že podmínkou platnosti je neměnná teplota, která rovněž ovlivňuje rovnovážnou vlhkost dřeva (Tsoumis, 1991; Hill, 2006; Rowel et al., 2012).



Obrázek 6: Sorpční isoterma (Rowell, 2012)

Osa h – relativní vzdušnou vlhkost, osa M – absolutní vlhkost dřeva

ADS – hystereze adsorpce, SEC DES – desorpce

IN DES – průběh prvotního sušení dřeva z čerstvého stavu

3.2.2. Rozměrové změny dřeva

Mění-li se vlhkost dřeva v rozsahu do meze nasycení buněčných stěn, podléhá dřevo rozměrovým změnám. Rozměrové změny mají svůj původ v buněčné stěně, zvyšující se podíl vody v mezibuněčných prostorech a lumenech nemá tedy na bobtnání vliv. Tato vlastnost je jednou z největších nevýhod dřeva jakožto materiálu. Rozměrové změny mají odlišnou velikost v různých anatomických směrech dřeva, protože tato vlastnost vychází ze základních stavebních elementů dřeva – fibril, které mají vláknitý charakter a jsou uloženy ve dřevě v podélném směru. Voda se váže na volné OH skupiny v mezifibrilárních prostorech v buněčné stěně, čímž dochází k oddalování fibril. Bobtnání (resp. sesychání) dřeva má tedy anizotropní charakter. Jelikož molekuly vody neproniknou mezi fibrily do valenčního řetězce v podélném směru, rozměry se mění zejména v příčném směru a vzhledem k významné tloušťce vrstvy S2, se podíl bobtnání v příčném a podélném směru určuje podle orientace fibril v této vrstvě. Větší odklon fibril od podélné osy znamená větší podíl podélného bobtnání (Požgaj et al., 1993; Horáček, 1998). Horáček (1998) i další autoři se shodují na poměru bobtnání v jednotlivých anatomických směrech takto:

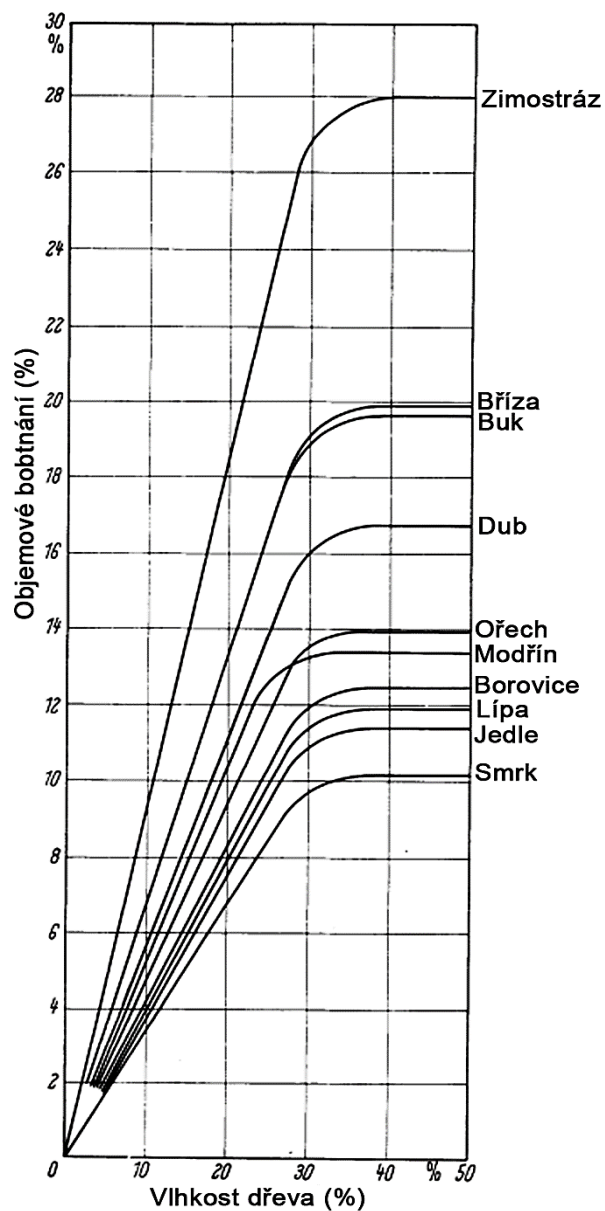
$$1 : 10 : 20 \text{ (podélný : radiální : tangenciální).}$$

V radiálním směru dřevo bobtná méně zejména z důvodu příčných parenchymatických buněk, které probíhají v radiálním směru a bobtnání snižují (Hill, 2006). Dalšími důvody anizotropie bobtnání jsou podélný parenchym a cévy, které bobtnají více v tangenciálním směru a u listnáčů např. poměr letního a jarního dřeva. Orientační průběh objemového bobtnání ve vztahu k vlhkosti dřeva u výběru dřevin zachycuje obrázek 7 (Požgaj et al., 1993).

Bobtnání a sesychání je reverzibilní proces, který probíhá po jedné trajektorii. Pro praktické účely se využívá tzv. koeficient bobtnání K_α , který se vypočte podle vzorce:

$$K_\alpha = \frac{\alpha}{\Delta w} \quad (1)$$

kde K_α je koeficient bobtnání s jednotkou $\% \cdot 1\%^{-1}$, tedy procentuální změna rozměrů na jedno procento změny vlhkosti dřeva, α je procentuální změna rozměru (objemu) a Δw je rozdíl vlhkosti před a po bobtnání (Požgaj et al., 1993).



Obrázek 7: Graf průběhu objemového bobtnání u vybraných dřevin
(Požgaj et al., 1993)

Analogicky se vypočítá i koeficient sesychání. Podle koeficientu objemového sesychání dělí Gandelová et al. (2009) dřeviny do následujících skupin:

- dřeva málo sesychavá – $K_{\beta} < 0,4$
 - tis, olše, vrba, topol, akát
- dřeva středně sesychavá – $K_{\beta} = 0,4-0,47$
 - borovice, smrk, jedle, dub, jilm, jasan
- dřeva hodně sesychavá – $K_{\beta} > 0,47$
 - modřín, bříza, buk, lípa

Pro zamezení, nebo snížení rozměrových změn dřeva jsou možné tři přístupy. Prvním je pokrýt vnější, nebo vnitřní povrch dřeva hydrofobním materiálem, který sníží schopnost dřeva přijímat vodu. Druhou možností je cíleně nabobtnat dřevní buňky a zabránit jejich opětovnému zmenšení po snížení vlhkosti, resp. zafixovat jejich stav. Třetí možností je zmenšení počtu volných hydroxylových skupin celulózy, např. jejich degradací, navázáním na jinou stabilní látku (Kollmann 1968).

3.3. Barva

Barva je jedním ze základních znaků při určování i využití dřevin. Jedná se o zrakový počitek, tento pojem tedy patří do oblasti psychosenzorických vjemů. Barvou rozumíme spektrální složení světelných paprsků odražených od povrchu dřeva (Liptáková a Sedliačik, 1989). Barvu dřeva určuje poměr jeho chemických složek, tedy celulóza, hemicelulózy, lignin a extrakční látky. Celulóza a hemicelulózy neabsorbují viditelné světlo a jeví se tak jako bílé. Lignin má v přírodní podobě barvu bledě žlutou. Nejvýraznější vliv na barvu dřeva mají extraktivní látky, přestože jejich zastoupení v objemu dřeva je minimální. Vyšší obsah tříslovin a pryskyřic, které způsobují tmavší zabarvení, rovněž zvyšují odolnost proti hnilobě, proto můžeme zhruba posuzovat trvanlivost dřevin podle barvy. Obecně platí, že dřevo je tím odolnější, čím je tmavší (Lysý a Jirů, 1961; Tsoumis 1991; Požgaj et al., 1993; Gandelová et al., 2009; Baar, 2010; Čunderlík, 2010).

Čunderlík (2010) rozděluje dřeva podle barvy do těchto skupin:

- bledá (např. smrk, habr, jedle)
- hnědá (např. dub, jasan, jilm, ořech)
- červená (např. borovice, modřín, třešeň, olše)
- zelená (např. akát).

Při hodnocení barvy je potřeba uvažovat vlhkost a stáří dřeva, neboť barva se v průběhu času mění. Obecně lze říci, že čerstvě pořezané dřevo s vysokou vlhkostí má vždy světlejší barvu. Po vysušení dřevo znatelně ztmavne v důsledku chemických změn, které nastávají při odumírání a vysychání buněk, ze stejného důvodu je jádrové dřevo tmavší, než běl. (Lysý a Jirů, 1961). Další tmavnutí následuje v průběhu let, především v důsledku působení UV záření. Nejvíce UV záření (80–90 %) pohlcuje lignin, který vlivem fotodegradace tmavne a uvolňuje se ze struktury dřeva. Následně je lignin

vyplavován vodou a spolu s ním i extraktivní látky a dřevo tak získává bílou barvu, resp. šedou, jelikož v otevřené struktuře dřeva se usazuje prach a jiné nečistoty. Tento jev je čistě povrchový, neboť UV záření proniká pouze do hloubky 75 μm , vlivem řetězových reakcí však může dřevo fotodegradovat až do hloubky 2 mm (Tsoumis 1991; Baar, 2010).

Barva dřeva je značně proměnlivá v rámci jedné dřeviny i jednoho stromu. U tropických dřevin jsou tyto rozdíly intenzivnější než u našich. Barvu dřeva také výrazně ovlivňují houby, bakterie a plísně, působením těchto činitelů se dřevo může zbarvit do červené, tmavě hnědé, bílé, černé a modré. Rovněž kontakt s kovy či chemikáliemi zapříčiňuje barevné změny. Podle barevných změn je tedy možno hodnotit vady ve struktuře dřeva, nebo napadení škůdci apod. (Lysý a Jírů, 1961; Borůvka a Babiak, 2016).

3.3.1. Barevný prostor CIEL*a*b*

Pro objektivní hodnocení barvy je zapotřebí najít kvantifikovatelné parametry barvy. Pro tyto potřeby existuje mnoho barevných systémů, které jsou vhodné pro různé aplikace, např. RGB ve světelné technice, CMYK v tiskařství, v laboratorním prostředí se téměř zcela využívá pravoúhlá trichromatická soustava CIEL*a*b* vytvořená mezinárodní komisí pro osvětlení (CIE). Tento 3D barevný prostor je definován třemi kolmými osami, které reprezentují množství konkrétních složek barvy. Parametr L^* definuje světlost a v grafickém znázornění tvoří nebarevnou svislou osu, nabývá hodnot od 0 (černá) až po 100 (bílá), jedná se tedy o procentuální vyjádření množství odraženého světla. Vodorovné barevné osy zastupují tzv. původní barvy v párových protikladech. Osa zeleno-červená znázorňuje parametr a^* a osa modro-žlutá znázorňuje parametr b^* , oba parametry mají rozsah hodnot od -60 do +60 a vyjadřují zastoupení jednotlivých složek barvy. Přesné rozložení všech tří os znázorňuje obrázek 8. Středový sloupec kulového diagramu je barevně neutrální šedivá. Souřadnice L^* , a^* , b^* jednoznačně určují barvu v jejím odstínu, sytosti a jasnosti (Baar, 2010; Borůvka a Babiak, 2016). Pro potřebu porovnání dvou barev, resp. kvantifikace rozdílu, byla zavedena bezrozměrná tzv. barevná odchylka ΔE^* , která je v mezinárodním standardu ISO 7724-3:1984 (1984) definována jako:

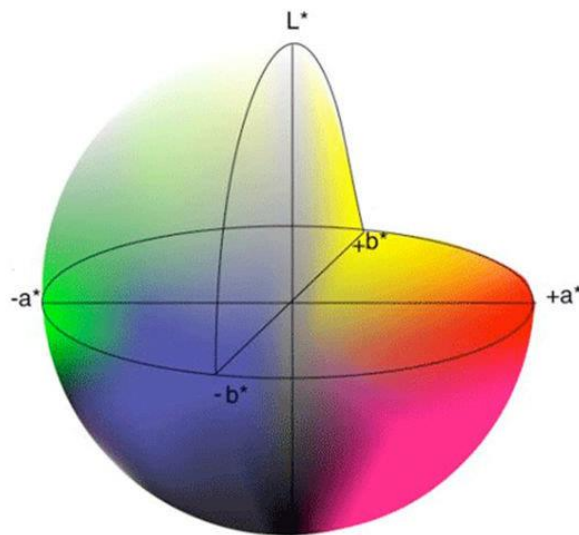
$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (2)$$

kde ΔL^* , Δa^* , Δb^* představují rozdíly mezi původními a konečnými souřadnicemi, které se dopočítají odečtením výchozích hodnot od hodnot po experimentu.

Významnost barevného posunu dělí Cividini et al. (2007) do těchto skupin:

- $\Delta E^* < 0,2$ – nevýznamný barevný posun
- $\Delta E^* < 2$ – malý barevný posun
- $\Delta E^* < 3$ – barevný posun postřehnutelný citlivým okem
- $\Delta E^* < 6$ – viditelný barevný posun
- $\Delta E^* < 12$ – výrazná změna odstínu
- $\Delta E^* > 12$ – odlišná barva

Barevná odchylka menší než 3 je považována za shodnou a neodlišitelnou barvu, z hlediska porovnání barevné změny se tedy uvažuje za nevýznamnou.



*Obrázek 8: Vizualizace barevného prostoru CIE L*a*b*
(Moghaddam 2013)*

3.4. Tvrdost

Tvrdostí materiálu rozumíme schopnost odporovat vnikání cizího tělesa do struktury materiálu. Jedná se o významnou technologickou vlastnost, např. při loupání, řezání, frézování, i konstrukční vlastnost, neboť udává odolnost vůči poškození a opotřebení při užívání, důležité např. pro pracovní desky, podlahoviny, schody (Gandelová et.al, 2009; Borůvka a Babiak, 2016).

Tvrdost dřeva úzce souvisí s hustotou, neboť samotná dřevní hmota má tvrdost stejnou u všech dřevin. Rozdílná tvrdost dřevin je tedy způsobena podílem dřevní hmoty a pórů. Podle hustoty dřeva je dokonce možné vypočítat tvrdost s odchylkou do 10 %

(Lysý a Jírů, 1961). U dřeva je potřeba počítat s rozdílnou tvrdostí nejen v jednotlivých směrech, ale také ve struktuře. Letní dřevo je zpravidla tvrdší než jarní, přičemž výraznější je tato rozdílnost u jehličnatých dřevin. Listnáče jsou méně heterogenní, avšak například suk či jiná anomálie výrazně zvýší lokální tvrdost (Čunderlík, 2010; Borůvka a Babiak, 2016).

Tvrdost dřeva se stanovuje samostatně pro jednotlivé anatomické směry. Na čelních plochách je tvrdost vyšší, u jehličnanů přibližně o 40 %, u listnáčů o 30 % a zároveň má tvrdost na čelních plochách menší rozptyl. U většiny dřevin však není rozdíl mezi tangenciální a radiální plochou, výjimkou jsou dřeviny s výraznými dřevnými paprsky, které na radiální ploše zvyšují tvrdost o 5 až 10 % (Lysý a Jírů, 1961; Borůvka a Babiak, 2016).

Gandelová et.al. (2009) i další autoři dělí dřeviny podle tvrdosti do těchto pěti skupin:

- měkké do 40 MPa (např. lípa, topol, smrk, borovice)
- středně tvrdé 41–80 MPa (např. modřín, dub, buk, bříza)
- tvrdé 81–100 MPa (např. akát, habr)
- velmi tvrdé 101–150 MPa (např. zimostřez)
- super tvrdé nad 150 MPa (např. eben a guajak)

Kromě hustoty a měřeného směru ovlivňuje tvrdost dřeva i vlhkost, teplota, pozice dřeva v kmenu, pozice měření, nebo testovací podmínky (např. rychlost zatížení, velikost síly, velikost tření mezi indentorem a povrchem dřeva). Zvýšení vlhkosti o 1 % snižuje tvrdost o 3 %. Testovací podmínky dělíme především na statické a dynamické. Standardně se využívají statické, v Evropě nejčastěji metoda Brinella, v Severní Americe je rozšířenější metoda podle Janky. Brinellova metoda využívá kouli daného průměru, zatěžovanou definovanou silou po stanovenou dobu a měří průměr otlaku. Metoda Janky rovněž využívá kulový indentor o přesném poloměru, ale protlačuje ho do dané hloubky a měří se potřebná síla (Heräjärvi, 2004; Šlezingerová a Gandelová, 2014). Schwab (1990) porovnával přesnost těchto dvou metod a došel k závěru, že Brinellova metoda je přesnější, neboť lépe pracuje s nepravidelnostmi dřeva.

3.5. Chemická modifikace dřeva

Chemickou modifikací rozumíme proces zlepšení vybraných vlastností dřeva a zvýšení odolnosti dřeva pomocí chemických látek vpravených do vnitřní struktury dřeva. Chemické modifikace můžeme obecně rozdělit na aktivní a pasivní. Aktivní modifikace působí změny v chemickém složení a vazbách dřevních buněk a působí pouze v buněčných stěnách. Charakteristickým rysem je tvorba nových chemických vazeb mezi aktivní chemikálií a reaktivními skupinami ve dřevě. Typickým příkladem aktivní modifikace je acetylace. Pasivní modifikace spočívá v naplnění buněčných stěn i lumenů externí látkou, která se zde zafixuje, může se vázat pevnými chemickými vazbami, ale podstatu dřevních elementů nemění, příkladem pasivní modifikace je napouštění dřeva silikony, oleji, fenolickými a aminovými pryskyřicemi (Hill, 2006; Reinprecht, 2016). Oproti aktivní modifikaci nemusí nutně aktivní látka difundovat do buněčných stěn, ale reaguje pouze na povrchu buněčné stěny (Sandberg, 2021).

Vymezení termínu „chemická modifikace dřeva“ se u jednotlivých autorů různí. Hill (2006) tímto termínem označuje pouze aktivní modifikaci a pasivní označuje jako „impregnační modifikace“. Oproti tomu Reinprecht (2016) zastává rozdělení na aktivní a pasivní modifikaci, ale označuje je jakožto modifikace buněčných stěn a modifikace lumenů buněk. V každém případě první fáze chemické modifikace je vždy stejná, je potřeba vpravit modifikační látku do objemu dřeva. Při malých rozměrech dřeva (např. dýhy) může být dostatečné máčení, nebo natírání. Nejčastěji se však pracuje s podtlakově-tlakovou impregnací, která dokáže nejúspěšněji a v nejkratším čase překonat odpor anatomických elementů dřeva vůči prostupu kapaliny (Reinprecht, 2016). U vyvrátého dřeva vodivé elementy přestávají plnit svou funkci a obzvláště u jádrových dřevin je proimpregnovatelnost velice špatná. Po vysušení dřeva dochází rovněž k uzavření ztenčenin, pomocí kterých se šíří kapalina v jehličnanech. U listnáčů brání prostupu kapalin zathylování cév vlivem stárnutí či poškození dřeva (Kollman, 1968). Norma ČSN EN 350 (2019) rozděluje dřeviny podle impregnovatelnosti vodními ochrannými prostředky do čtyř tříd:

1. lehce impregnovatelné (např. buk, habr, javor, olše, lípa, běl borovice)
2. středně impregnovatelné (např. bříza, běl kaštanu, jasanu, jedle a modřínu)
3. těžko impregnovatelné (např. běl teaku, tují, smrku, zralé dřevo jedle)
4. extrémně těžko impregnovatelné (např. zralé dřevo smrku, jádro akátu, borovice, buku, dubu, modřínu, teaku, tují).

Metody zlepšení propustnosti dřeva pro kapaliny jsou předmětem intenzivního výzkumu, tyto metody se zaměřují na zprůchodnění uzavřených ztenčenin a zathylovaných cév, např. pomocí hub, mikrovlnného záření či jiných chemických látek. (Reinprecht a Pánek, 2016).

Kromě chemické modifikace je dnes známo mnoho dalších způsobů, komerčně nejrozšířenější je termická modifikace (např. Termowood) a dále např. enzymatická modifikace, plazmatická modifikace, mikrovlnná modifikace, nebo mechanická modifikace (Hill, 2006).

3.5.1. Modifikace syntetickými pryskyřicemi

Modifikace pryskyřicemi spočívá v tom, že se dřevo napustí ochrannými látkami, které ve vysoké míře zůstanou trvale fixované ve struktuře dřeva, jedná se tedy o modifikaci pasivní neboli impregnační. V užším pojetí se modifikací pomocí pryskyřic rozumí ošetření dřeva roztokem monomeru, který je schopný difundovat do buněčné stěny, kde následně polymeruje. Ke zlepšení vlastností dochází primárně v důsledku napuštění buněčné stěny (Hill, 2006; Sandberg, 2021).

Hill (2006) definuje chemickou modifikaci pomocí impregnace jakožto proces, který spočívá v naplnění dřevěné struktury inertním materiálem, jinak též napouštědlem. Cílem tohoto procesu je dosažení změn konkrétních vlastností dřeva. Zároveň však autor vylučuje procesy, které zvyšují toxicitu výrobku v průběhu užívání a při likvidaci, nebo procesy, které samy o sobě uvolňují do okolí nezpracovatelné toxické látky.

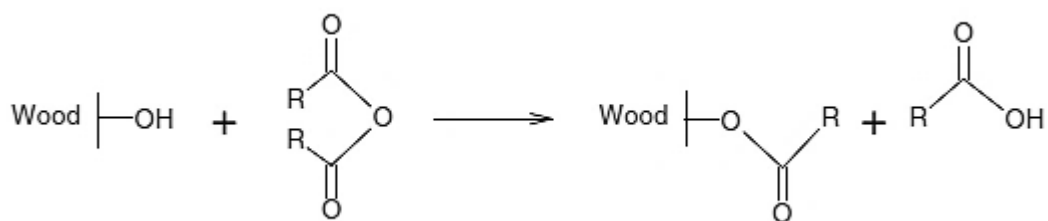
Jak tedy uvádí Hill (2006), ze skupiny látek pro modifikaci dřeva jsou vyňaty látky, které mají přímý biocidní účinek, pro tyto látky vymezuje autor samostatnou kategorii nazvanou „impregnační ochrana dřeva“. Modifikační látky mají ve dřevě primárně účinek snížení hygroskopicity dřeva, díky čemuž přeneseně dochází ke snížení rozměrových změn dřeva a zvýšení odolnosti vůči degradačním procesům. Stamm a Seborg (1939) stanovili tři předpoklady efektivní impregnační modifikace. Prvním je vhodná velikost molekul impregnační látky, která musí být schopna proniknout do buněčných stěn. Hill (2006) udává na základě výzkumů ve své knize průměr mikropórů buněčné stěny 2–4 nm, což znamená, že pro dobrý průnik jsou vhodné látky s molárním objemem do $100 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$. Druhým předpokladem je dostatečná polarita molekul impregnační látky a její rozpustnost v polárních rozpouštědlech. Třetím předpokladem je dostatečné uzamčení impregnační látky ve struktuře, aby nedošlo k jejímu vylouhování v pracovních

podmínkách. Obvykle se k impregnaci využívá monomer, případně oligomer, který ve struktuře polymerizuje (Stamm a Seborg, 1939; Hill, 2006; Sandberg, 2021).

3.5.2. Neformaldehydové modifikační látky

3.5.2.1. Acetanhydrid

Anhydrid kyseliny octové se využívá při tzv. acetylaci dřeva, což je proces aktivní modifikace. Při procesu acetylace dochází k reakci mezi acetanhydridem a volnými hydroxylovými skupinami za vzniku hydrofobních acetylových skupin (viz. obr. 9). Acetylace může probíhat v kapalně i plynné fázi. Plynný acetanhydrid při normálním tlaku se využívá pro úpravu dých do tloušťky 3 mm. Pro masivní dřevo se využívá acetanhydrid rozpuštěný v aromatickém uhlovodíku. Před modifikací musí být dřevo vysušeno. Dřevo se impregnuje tlakem přibližně 1 MPa při teplotě 100 až 130 °C, délka modifikace se pohybuje v řádu jednotek až nižších desítek hodin. Přesné modifikační podmínky jsou specifické pro každou dřevinu. Přebytečná látka se na konci impregnace ze dřeva odsává vakuem a je možné ji opakovaně použít. Vedlejším produktem modifikace je kyselina octová, kterou je možno ze dřeva extrahovat a použít pro výrobu dalšího acetanhydridu. Acetylace působí především na hemicelulózy a krystalické části celulózy, ale snížení hygroskopicity bylo zaznamenáno i u ostatních sacharidů, pektinů aj. (Liptáková a Sedliačik, 1989; Sandberg, 2021).



Obrázek 9: Mechanismus reakce acetandhydridu na hydroxylové skupiny za vzniku kyseliny octové (Reinprecht, 2016)

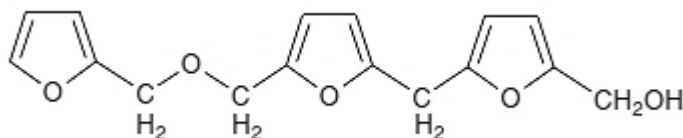
Ošetřené dřevo je v trvale chemicky nabobtnalém stavu a má velmi vysokou stabilitu i trvanlivost, odolnost byla prokázána vůči termitům, houbám i mořským živočichům, vyšší odolnost je i vůči UV záření (Sandberg, 2021). Acetylace mění hustotu dřeva pouze nepatrně, oproti termické modifikaci výrazně méně snižuje pevnostní vlastnosti dřeva. Mechanické vlastnosti jsou sníženy zejména z důvodu trvalého nabobtnání dřeva. Modifikované dřevo má světlejší, charakteristicky našedlou barvu. Hlavními nevýhodami je vyšší cena a korozivní účinky na ocel spojovacích prostředků i obráběcích nástrojů.

Dobrých výsledků dosahují téměř všechny dřeviny, výjimkami jsou dub červený, teak, smrk a douglaska (Liptáková a Sedláčik, 1989).

Acetylované dřevo se běžně obchoduje pod názvem Accoya a vyrábí ho norská společnost Accsys Technologies. Dominantní používanou dřevinou je borovice. Hmotnostní přírůstek dřeva po modifikaci je přibližně 20 %. Acetylované dřevo nalézá využití zejména ve stavebnictví na exteriérové obklady, konstrukce oken a dveří, méně často balkonové podlahy. Kromě masivního dřeva se zjišťují možnosti využití acetylce i na jiné celulosové materiály, např. MDF (Sandberg, 2021). Acetylované dřevo produkují i další výrobci (např. BP Chemicals), málokterý však na trhu uspěje, protože proces acetylce vyžaduje vysoké investice do zařízení a v porovnání s ostatními modifikačními metodami je acetylce nejdražší.

3.5.2.2. Furfuryl-alkohol

Furfuryl-alkohol je kapalná látka vyráběná z vedlejších produktů zemědělství, např. cukrová třtina, nebo kukuřičné klasy, jeho chemickou strukturu zachycuje obrázek 10. Výrobní proces i výsledné vlastnosti dřeva jsou v mnohém podobné pryskyřicím na bázi formaldehydu. V procesu furfurylace je předsušené dřevo impregnováno vodným roztokem pryskyřice, zpravidla podtlakově-tlakově-podtlakovou metodou (závěrečné vakuum je pro odsátí přebytečné pryskyřice, neboť tu je možno recyklovat). Impregnace probíhá tlakem přibližně 1,2 MPa po dobu dvou hodin. Poté je dřevo přesunuto do komory s teplotou přibližně 40 °C a kontrolovanou atmosférou pro zamezení výparu pryskyřice. Zde se nechá dřevo odležet pro difundování pryskyřice do buněčných stěn. Pryskyřice se pomalu vytvrzuje přítomností mírně kyselých katalyzátorů, využívají se kyselé soli, nebo organické kyseliny (např. maleinová, nebo citronová), při použití silných kyselin nastává bouřlivá nekontrolovatelná reakce. Posledním krokem modifikace je vysušení dřeva při teplotě 100–130 °C a recyklace použité látky. Pryskyřice i dřevo v procesu je toxické, veškeré výpary je tedy potřeba filtrovat a před koncem sušení je potřeba kompletně zreagovat veškerou pryskyřici. Výsledný produkt má nízkou toxicitu.



Obrázek 10: Strukturální vzorec furfuryl-alkoholové pryskyřice

(Reinprecht, 2016)

Podobně jako u acetylace se nejvíce používá borovice, dobrých výsledků dosahuje i javor, buk a bříza (Liptáková a Sedliačik, 1989; Sandberg, 2021).

Pryskyřice vykazuje dobrou penetraci buněčné stěny, ta je tímto nabobtnána a následně je v tomto stavu fixována. Zvýšené ukládání pryskyřice bylo pozorováno ve střední lamelle, kde se váže na lignin. (Sandberg, 2021). Účinky modifikace jsou přímo úměrné hmotnostnímu přírůstku dřeva, nejvýhodnější se ukazuje být přírůstek 40 % (Bastani et al., 2015), při kterém je bobtnání sníženo o 50–70 %. Modifikované dřevo má vyšší tvrdost, pevnost a elasticitu, ale výrazně nižší rázovou houževnatost (Larsson-Breid, 2013). Zvýšena je rovněž odolnost vůči biotickým činitelům. Pryskyřice je ve dřevě odolná vůči hydrolýze a dřevo má výbornou chemickou odolnost. Produkty modifikace mají typicky nahnědlou barvu, která však relativně snadno podléhá fotodegradaci (Sandberg, 2021). Dřevo může být lakované i mořené, doporučují se olejové a vodní akrylové nátěry, alkydové a akrylové vykazují mírně sníženou adhezi (van der Zee et al., 2007). Z důvodu výrazných barevných změn se doporučuje zamezit kontaktu furfurylovaného dřeva s mědí a zinkem, vhodné jsou nerezové spojovací prostředky (Jermer et al., 2017).

První komerční produkt furfurylace byl představen v roce 2009 a nese název Kebony, výrobcem je norská společnost stejného jména. Firma dodává dva typy furfurylovaného dřeva – Kebony Character a Kebony Clear. První jmenované je modifikované pouze lehce, má mírné zbarvení a je vhodné na exteriérový nábytek, okna, obklady stěn a zastřešení. Kebony Clear je vysoce furfurylované dřevo, které má velmi tmavou barvu a vysokou tvrdost, díky tomu je využíváno na podlahy. Obecně je furfurylované dřevo doporučováno i pro mořské aplikace jako například paluby lodí, nebo mola. Dalším výrobcem je např. nizozemská společnost Foreco Dalfsen, která své výrobky prezentuje pod názvem Nobelwood (Sandberg, 2021).

3.5.2.3. Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou různé sloučeniny obsahující v molekule alespoň jednu epoxidovou skupinu (cyklický ether se třemi atomy v kruhu). Epoxidové skupiny jsou vysoce reaktivní. Pro odlišné aplikace lze připravit pryskyřice s molekulovou hmotností přibližně od 340 až do 3800. Pro účely modifikace dřeva se využívají např. ethylenoxid, propylenoxid a butylenoxid. Vytvrzovací reakce je katalyzována za mírně zásaditých podmínek např. trimethylaminem. Vytvrzené produkty mají vysokou pevnost, tvrdost,

chemickou odolnost, jsou bezbarvé a elektricky nevodivé (Liptáková a Sedliačik, 1989; Rahman, 2018).

Ve dřevě reaguje epoxidová pryskyřice s hydroxylovými skupinami za vzniku etherové vazby s volným radikálem, na který se může navázat další molekula epoxidu za vzniku oligomerní sítě (viz. obr. 11). Ve dřevě je tak epoxid velmi silně fixován a vykazuje podobné účinky jako furfuryl-alkohol. Problém s epoxidy je, že snadno reagují sami se sebou, což následně znemožňuje penetraci buněčné stěny (Liptáková a Sedliačik, 1989; Hill, 2006). Hill (2006) ve srovnání několika studií poukazuje na to, že nárůst hmotnosti dřeva po impregnaci nesmí přesáhnout 30 %, protože pak dochází k poškození buněčných stěn, což má za následek zhoršení vlastností, např. zvýšení bobtnání. Při nárůstu hmotnosti o 20 % bylo zaznamenáno snížení bobtnání o 65 %.



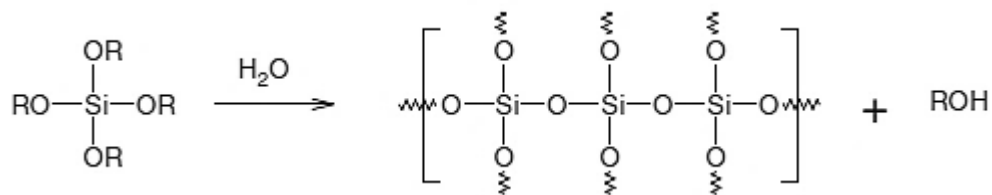
Obrázek 11: Mechanismus reakce epoxidové pryskyřice s hydroxylovými skupinami dřeva (Reinprecht, 2016)

Nejvíce se epoxidy pro vysokou adhezi využívají k výrobě lepidel a nátěrových hmot, které bývají většinou dvousložkové. Dobré vlastnosti nabízí nátěrové látky kombinující epoxidové a fenolické, nebo aminové pryskyřice. Rovněž je možné využít epoxidy pro modifikaci impregnačních olejů a v neposlední řadě se epoxidové pryskyřice využívají k odlévání (Liptáková a Sedliačik, 1989; Sandberg, 2021).

3.5.2.4. Silikony

Jako silikony se označují všechny organokřemičité sloučeniny, silikonové pryskyřice se však vyznačují tím, že v makromolekule mají méně než dva organické radikály na každý atom křemíku. Většinou jsou složeny ze směsi metylfenylpolysiloxanů ve formě 50 až 75 % roztoků v organických rozpouštědlech. Různou kombinací výchozích monomerů lze docílit odlišných vlastností. Pro modifikaci dřeva se úspěšně využívají např. chlorsilany, alkokysilany (viz. obr. 12), křemičitan sodný (vodní sklo), organosilany. Ve výchozím stavu je většina silikonů gelové konzistence a využití pro modifikaci dřeva tak není možné. Pokud se však rozpustí ve vodě či alkoholech, dobře penetrují buněčnou stěnu, kde se navazují na hydroxylové skupiny za vzniku kyseliny křemičité. Ta se vlivem tepla rozkládá na síťovaný silikagel vázaný na buněčnou stěnu

vazbou Si–O–C. Postup reakce, vedlejší produkty i výsledné produkty se liší v závislosti na použité modifikační látce (Liptáková a Sedliačik, 1989; Hill, 2006).



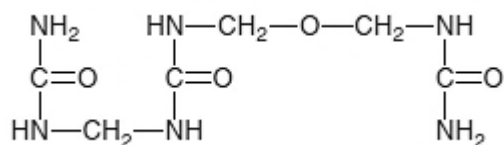
Obrázek 12: Mechanismus reakce alkoxyilanu za vzniku alkoholu (Reinprecht, 2016)

Všechny silikonové pryskyřice vytvrzují teplem a výsledné produkty vynikají výbornou tepelnou odolností, mají výborné elektroizolační vlastnosti, jsou chemicky netečné a netoxické. Bylo pozorováno snížení bobtnání o 40 % při pouze 10% nárůstu hmotnosti. Povrch upraveného dřeva má hydrofobní charakter, sníženou adhezi a koeficient tření, rovněž je nepřilnavý pro většinu jiných polymerů. Modifikované dřevo má rovněž vyšší odolnost vůči biotickým činitelům (zejména termitům) a dobrou protipožární ochranu (Liptáková a Sedliačik, 1989; Hill, 2006).

3.5.3. Formaldehydové modifikační látky

3.5.3.1. Močovino-formaldehydové pryskyřice

Pryskyřice vzniklé kondenzací formaldehydu s močovinou, melaminem a jejich deriváty souhrnně označujeme jako aminové pryskyřice. Močovino-formaldehydové pryskyřice vznikají polykondenzací močoviny s formaldehydem. Pryskyřice obsahuje kromě produktů kondenzace i volný formaldehyd, vodu a metylalkohol, je rozpustná v alkoholech a částečně i ve vodě, její chemickou strukturu znázorňuje obrázek 13. Nevytvrzená pryskyřice je velmi reaktivní a časem stárne. Vytvrzuje se působením tepla a v kyselém prostředí přechází na trojrozměrné polykondenzáty. Produkty pryskyřice jsou levné, ale mají nízkou odolnost vůči vodě a rovněž pevnostní vlastnosti jsou slabší. V praxi se často močovino-formaldehydová pryskyřice nahrazuje pryskyřicemi na bázi fenolu či melaminu, nebo se k těmto přimíchává pro vytvoření levnějšího produktu

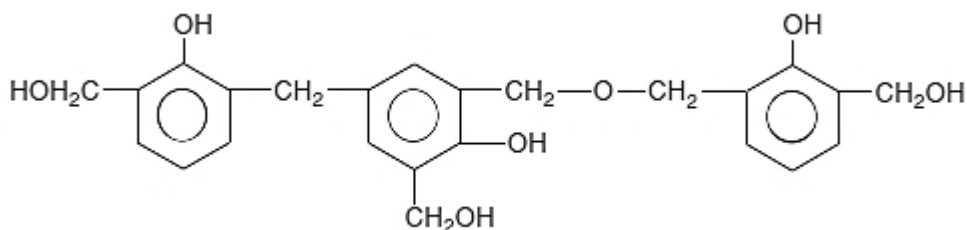


Obrázek 13: Strukturální vzorec močovino-formaldehydové pryskyřice (Reinprecht, 2016)

s uspokojivými vlastnostmi, přidání močoviny do jiných formaldehydových pryskyřice navíc snižuje emise volného formaldehydu. Nejčastěji se používá jako levné pojivo do aglomerovaných materiálů (Liptáková a Sedliačik, 1989; Sandberg, 2021).

3.5.3.2. Fenol-formaldehydové pryskyřice

Fenol-formaldehydová (fenolická) pryskyřice vzniká polykondenzací derivátů fenolu a formaldehydu. Nejstarší dvě formy se nazývají rezoly a novolaky, které se liší reakčními podmínkami polykondenzace. Rezoly vznikají v alkalickém prostředí při nadbytku formaldehydu, novolaky vznikají v kyselém prostředí s nadbytkem fenolu. Pro dřevařství mají větší význam rezoly, které jsou charakteristické obsahem reaktivních metylolových skupin ($-\text{CH}_2\text{OH}$), které se dobře váží na lignin (viz. obr. 14). Vytvrzování je možné teplem, kyselinami, nebo reakcí s jinými látkami. Výsledný produkt má tmavě hnědou barvu, z formaldehydových pryskyřic nejvyšší odolnost vůči vodě a dobré pevnostní vlastnosti. Využití mají rezoly ve výrobě nátěrových hmot, lepidel a lisovacích hmot (Liptáková a Sedliačik, 1989).



Obrázek 14: Strukturální vzorec fenol-formaldehydové pryskyřice (Reinprecht, 2016)

Příkladem využití fenol-formaldehydové pryskyřice je materiál CompregTM. Tento produkt vznikl v polovině 20. století a zejména v průběhu druhé světové války se dočkal velkého uplatnění, např. pro výrobu vrtulí a křídel letadel. V padesátých letech jeho využití upadlo díky rozšíření materiálů vyztužených umělými vlákny (Stamm et al., 1946).

Výchozím materiálem jsou typicky bukové dýhy, protože masivní dřevo má tendence předčasně vytvrzovat v průběhu sušení a zároveň je obtížné jej impregnovat, buk se volí z důvodu dobré impregnovatelnosti. Dýhy se napouštějí v tlakové komoře při tlaku 0,1 až 1,4 MPa po dobu 10 minut až 6 hodin. Příjem pryskyřice by měl dosáhnout cca 30 % suché hmotnosti dřeva (Stamm, 1964). Následuje vyrovnání vlhkosti dých jeden až dva dny. Nízkomolekulární fenolová pryskyřice způsobí změkčení buněčných stěn a snížení Youngova modulu pružnosti. Po ekvilibraci je soubor dých plošně lisován tlakem 8 MPa

při teplotě 125 až 150 °C (Kollmann et al., 1975). Během vytvrzování je potřeba kontrolovat teplotu materiálu, protože vytvrzování je exotermický proces a u silného produktu může dojít k přehřátí. Poslední fází je klimatizování produktu na vhodnou vlhkost (Stamm, 1964; Sandberg, 2021).

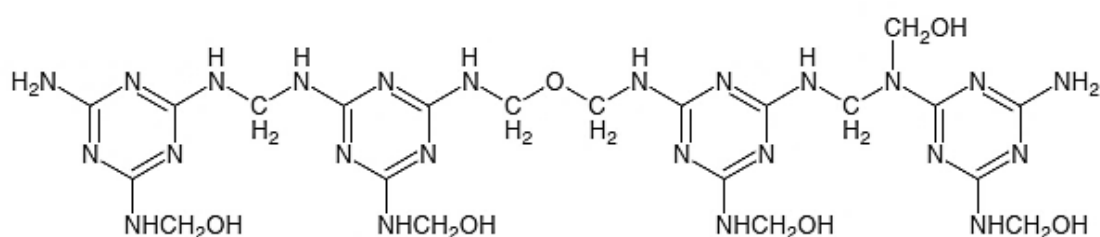
V procesu vytvrzování pod tlakem dochází ke zhroucení buněčné stěny a vyplnění všech prostor pryskyřicí. Pryskyřice je ve dřevě vázána jednak kovalentními vazbami na lignin a zároveň je uzamčena propletením polymerizované pryskyřičné sítě s polymerními složkami buněčné stěny (Wellons, 1977; Yelle a Ralph, 2016). Díky tomu je vysoce odolná vůči hydrolyze, a tedy vylouhování ze dřeva. Produktem této metody je dřevo o vysoké hustotě (cca 1300 kg.m⁻³), které vyniká extrémní rozměrovou stabilitou, tvrdostí a vysokou odolností vůči rozkladu. V porovnání s ostatními metodami modifikace je Compreg jednoznačně nejlepší. Modul pružnosti produktů Compreg dosahuje až 17 GPa a mez pevnosti v ohybu až 200 MPa při hustotě 1 200–1 300 kg.m⁻³. Tvrdost dosahuje hodnot kolem 230 MPa a rázová houževnatost 20–50 KJ.m⁻² při hustotě 1 350–1 400 kg.m⁻³ (Sandberg, 2021). Povrch materiálu CompregTM je hydrofobní, takže má sníženou adhezi většiny nátěrových látek a lepidel, zároveň je povrch samo lubrikační a díky tomu má vysokou odolnost vůči tření. Materiál má nízkou tepelnou a elektrickou vodivost a vynikající biodegradační odolnost. Materiál je elektroizolační, termoizolační a zachovává si pevnost i v extrémně nízkých teplotách. Nevýhodami je vysoká cena, omezení na menší tloušťky materiálu a výrazné zabarvení dřeva (Adamopoulos et al., 2012; Sandberg, 2021).

Na trhu můžeme materiál Compreg najít např. pod názvy Panzerholz od německého výrobce Delignit Aktiengesellschaft, dále Dehonit (Deutsche Holzveredelung), Lignostone (Röchling SE & Co. KG) a mnoho dalších, výrobce najdeme po celém světě. Ze dřeva Compreg se vyrábějí elektrikařské skříně, díly transformátorů, reproduktorové skříně, neprůstřelné materiály, letecké vrtule, sportovní náčiní, podpěry nádrží na kapalný zemní plyn apod. (Stamm a Seborg, 1939; Stamm et al., 1964; Hill, 2006; Sandberg, 2021).

3.5.3.3. Melamin-formaldehydové pryskyřice

Polymery melaminu (1,3,5-triamino-2,4,6-triazin) a formaldehydu tvoří velmi důležitou třídu aminopryskyřic, které se komerčně využívají již více než 60 let. Melamin-formaldehyd sám o sobě je jedním z nejtvrdších a nejtužších izotropních polymerních

materiálů. Kromě vysoké pevnosti a tuhosti je rovněž nehořlavý (Reinprecht, 2016; Rahman, 2018). Melamin-formaldehydová pryskyřice vzniká polykondenzací melaminu s formaldehydem. Chemickou strukturu melamin-formaldehydové pryskyřice znázorňuje obrázek 15. Prvním stupněm polykondenzace v neutrálním prostředí jsou metyloilmelaminy, které vznikají adicí formaldehydu na melamin. Tyto látky jsou dobře rozpustné ve vodě a jsou velmi reaktivní, snadno podléhají další kondenzaci, nebo jiným reakcím (např. éterifikaci). Další kondenzace může probíhat velmi pomalu při pokojové teplotě, zvýšená teplota a kyselé prostředí reakci významně urychlují. Postupem reakce se produkty stávají méně rozpustné. Vytvrzená pryskyřice je bezbarvá, mimořádně tvrdá, odolná vůči vodě, alkáliím a vysoké teplotě. (Liptáková a Sedliačik, 1989).



Obrázek 15: Strukturální vzorec melamin-formaldehydové pryskyřice (Reinprecht, 2016)

Vytvrzování pryskyřice ve dřevě probíhá působením tepla a kyselých katalyzátorů. Zvýšená teplota nejprve odstraňuje rozpouštědlo (vodu), ve kterém je pryskyřice dopravena do dřeva. Následně dojde k zahájení samokondenzační reakce přes methylenové můstky nebo etherové vazby a vznikají vysoce zesíťované makromolekuly, které jsou nerozpustné ve vodě a jsou nevratně fixovány ve dřevě. Pro průnik pryskyřice do buněčné stěny je zapotřebí její nabobtnání, ale pryskyřice samotná není schopna nabobtnat buněčnou stěnu, proto musí být ve dřevě přítomna voda. Vodný roztok melamin-formaldehydové pryskyřice je schopen proniknout do amorfních částí celulózy a hemicelulóz v buněčných stěnách, kde vyplní volné mikroprostory a udržuje dřevo v permanentně nabobtnalém stavu. Zároveň je možné vytvoření kovalentních vazeb s volnými hydroxylovými skupinami celulózy, což snižuje sorpci vody (Rapp et al., 1999; Gindl et al., 2002; Altgen et al., 2020). Močovino-formaldehydová pryskyřice má podobný průběh reakce, avšak její produkty mají výrazně nižší vlastnosti mechanické, termické i chemické, jejich výhodou je však nižší cena, oproti melaminové pryskyřici přibližně třetinová (Liptáková a Sedliačik, 1989; Reinprecht, 2016).

Příkladem využití melamin-formaldehydové pryskyřice je metoda Impreg. Tato metoda vznikla podobně jako Compreg v polovině 20. století. V procesu Impreg je dřevo

napuštěno pryskyřicí, pozvolna vysušeno a poté vytvrzeno vysokou teplotou. Melaminová pryskyřice se ve dřevu pohybuje velice pomalu, obzvláště při vyšších koncentracích, takže s impregnací velkorozměrového řeziva se setkáváme pouze zřídka. Standardní využití melaminové pryskyřice je pro výrobu laminátů, typicky se impregnují papíry nebo dýhy, které se před vytvrzením skládají do vrstvených souborů (Hagstrand, 1999; Sandberg, 2021).

Dýhy a masivní dřevo se ošetřují rozdílně. Dýhy se zpracovávají ve vlhkém stavu a máčí se ve vodném roztoku pryskyřice o vysoké koncentraci. Masivní dřevo se zpracovává vysušené, je impregnováno pryskyřicí s nižší koncentrací ve vakuově-tlakovém zařízení. Konečný obsah pryskyřice je 25 až 35 % hmotnosti suchého dřeva. Po impregnaci se nechá dřevo dozrát jeden až dva dny v podmínkách bez vysychání pro rovnoměrné rozložení roztoku v celém objemu a pro umožnění difuze pryskyřice do buněčných stěn. Následně se výrobky pozvolna suší při mírné teplotě, a nakonec se pryskyřice vytvrzuje při teplotě 60-150 °C po dobu několika hodin (Sandberg, 2021).

Pryskyřice je ve dřevě vázána prostřednictvím polymerizované trojrozměrné sítě uvnitř buněčné stěny, která poskytuje mechanickou fixaci, kovalentní vazby mají minimální zastoupení. Melaminová pryskyřice vyžaduje snížení molekulární hmotnosti, čehož lze docílit vyšším obsahem volného formaldehydu, od čehož se ze zdravotních důvodů upouští. Dnes se na trhu vyskytují pryskyřice se sníženým obsahem formaldehydu (Lukowsky, 1999; Sandberg, 2021). Melaminová pryskyřice, podobně jako ostatní polární monomery, je schopna proniknout buněčnou stěnou a tím snížit rozsah rozměrových změn působených vodou. Ošetřené dřevo je i v suchém stavu více či méně nabobtnalé (Rahman, 2018).

Bylo zjištěno, že při ideálních podmínkách impregnace s dostatkem času pro difúzi pryskyřice, zůstává v mezibuněčných prostorech méně než 2 % přijaté pryskyřice (Rahman, 2018). V důsledku průniku melaminové pryskyřice do buněčné stěny se snižuje adsorbční schopnost dřeva a tomu odpovídá zvýšení rozměrové stability. Zároveň dřevo vykazuje vyšší odolnost vůči dřevokazným houbám (Lukowsky, 1999; Rapp et al., 1999; Kielmann et al., 2016), zejména vůči houbám způsobujícím hnědou a měkkou hnilobu (Reinprecht, 2016). Významně se snižuje hořlavost dřeva, zejména díky obsahu dusíku v pryskyřici, který se po vystavení teplu uvolňuje v plynné formě a zhasí plamen. V průběhu hoření rovněž melamin vytváří na povrchu dřeva vrstvu zuhelnatělého materiálu, čímž snižuje přístup tepla a rychlost hoření (Pittman et al., 1994; Hagstrand, 1999).

Z mechanických vlastností bylo potvrzeno zejména výrazné zlepšení pevnosti a tvrdosti, pevnost smrku v tlaku se v tangenciálním směru zvýšila o 83 %, v radiálním směru o 290 % (Inoue et al., 1993; Rapp, 1999; Gindl et al., 2003). Zároveň však byla zjištěna nižší rázová houževnatost a lom dřeva vykazuje výraznou křehkost (Pitmann et al., 1994; Epmeier et al., 2004). Všechny tyto změny jsou připisovány vytvrzené síti pryskyřice uvnitř dřevěné matice a nikoli vyplnění mezibuněčných prostor a lumenů. Melaminová pryskyřice také zvyšuje stabilitu dřeva vůči UV záření a vylouhování vodou (Lin et al., 2019), ošetřené dřevo vykazuje nižší barvené změny vyvolané povětrnostními vlivy (Inoue et al., 1993; Pitmann et al., 1994; Rapp a Peek, 1999). V dlouhodobé exteriérové expozici rovněž bylo pozorováno snížení tvorby trhlin (Hansmann et al., 2016).

Výrobky ImpregTM z laminovaných dřív lze před vytvrzením dobře ohýbat, vytvrzená pryskyřice následně výborně fixuje zvolený tvar. Papír impregnovaný pryskyřicí se využívá jako povrchová vrstva aglomerovaných deskových materiálů, např. dřevotřísky a dřevovláknité desky. Estetické a konstrukční možnosti dřeva zvyšuje možnost přidání pigmentů a barviv do pryskyřice. Díky tomu se uplatňuje např. pro výrobu střepek nožů, výrobu soch, stolů apod. Další možnosti využití jsou šablony pro odlévání plastických hmot, skříně transformátorů, rozvodové skříně a podlahy (Sandberg, 2021). Melaminové pryskyřice nejsou průmyslově více využívané z důvodu vysoké ceny, jako levnější alternativa se používají například methylnmethakrylát (PMMA), styreny, nebo fenolové pryskyřice, často se také míchají s močovinou, močovino-melamin-formaldehydová pryskyřice nabízí výrazně nižší cenu produktu při dostatečném zachování užitečných vlastností (Stamm, 1964; Schneider, 1994).

4. METODIKA

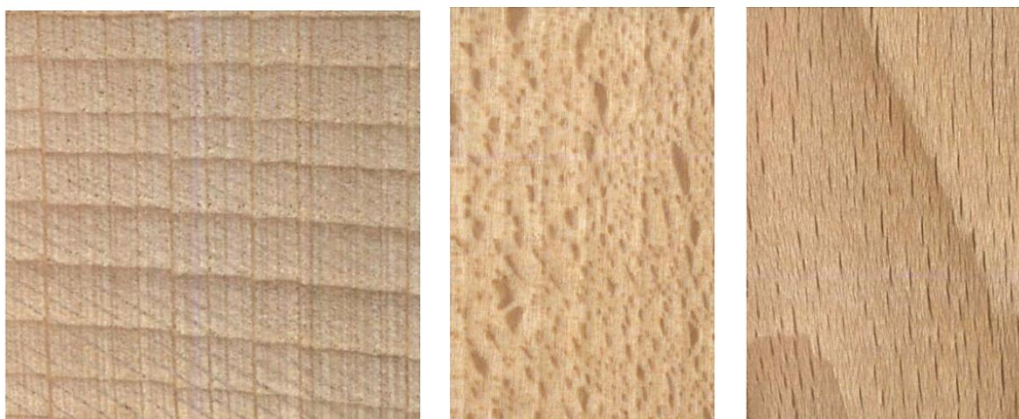
4.1. Testované dřeviny

4.1.1. Buk lesní

Buk lesní (*Fagus sylvatica* L.) je v české přírodě nejrozšířenější listnatá dřevina, v roce 2022 zastávala v druhové skladbě 9,6 % (Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky, 2022). Jedná se o listnatý opadavý strom, dorůstající do výšky 35 až 45 m. Buk je široce rozšířený díky netečnosti ke geologickému podkladu, dokáže přežít téměř na všech typech půdy, zároveň nemá vysoké požadavky na vlhkost půdy. Dobře snáší i silný zástin, díky čemuž dokáže růst i ve spodních patrech lesního podrostu. Nejlépe prosperuje ve vápenatých půdách a v mírném klimatu, je však náchylný na pozdní mrazy. Vyskytuje se v nadmořských výškách do 800 m. n. m. a dožívá se věku do 400 let. Kmen buku bývá na poměry listnáčů velmi rovný a dosahuje průměrů do 1,5 m. Strom má i ve stáří hladkou kůru, málokdy rozpraskanou. Koruna stromu má kulový tvar a bývá nasazená vysoko, bývá hojně rozvětvená a tvar je ovlivněn prostředím (Dubovský et al., 2001; Úradníček et al., 2001).

Buk řadíme mezi roztroušeně pórovité dřeviny, přičemž cévy nejsou pouhým okem viditelné. Dřevo buku nemá znatelné jádro, ale charakteristická je přítomnost vyvrážděného dřeva. U starších stromů se však může vyskytnout nepravé jádro. Navzdory malým cévám jsou letokruhy velmi dobře patrné a celkově je kresba buku spíše výrazná. Barva dřeva je pleťově růžová a charakteristické pro buk jsou výrazné dřeňové paprsky viditelné na všech řezech. V místech přechodu dřeňových paprsků přes letokruhy často dochází ke zvlnění letokruhu. Na obrázku 16 je ukázka vzhledu jednotlivých řezů bukového dřeva. Dřevo řadíme mezi tvrdé a středně těžké. Navzdory vysoké hustotě je bukové dřevo málo trvanlivé a dobře impregnovatelné (Musil a Möllerová, 2005; Zeidler a Borůvka, 2016).

Buk má široké využití, jedná se o nejvíce hospodářsky upotřebitelnou listnatou dřevinu. Díky dobré schopnosti plastifikace je primární surovinou pro ohýbání dřeva a výrobu dýh a překližek. Výrazný podíl má v prodeji palivového dříví, protože je dobře štípatelný a má vysokou výhřevnost. Dobré upotřebení nalézá buk rovněž pro výrobu železničních pražců, nábytku, tyčoviny, vybavení interiéru, nerezonanční části hudebních nástrojů ad. V chemickém průmyslu se můžeme setkat s bukem ve výrobě buničiny či furfuralu (Lysý a Jirů, 1961; Šlezingerová a Gandelová, 2014; Zeidler a Borůvka 2016).



Obrázek 16: Vzhled bukového dřeva na jednotlivých řezech (Novák, 2020)

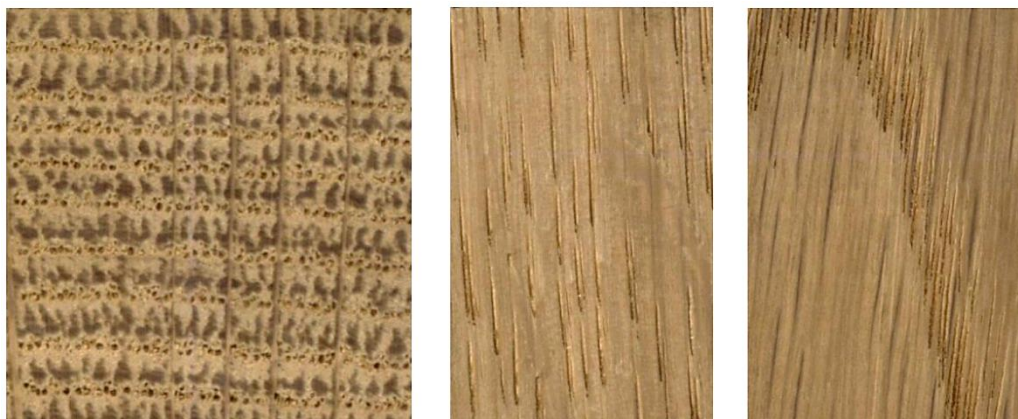
(zleva) příčný, radiální, tangenciální

4.1.2. Dub letní

Dub letní (*Quercus robur* L.) je listnatý opadavý strom, dorůstající do výšky 40 metrů. Z listnatých dřevin má druhé nejvyšší zastoupení v druhové skladbě 7,8 % (Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky, 2022). Dub je světlomilná dřevina, vyžaduje přímý přístup světla a nenajdeme ho tak v lesních systémech spolu s vyššími stromy. Spolu s vysokými nároky na světlo je dub i náročný na dostatečnou vláhu v půdě a na kvalitu půdy, vyžaduje hlinitou, hlubokou a bohatou půdu. Není náchylný na výkyvy klimatu, ale špatně snáší podzimní mrazy. Duby se vyskytují především v nižších polohách, v blízkosti vodních toků. Jedná se o dlouhověký strom, ve správných podmínkách se běžně dožívá více než 500 let. Strom má mohutný kmen, zpravidla bývá výrazně zprohýbaný a průměr snadno přesáhne 1,5 m. Větve jsou rovněž mohutné a mnohočetně zprohýbané, koruna je rozložitá a poměrně nízká (Dubovský et al., 2001; Úradníček et al., 2001; Musil a Möllerová, 2005).

Dub řadíme mezi kruhovitě pórovité dřeviny. Cévy jsou dobře patrné na všech řezech, seskupují se do světlých zvlněných paprsků v radiálním směru, tzv. plamenců. Dub má velmi výraznou kresbu. Vyskytuje se zde jádro, které je dobře odlišitelné od bělí, běl je poměrně úzká. Mohutné dřevné paprsky jsou dobře viditelné na všech řezech a hranice letokruhů jsou dobře patrné. Barva dřeva přechází od světle hnědé v bělí až ke žlutohnědé a tmavě hnědé v jádru. Na obrázku 17 je ukázka vzhledu jednotlivých řezů dubového dřeva. Při dlouhodobém uložení ve vodě dřevo tmavne až na zcela černou barvu, což je označováno jako tzv. bahenní dub. Díky vysokému obsahu tříslovin je dřevo velmi trvanlivé a vydává charakteristický zápach. Dřeň dubu má hvězdicovitý tvar.

Podobně jako buk hodnotíme dřevo jako tvrdé a středně těžké, v čerstvém stavu je dobře štípatelné (Musil a Möllerová, 2005; Zeidler a Borůvka, 2016).



Obrázek 17: Vzhled dubového dřeva na jednotlivých řezech (Novák, 2020)

(zleva) příčný, radiální, tangenciální

Dub je využíván především díky svojí výrazné textuře na výrobu okrasných dých a nábytku. Nemalé zastoupení má v pilařském zpracování a díky přirozené vysoké odolnosti vůči biotickým i abiotickým činitelům velmi dobře slouží pro exteriérové aplikace, např. stavba mostních konstrukcí, výroba lodí, oken, dveří, prahů a schodišť. Unikátní postavení má dub ve výrobě sudů (Lysý a Jírů, 1961; Šlezingerová a Gandelová, 2014; Zeidler a Borůvka 2016).

4.1.3. Bříza bělokorá

Bříza bělokorá (*Betula pendula*) je jedním z nejcharakterističtějších stromů české přírody, přestože v porostní půdě zastává pouze 2,9 % (Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky, 2022). Již na první pohled se odlišuje od ostatních dřevin bílou barvou kůry. Jedná se o listnatý opadavý strom běžně dorůstající do výšky 30 m. Bříza má vysoké požadavky na světlo, oproti tomu její nároky na vlhkost půdy jsou nízké. Je charakteristická rychlým osídlením holých ploch, řadíme ji tak mezi tzv. pionýrské dřeviny a často ji můžeme v přírodě spatřit jako solitérní stromy. Bříza je netečná na klimatické výkyvy a dobře snáší široké spektrum půd, včetně kyselých, skalnatých či písčitých. Řadíme ji do krátkověkých dřevin, běžně se dožívá pouze 100 až 150 let (Dubovský et al., 2001; Úradníček et al., 2001).

Kmen stromu je v mládí rovný, s přibývajícím věkem se kroučí. Průměr kmene bývá kolem 75 cm a jeden strom často vytváří více kmenů. Koruna stromu bývá řídká a větve dělíme na silnější stoupavé a jemné převislé. Jak bylo již řečeno, kůra je bílá a v mládí

hladká. S přibývajícím věkem však získává šedou barvu a ve spodní části se objevuje silná, rozpukaná, černá borka (Musil a Möllerová, 2005; Němec et al., 2005).

Břízu řadíme mezi roztroušeně pórovité dřeviny, velikost cév na příčném řezu se pohybuje na hranici viditelnosti, jejich vzhled se ve starší literatuře přirovnával k „moučnému prachu“. Dřevo břízy nemá viditelné jádro, a to ani krátce po pokácení, může se však vyskytovat nepravé jádro. Dřeňové paprsky jsou viditelné pouze na radiálním řezu a charakteristický je vysoký výskyt dřeňových skvrn, patrných na všech řezech. Letokruhy i celková kresba dřeva je málo výrazná. Barva dřeva je bělavá, může se však vyskytovat žlutavý, nebo načervenalý nádech. Na obrázku 18 je ukázka vzhledu jednotlivých řezů březového dřeva. Dřevo hodnotíme jako středně těžké i středně tvrdé a málo trvanlivé. Z mechanických vlastností dřevo vykazuje vysokou houževnatost, pružnost, pevnost a nízkou štípatelnost (Lysý a Jirů, 1961; Šlezingerová a Gandelová, 2014; Zeidler a Borůvka 2016).



Obrázek 18: Vzhled březového dřeva na jednotlivých řezech (Novák, 2020)

(zleva) příčný, radiální, tangenciální

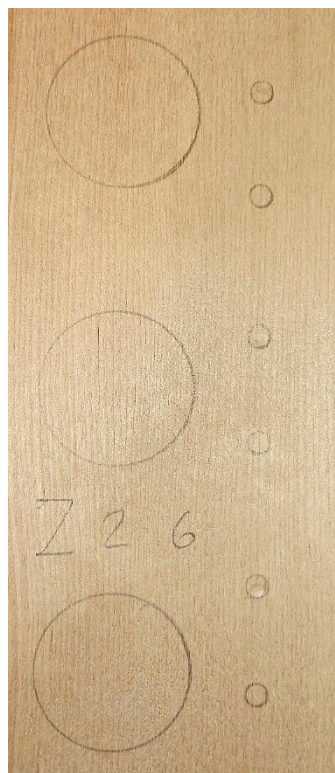
Využití nachází březové dřevo především ve výrobě dýh a překližek. Dřevo se dobře opracovává a má zastoupení při soustružení či řezbářství. Obzvláště ceněné jsou výřezy s očkovou nebo vlnitou strukturou. Bříza se může vyskytnout v chemickém průmyslu při výrobě buničiny a výtažky z břízy se používají v kosmetickém a farmaceutickém průmyslu (Úradníček et al., 2001; Patříčný, 2005; Němec et al., 2005).

4.2. Příprava testovacích těles

Experiment započal přípravou testovacích těles. Z oddenkové části stromů byly vyřezány fošny, které byly předsušeny na vzduchu. Po poklesu vlhkosti byla každá fošna

rozmítnuta na dvě shodně tlustá prkna. Prkna byla následně čtyřstranně ohoblována na konečné rozměry a rozřezána na jednotlivá tělesa.

Testování probíhalo na dvou sadách těles. Sada 1 byla deskového charakteru o rozměrech $200 \times 90 \times 20$ mm se směrem vláken po nejdelší straně. Na těchto tělesech probíhalo měření barvy a tvrdosti (viz. obr. 19). Do sady 2 byla připravena menší tělesa o rozměrech $30 \times 20 \times 20$ mm (viz. obr. 20). Tato tělesa byla použita pro měření fyzikálních charakteristik. Pro výrobu těchto těles byla použita dedikovaná tělesa ze sady 1. Pro měření bylo použito 30 velkých a 20 malých těles pro každou dřevinu a použitou koncentraci pryskyřice + 20 malých těles referenčních od každé dřeviny. V sadě 1 bylo celkem použito 180 velkých těles, v sadě 2 bylo 180 malých těles. Při výrobě byl kladen důraz na odstranění vad dřeva, zejména suků. Před zahájením samotného měření byla tělesa klimatizována při teplotě 20 °C a 65% vzdušné vlhkosti až do ustálení hmotnosti.



Obrázek 19: Ukázka značení a pozic měření na tělesu břízy

4.3. Vlhkostní charakteristiky

Vzhledem k vysokému významu vlhkosti při obchodování i zpracování dřeva existuje mnoho metod pro její měření. Tyto metody se liší zejména rychlostí a přesností. Základní dělení je na metody přímé a nepřímé. Přímé metody různými postupy měří

samotný obsah vody ve dřevě. Nejrozšířenější je gravimetrická metoda, která vyžaduje odebrání reprezentativního vzorku, jeho přesné zvážení, vysušení na absolutní nulu a opětovné zvážení. Touto metodou bylo postupováno i v této práci. Přesný postup udává norma ČSN 49 0126 (1989) a ČSN 49 0103 (1979), podle kterých byl experiment veden.

Působení vody bylo zjišťováno na vzorcích o rozměrech 20 × 20 × 30 mm. Veškerá měření probíhala až po impregnaci, pro každou dřevinu bylo připraveno 20 těles pro každou testovanou koncentraci pryskyřice a 20 referenčních bez impregnace (viz. obr. 20). Měření hmotnosti probíhalo na digitálních laboratorních vahách PCB 350-3 s přesností 0,001 g od německého výrobce KERN & SOHN GmbH. Rozměry byly měřeny digitálním posuvným měřidlem s přesností 0,01 mm vždy ve třech osách a na přesně stejných místech, aby byla minimalizována odchylka vlivem nepřesností při výrobě těles.



Obrázek 20: Tělesa pro měření bobtnání
na konci máčení (vlevo), po ukončení měření (vpravo)

Měření vždy probíhalo v klimatizované laboratoři. První měření rozměrů a hmotnosti bylo provedeno po dosažení rovnovážné vlhkosti dřeva při teplotě 20 °C a relativní vzdušné vlhkosti 65 %. Následně byla tělesa umístěna do sušící komory s teplotou 103 °C po dobu 24 hodin. Průběžně byla monitorována hmotnost těles a po ustálení hmotnosti bylo provedeno druhé měření. Tělesa, na kterých neprobíhalo aktivní měření, byla uchovávána v exikátoru pro zamezení přístupu vzdušné vlhkosti. Před třetím měřením byla tělesa umístěna do lázně destilované vody, kde byla zatížena, aby došlo k jejich plnému ponoření. Máčení probíhalo 72 hodin, což by mělo spolehlivě zajistit vlhkost nad bodem nasycení buněčných stěn. Po uplynutí této doby bylo závaží uvolněno

a značné množství těles zůstalo ponořeno u dna (viz. obr. 20). Po vyjmutí z lázně byla tělesa očištěna od kapající vody a neprodleně byla opět měřena hmotnost a rozměry.

Procentuální vlhkost dřeva w_{abs} byla zjišťována v klimatizovaném a máčeném stavu podle vzorce uvedeného v normě ČSN 49 0126 (1989):

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100 \quad (3)$$

kde m_w je hmotnost dřeva při dané vlhkosti a m_0 je hmotnost absolutně vysušeného dřeva.

Celkové bobtnání bylo počítáno zvlášť pro každý směr a pro objem podle vzorce uvedeného v normě ČSN 49 0126 (1989):

$$\beta_i = \frac{a_{i,max} - a_{i,0}}{a_{i,0}} \times 100 \quad (4)$$

kde $a_{i,max}$ zastupuje daný rozměr v libovolném směru, objem, nebo plochu po bobtnání a $a_{i,0}$ je stejná veličina při nulové vlhkosti, výsledná hodnota je vyjádřena v procentech.

Spolu s bobtnáním byl vypočteno i objemové sesychání, pro které norma ČSN 49 0126 (1989) udává vzorec:

$$\alpha_i = \frac{a_{i,max} - a_{i,0}}{a_{i,max}} \times 100 \quad (5)$$

Význam symbolů je stejný jako v rovnici (4).

4.3.1. Stanovení hustoty

Hustota byla počítána pro dřevo v absolutně suchém stavu podle vzorce, který uvádí norma ČSN 49 0108 (1993):

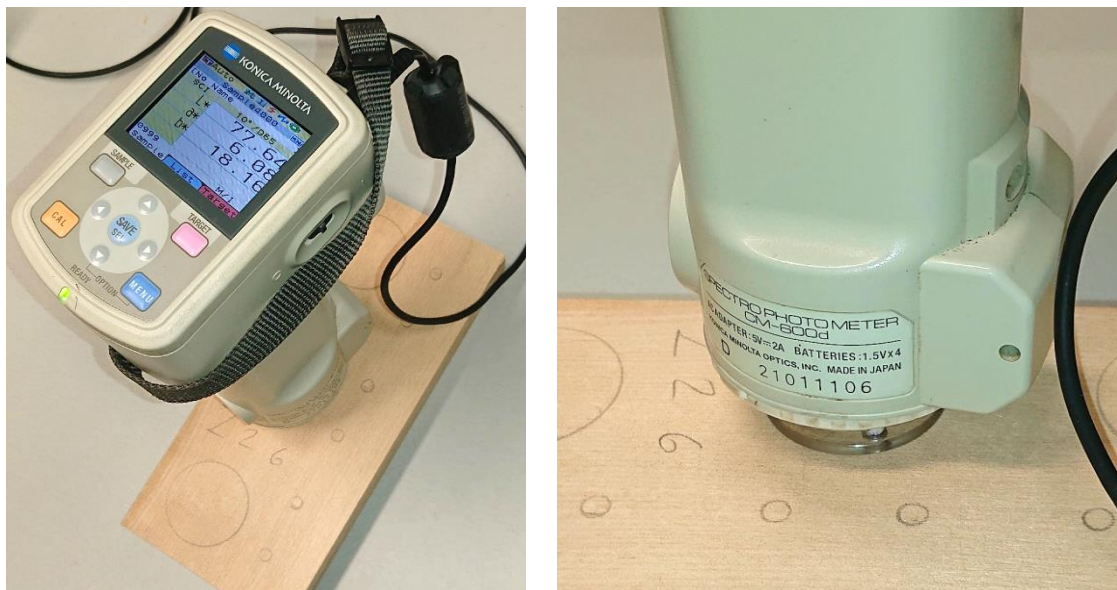
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6)$$

kde ρ je hustota v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, m je hmotnost tělesa v absolutně suchém stavu v kg a V je objem tělesa vypočtený vynásobením jednotlivých rozměrů v m^3 .

4.4. Měření barvy

Změna barvy povrchu byla měřena pomocí přenosného spektrofotometru CM-600d od společnosti Konica Minolta Business Solutions Europe GmbH (viz. obr. 21). Měření probíhalo s nástavcem na měření kruhové plochy o průměru 8 mm. Princip měření spočívá v osvětlení měřené plochy zábleskovou xenonovou výbojkou denního světla D65 specifikovanou v mezinárodním standardu ASTM D1729 (2017). Paprsky světla odražené od povrchu jsou zaznamenány optickým senzorem s pozorovacím úhlem 10° a převedeny na elektrické impulzy podle vlnové délky světla. Přístroj měří rozsah vlnových délek od 400 do 700 nm. Pro popsání barevného prostoru byl použit trichromatický pravoúhlý systém CIEL*a*b*.

Měření probíhalo na radiálních i tangenciálních plochách, parametry L^* , a^* , b^* byly měřeny u každého tělesa na třech různých plochách a následně byla vypočtena průměrná hodnota. Měření bylo dvakrát opakováno podle stejného postupu. První měření proběhlo před impregnací a druhé po impregnaci. Měřené plochy byly zvoleny tak, aby byly od okraje tělesa minimálně 30 mm a byly výrazně označeny, aby druhé měření probíhalo na identických plochách. Tělesa po impregnaci nebyla nijak povrchově upravována, v případě výskytu barevné anomálie vlivem impregnace bylo měření provedeno bez změny na původním místě, četnost výskytu anomálií však byla nevýznamná. Vyhodnocení změn barvy proběhlo v dílčích parametrech L^* , a^* , b^* a následně byla vypočítána barvená odchylka ΔE^* podle vzorce (2).



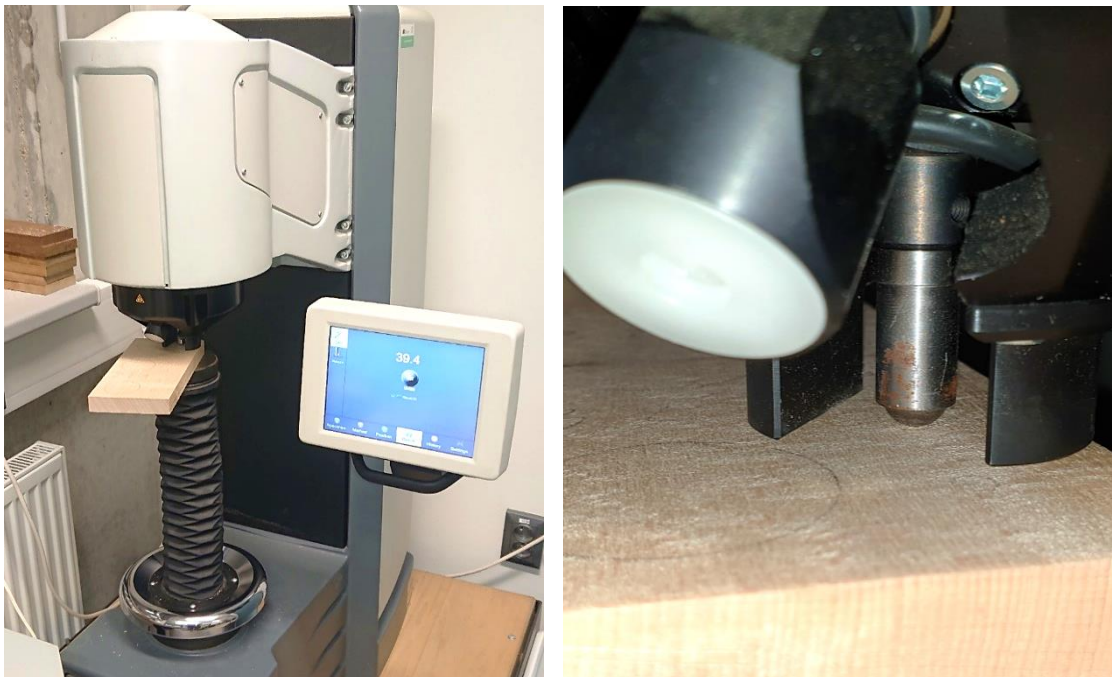
Obrázek 21: Měření barvy

spektrofotometr CM-600d (vlevo), detail pozice měření barvy (vpravo)

4.5. Tvrdost

Měření tvrdosti probíhalo na průmyslovém stolním tvrdoměru DuraVision EMDV 30 od dánského výrobce Struers GmbH (viz. obr. 22). Měření probíhalo metodou Brinella se zkušebním zatížením 500 N působícím po dobu 5 sekund. Použitý indentor byl z kalené oceli a měl tvar polokoule o průměru 10 mm. Testovací místa byla zvolena tak, aby od okraje byla vzdálena minimálně 20 mm a aby rozestupy mezi jednotlivými měřeními rovněž byly minimálně 20 mm. Místa měření byla volena tak, aby byly dvojice před a po impregnaci vždy co nejbližší u sebe.

Měření probíhalo na radiálních i tangenciálních plochách. Měření probíhalo na každém tělese na třech místech a získané hodnoty byly opět zprůměrovány. Měřicí místa se nepřekrývala s plochami pro měření barvy. Pro stanovení tvrdosti nebyl použit žádný výpočetní vzorec, neboť použitý tvrdoměr prováděl veškeré výpočty automaticky podle nastavených parametrů síly a průměru indentoru a výsledek přímo uvádí v MPa. Měření průměru otlaku nebylo provedeno opticky, nýbrž měřením hloubky průniku indentoru do tělesa. Kontinen a Nyman (1977) ve své studii měřili vliv měřících metod na výsledky Brinellovy tvrdosti a došli k závěru, že při měření podle hloubky průniku jsou hodnoty o 60–160 % nižší než v případě měření průměru obtisku opticky. Toto chování zdůvodňují pružností dřeva po uvolnění zatížení. Měření podle hloubky průniku je nicméně považováno za přesnější a v praxi se využívá častěji.



Obrázek 22: Měření tvrdosti

tvrdoměr DuraVision EMDV 30 (vlevo), detail polokoule indentoru (vpravo)

4.6. Impregnace

Impregnace testovaných těles byla provedena melamin-formaldehydovou pryskyřicí s označením Madurit MW 840/75WA od německého výrobce Prefere Melamines GmbH. Pryskyřice je dodávána ve vodném roztoku o koncentraci 75 %. Pryskyřice má medovou viskozitu a velmi lehce nažloutlou barvu. Pryskyřice proniká do buněčných struktur dřeva, kde následně kyselou katalýzou zesiluje s celulózou. Impregnované dřevo je dle slov výrobce chráněno před degradací, má vyšší rozměrovou stálost a odolnost proti vlhkosti. Současně slibuje výrobce zvýšení tvrdosti a požární odolnosti dřeva. Více informací je v produktovém listu v příloze 1.

Impregnace byla provedena ve vakuově-tlakovém zařízení, model VTIZ, s vnitřními rozměry impregnační komory $0,5 \times 2$ m od českého výrobce VYVOS, spol. s. r. o. (viz. obr. 23). Jak bylo již zmíněno, všechna tělesa procházející impregnací měla shodné rozměry s délkou nejdelší strany 200 mm. Všechna tělesa byla nejprve vysušena na nulovou vlhkost. Následně bylo každé druhé těleso otočeno drátem tak, aby po vyskládání do impregnační vany nedocházelo k plošnému kontaktu jednotlivých těles (viz. obr. 23). Každá dřevina měla samostatnou vanu.



*Obrázek 23: Příprava na chemickou modifikaci
impregnační zařízení VTIZ (vlevo), tělesa připravená k impregnaci (vpravo)*

Pryskyřice dodaná výrobcem byla naředěna destilovanou vodou. První polovina těles byla ponořena do roztoku pryskyřice a vody v poměru 7:3, tedy v koncentraci pryskyřice 70 %, druhá polovina těles byla impregnována roztokem o koncentraci 40 %. Jelikož pryskyřice dodávaná výrobcem je 75% vodný roztok, výsledný obsah pevných složek v impregnační látce je přibližně 30 % a 52,5 %, v dalším textu však budou skupiny

označovány jako 40 % a 70 %. Obě skupiny měly shodné podmínky impregnace. Kyselý katalyzátor nemusel být přidáván, neboť ve dřevě jsou přítomny acidické skupiny, které postačují pro katalyzaci síťovacích reakcí.

V první fázi byl v autoklávu vytvořen podtlak o velikosti 300 hPa a tento podtlak byl držen po dobu 10 minut. Následně byl autokláv tlakován na 300 KPa po dobu jedné hodiny. Impregnace probíhala při teplotě 22 °C. Po vyjmutí těles z impregnačních van byla pryskyřice ve dřevě stabilizována při teplotě 50 °C po dobu 24 hodin. V závěru byla tělesa vytvrzována po dobu čtyř hodin při teplotě 100 °C (viz. obr. 24). Tělesa byla před impregnací a po impregnaci zvážena v absolutně suchém stavu s přesností 0,001 g pro stanovení množství pryskyřice přijaté dřevem. Množství přijaté pryskyřice lze podle Sandberga (2021) vyjádřit procentuálním nárůstem hmotnosti (Weight Percentage Gain) podle vzorce:

$$WPG = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (7)$$

kde m_1 je hmotnost po impregnaci a m_0 je hmotnost před impregnací.

Použitá pryskyřice výrazně změnila barvu vlivem látek vylouhovaných ze dřeva, jejich množství a složení může být vhodným námětem dalšího výzkumu (viz. obr. 24). Před následujícím měřením byla tělesa klimatizována při teplotě 20 °C a relativní vzdušné vlhkosti 65 % do stabilizace hmotnosti.



Obrázek 24: Výstupní produkty modifikace
výluh pryskyřice (vlevo), impregnovaná tělesa před vytvrzením (vpravo)

4.7. Vyhodnocení dat

Naměřené a vypočtené hodnoty byly zpracovány v tabulkovém editoru Excel pro výpočet základních statistických ukazatelů. Prostřednictvím automatických výpočetních vzorců byly pro každou skupinu hodnot stanoveny aritmetický průměr, minimum a maximum, směrodatná odchylka a variační koeficient. Následně byly v tomto programu vytvořeny tabulkové záznamy o výsledcích experimentu.

Statistické hodnocení výsledků experimentu bylo provedeno v programu Statistica 14 (TIBCO Software Inc, USA), kde byla určována významnost jednotlivých faktorů a jejich interakce s testovanými proměnnými. Byla použita analýza rozptylu ANOVA s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. ANOVA je statistický test, též nazýván analýza rozptylu, který zjišťuje vliv jednotlivých úrovní daného faktoru na měřitelnou veličinu. Testujeme nulovou hypotézu, že střední hodnoty jednotlivých výběrů se neliší. Test vychází z předpokladu, že pokud zkoumané faktory nemají významný vliv na měřenou veličinu, neprojeví se jejich působení na statistických hodnotách této veličiny. Naopak pokud testovaný faktor má významný vliv, projeví se to na příslušných statistických ukazatelích, zejména na míře polohy (aritmetickém průměru) a míře variability (rozptylu). Význam působení posuzovaných faktorů je možno vyjádřit podle míry posunu polohy aritmetických průměrů a rozptylů (Drápela, 2000).

Jelikož má ANOVA velmi široké spektrum využití, nabízí i veliké množství variant a modifikací. Základní varianty jsou parametrická jednofaktorová, parametrická vícefaktorová a neparametrická. V této práci byla využita varianta parametrické dvoufaktorové ANOVY. V uvedených sloupcových grafech znázorňují vertikální sloupce 95 % interval spolehlivosti.

Pro číselné vyjádření hladiny významnosti, na jaké se jednotlivé výběry liší byl pro každou měřenou vlastnost vypracován Duncanův test mnohonásobného porovnání. Výsledky ANOVA jsou však téměř vždy dostatečně jednoznačné a proto jsou tabulky Dunacnových testů uvedeny v přílohách 2–10.

5. VÝSLEDKY A DISKUSE

Na následujících stranách jsou uvedeny výsledky provedených měření a výpočtů. U každého sledovaného parametru je uvedena tabulka se základními statistickými ukazateli, graf analýzy rozptylu ANOVA a porovnání výsledků s hodnotami jiných autorů.

5.1. Nárůst hmotnosti po modifikaci (WPG)

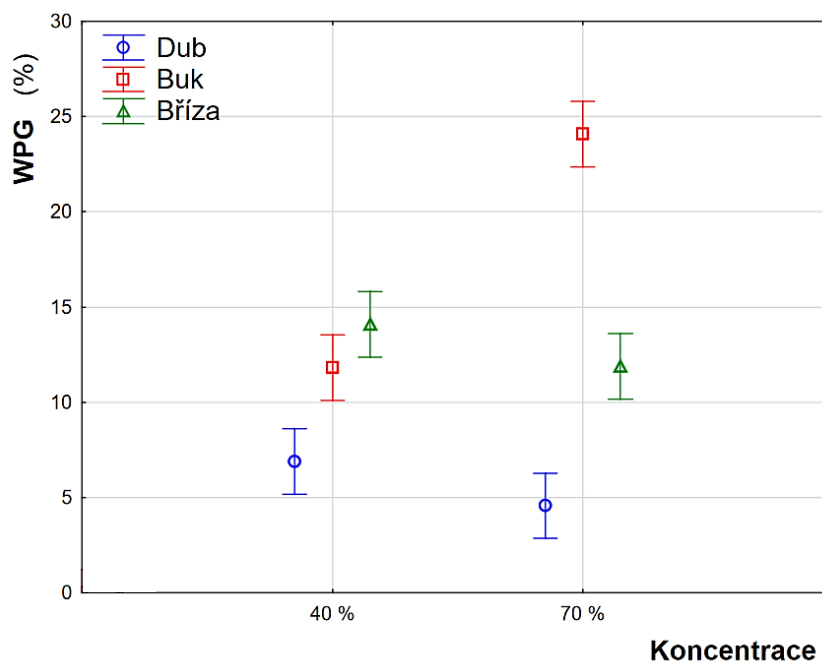
Množství přijaté pryskyřice bylo měřeno ve vysušeném stavu a dopočítáno podle vzorce (1). Výsledky se základními statistickými ukazateli jsou uvedeny v tabulce 2. Po impregnaci 40% pryskyřicí vykazují všechny dřeviny nárůst hmotnosti, nejvíce bříza (14,1 %), buk nepatrně méně (11,8 %), dub zaznamenal nižší nárůst, pouze 6,9 %. V případě impregnace pryskyřicí s koncentrací 70 % jsou již výsledky méně jednoznačné. Zatímco buk přijal pryskyřice podstatně více, než v případě nižší koncentrace (24,1 %), obě ostatní dřeviny zaznamenaly nižší nárůst hmotnosti oproti první koncentraci, bříza 11,9 % a dub pouze 4,6 %. Na obrázku 25 je zachycen výstup grafu z ANOVY pro jednotlivé dřeviny.

Tabulka 2: Základní statistické údaje procentuálního nárůstu hmotnosti (WPG)

[%]		Minimum	Průměr	Maximum	Sm. odch.	Var. koef.
DUB	40 %	1,8	6,9	11,3	2,6	37,1
	70 %	1,2	4,6	10,8	2,5	54,2
BUK	40 %	3,2	11,8	18,5	4,1	35,0
	70 %	5,9	24,1	45,3	13,6	56,5
BŘÍZA	40 %	0,8	14,1	23,5	5,8	41,0
	70 %	3,4	11,9	21,8	5,4	45,1

Při vyšší koncentraci pryskyřice došlo k poklesu příjmu pryskyřice. Shams et al. (2004) pozoroval pozitivní korelaci mezi nárůstem koncentrace modifikační pryskyřice a WPG, zabýval se však pouze koncentracemi od 1 % do 20 %. Gindl (2003) se věnoval vlivu vyšších koncentrací na WPG jehličnatých dřevin (jmenovitě smrk, borovice a modřín) a při použití modifikační látky s koncentrací MF pryskyřice 55–60 % zaznamenal poloviční příjem oproti pryskyřici o koncentraci 25 %. Podobných výsledků

dosáhl i Altun (2017), který testoval koncentrace 25 % a 51 % při modifikaci borovice a kaštanu. Borovice dosáhla WPG 44 % a 33 % (v pořadí) a jírovec 33 a 27 % (v pořadí). Tyto hodnoty jsou velice blízké použité koncentraci v této práci, kde byl použit obsah pevných částic 30 % a 52,5 %. Lze tedy konstatovat, že dub a bříza se chovaly podle očekávání, buk se však tomuto trendu vymyká.



Obrázek 25: Statistické zhodnocení WPG pro jednotlivé koncentrace a dřeviny

Gindl (2003) toto chování vysvětluje společným působením více faktorů. V první řadě má vliv viskozita modifikační látky. Viskozitu je možno definovat jako odpor kapaliny vůči pohybu. Při vyšší koncentraci pryskyřice se viskozita dostává na úroveň, kdy se obtížně pohybuje dřevem, impregnace by tedy vyžadovala použití vyššího tlaku, nebo prodloužení času. Dále, pro úspěšné difundování pryskyřice do buněčných stěn je zapotřebí stěny nabobtnat, protože molekuly pryskyřice nejsou schopny proniknout mikropóry buněčné stěny v suchém stavu. Schopnost MF pryskyřice nabobtnat buněčnou stěnu je velice omezená, a proto při impregnaci vysušeného dřeva je zapotřebí využívat vodný roztok, nebo impregnovat již nabobtnalé dřevo. Při použití koncentrace pryskyřice přesahující 50 % se množství vody jeví jako nedostatečné pro nabobtnání dřeva.

Altun (2017) i Gindl (2003) se shodují na významném vlivu extraktivních látek ve dřevě, které zmenšují dostupný volný prostor ve dřevě pro pryskyřici. Dále také mají extraktiva negativní vliv na průběh kondenzačních reakcí pryskyřice. S vysokým obsahem extraktiv rovněž souvisí kyselý charakter dřeva. Klüppel (2017) zmiňuje, že při modifikaci kyselých dřevin může docházet k předčasným samokondenzačním reakcím

pryskyřice již v průběhu impregnace, což může vést ke zhoršení prostupu pryskyřice do dřeva, zejména buněčných stěn (Hill, 2006).

Kombinace těchto faktorů nepochybně vedla k poklesu WPG při vyšší koncentraci. Buk má jednoznačně vyšší propustnost dřeva a tedy vyšší viskozita impregnační látky ho neovlivnila tolik jako dub a břízu (Zeidler a Borůvka, 2016). Tyto dvě dřeviny rovněž vykazují vyšší kyselost a obsah extraktivních látek, než buk (Tetreault, 1999; Geffert, 2019). Těmito faktory je možné vysvětlit vyšší příjem pryskyřice buku oproti ostatním dřevinám.

Jak ve své studii uvádí Xu (2020), porovnání WPG s jinými autory je problematické, protože se WPG výrazně liší podle použité metodiky i dřevin, přičemž možností postupu modifikaci je nepřehledné množství. Obvyklé hodnoty WPG se udávají v rozmezí od 10 % do 40 %, při modifikaci těžko impregnovatelných dřevin může být dosaženo WPG pouze 6–8 % (Gindl, 2004; Deka et al., 2007; Wimmer et al., 2007). Dosažené WPG v této práci je tedy spíše nižší. Pro hodnocení vlastností impregnovaného dřeva je nicméně důležitější rozložení pryskyřice ve dřevě spíše než celkový obsah pryskyřice. Různí autoři se zabývali měřením průniku pryskyřice do buněčných stěn i hloubku průniku pryskyřice pod povrch dřeva (Furuno et al., 2004; Gindl et al., 2003; Deka et al., 2007; Kučerová, 2012). Obě tyto charakteristiky mají zcela zásadní vliv na různé vlastnosti produktu.

Xu (2020) na základě výsledků studie Stamm (1964) vypočítal teoretické maximální WPG pro maximální uložení pryskyřice v buněčných stěnách. Tato hodnota je ekvivalentem bodu nasycení buněčných stěn, protože popisuje stav, kdy všechny volné hydroxylové (OH) skupiny jsou obsazeny pryskyřicí, ale žádná pryskyřice není uložena v lumenech buněk. Vypočtená teoretická hodnota pro všechny formaldehydové pryskyřice je 34,5–36,3 %. Přičemž touto modifikací dojde k nabobtnání buněčných stěn o 9,02–14,54 % (Xu, 2020). Reálně tento stav není dosažitelný.

5.2. Hustota

Jako doplňkový parametr k příjmu pryskyřice byla podle vzorce (6) vypočtena hustota dřeva v absolutně suchém stavu, viz. tabulka 3. Z referenční skupiny byla nejvyšší hustota naměřena u břízy ($670 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), která po impregnaci zaznamenala nárůst 9 % při nižší koncentraci a pouze 2,5 % při vyšší. U dubového dřeva byla naměřena referenční hustota $649 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a vývoj podobný jako u břízy, v prvním případě nárůst hustoty o 13,1 % a ve druhém pouze 8,7 %. Buk však podobně jako v případě WPG zaznamenal stabilní

růst hustoty, z referenční hodnoty 658 kg.m^{-3} se zvýšil o 9,9 % při 40% koncentraci a dále až o 21,4 % při 70% koncentraci. Vývoj hustoty tedy dobře kopíruje WPG, viz. obr. 26.

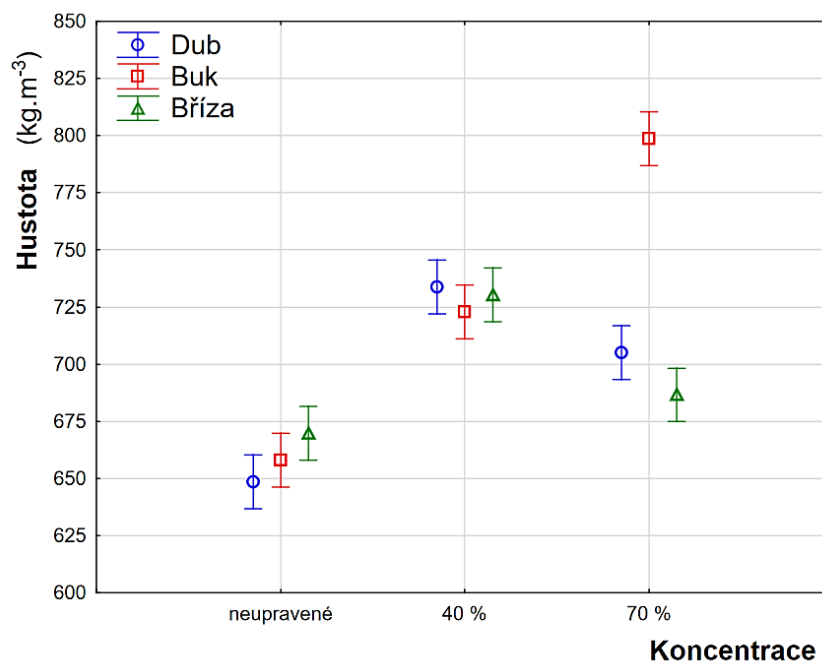
Tabulka 3: Základní statistické údaje hustoty v absolutně suchém stavu

	[%]	Minimum	Průměr	Maximum	Sm. odch.	Var. koef.	Rozdíl
Dub	ref	626	649	669	11	2	
	40 %	683	734	776	28	4	13,1
	70 %	647	705	766	37	5	8,7
Buk	ref	647	658	670	6	1	
	40 %	691	723	763	23	3	9,9
	70 %	740	799	876	43	5	21,4
Bříza	ref	646	670	687	13	2	
	40 %	691	730	778	25	3	9,0
	70 %	641	687	742	30	4	2,5

Pro porovnání výchozích hodnot bylo vybráno pět autorů: Balabán (1955), Tsoumis (1991), Matovič (1993), Požgaj et al. (1993) a Zeidler a Borůvka (2016). Z hodnot uváděných jednotlivými autory byly vypracovány standardní rozsahy hustoty pro jednotlivé dřeviny. Dub může nabývat hustoty $650\text{--}700 \text{ kg.m}^{-3}$, buk $640\text{--}740 \text{ kg.m}^{-3}$ a bříza $600\text{--}730 \text{ kg.m}^{-3}$. Je patrné, že hustota dřeva patří mezi velice variabilní vlastnosti, protože jednotliví autoři se v udávaných hodnotách výrazně liší. Naměřené referenční hodnoty tohoto experimentu vycházejí u všech tří dřevin v rozsahu uvedených autorů. Zajímavé je, že zatímco buk a dub se nacházejí na spodní hranici rozsahu, u břízy byla naopak naměřena hustota spíše vyšší, takže došlo k situaci, kdy bříza měla nejvyšší hustotu z těchto tří testovaných dřevin, přestože uvedení autoři se shodují na tom, že bříza by měla mít z testovaných dřevin nejnižší hustotu. Vzhledem k obrovské variabilitě hustoty však není výjimečná situace, kdy bříza má vyšší hustotou než buk a naměřené hodnoty jsou plně relevantní (Kujala, 1946; Veling, 1979; Verkasalo, 1998; Heräjärvi, 2004).

Nárůst hustoty po modifikaci je očekávatelný. Hustotu lze charakterizovat jako hmotnost dřevní substance v objemu dřeva, jinými slovy se jedná o poměr dřevní hmoty a vzduchu. Pryskyřice po modifikaci vyplňuje část těchto volných prostor a zároveň lze očekávat částečný průnik do buněčných stěn. Toto má za následek nabobtnání buněčné

stěny a tím zvětšení objemu dřeva, nárůst hmotnosti vlivem přijaté pryskyřice má však výraznější vliv, a tak podobně jako při zvyšování vlhkosti dřeva se zvyšuje i jeho hustota, se zvyšováním obsahu pryskyřice ve dřevě (která má vyšší hustotu než voda) dochází nevyhnutelně z výraznému nárůstu hustoty. Nárůst hustoty prakticky kopíruje WPG, což potvrzují i další výzkumy, např. Altun (2007), Altun a Tokdemir (2007). Podle Xu (2020) lze vypočítat závislost WPG na hustotě dřeviny, se zvyšující se hustotou dřeviny WPG klesá, protože ve dřevě je méně prostoru, kde se může pryskyřice ukládat, nicméně autor zmiňuje, že tato závislost není zcela přesná.



Obrázek 26: Statistické zhodnocení vlivu modifikace na hustotu dřeva

5.3. Vlhkost

Rovnovážná vlhkost byla vypočtena podle vzorce (3) ve dvou stavech dřeva: po stabilizaci hmotnosti dřeva při 65 % relativní vzdušné vlhkosti a teplotě 20 °C a po máčení v destilované vodě po dobu 72 hodin.

Aklimatizované dřevo bez úpravy by při 65% relativní vzdušné vlhkosti a 20 °C dle literatury mělo dosahovat vlhkosti 12 % (Požgaj et al., 1993; Tsoumis 1991; Borůvka a Babiak, 2016). Nejbližší této hodnotě byla bříza s průměrnou vlhkostí 13 %, dub dosáhl vlhkosti pouze 10 % a buk naopak 15 %. Po impregnaci nižší koncentrací poklesla rovnovážná vlhkost u buku a břízy shodně o 8,9 %, u dubu pak o 7,7 %. Snížení vlhkosti bylo tedy u všech dřevin srovnatelné. Zajímavější vývoj nastal ve výsledcích impregnace vyšší koncentrací, kde buk pokračoval v poklesu rovnovážné vlhkosti a dosáhl snížení až

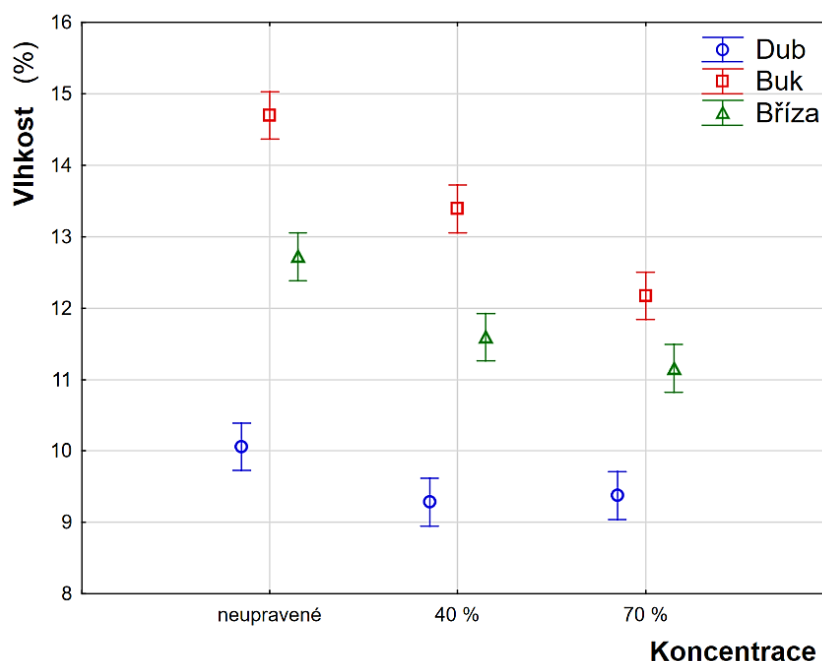
17,2 %, bříza rovněž poklesla, oproti buku ale výrazně méně, o 12,3 %. Rovnovážná vlhkost dubu se však oproti modifikaci nižší koncentrací lehce zvýšila, celkový pokles činil pouze 6,8 % a výsledná hodnota se tak statisticky neliší od vlhkosti nižší koncentrace modifikace. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 4, výstup z ANOVY je na obrázku 27.

Tabulka 4: Základní statistické údaje rovnovážné vlhkosti

	[%]	Minimum	Průměr	Maximum	Sm. odch.	Var. koef.	Rozdíl
	ref	9	10	11	1	6	
Dub	40 %	8	9	11	1	8	-7,7
	70 %	8	9	11	1	8	-6,8
	ref	14	15	16	<1	4	
Buk	40 %	12	13	16	1	8	-8,9
	70 %	11	12	14	1	6	-17,2
	ref	12	13	13	<1	2	
Bříza	40 %	11	12	13	<1	4	-8,9
	70 %	9	11	13	1	9	-12,3

Modifikace pryskyřicí tedy celkově vedla podle očekávání k poklesu rovnovážné vlhkosti, což je způsobeno jednak tím, že pryskyřice fyzicky blokuje přístup vlhkosti do dřeva a zároveň, pokud difunduje do buněčných stěn, snižuje množství sorpčních jednotek (OH skupin). Epmeier et al. (2003) naměřili na dřevu buku a břízy snížení rovnovážné vlhkosti průměrně o 20 % po modifikaci methyl-melamin-formaldehydovou (MMF) pryskyřicí. Altun a Tokdemir (2017) provedli měření rovnovážné vlhkosti na dřevu borovice a topolu a došli k závěru, že po modifikaci se rovnovážná vlhkost snížila o 24,7 % u borovice a o 26,2 % u topolu, přičemž modifikace byla provedena MF pryskyřicí o koncentraci 25 % při impregnaci tlakem 4 bary po dobu 60 minut, WPG bylo naměřeno (v pořadí) 53,8 % a 73,1 %. V této práci bylo dosaženo nižšího WPG a tomu adekvátní nižší pokles rovnovážné vlhkosti. Lze tedy konstatovat, že výsledky jsou ve shodě s jinými autory.

Epmeier et al. (2004) provedli srovnání hlavních metod chemické modifikace, methyl-melamin-formaldehydová pryskyřice dosáhla snížení o 26 %, podobně jako tepelná modifikace, nebo modifikace oleji. Nejlepších výsledků dosáhla acetylace se snížením vlhkosti o 65 % a furfurylace (63 %).

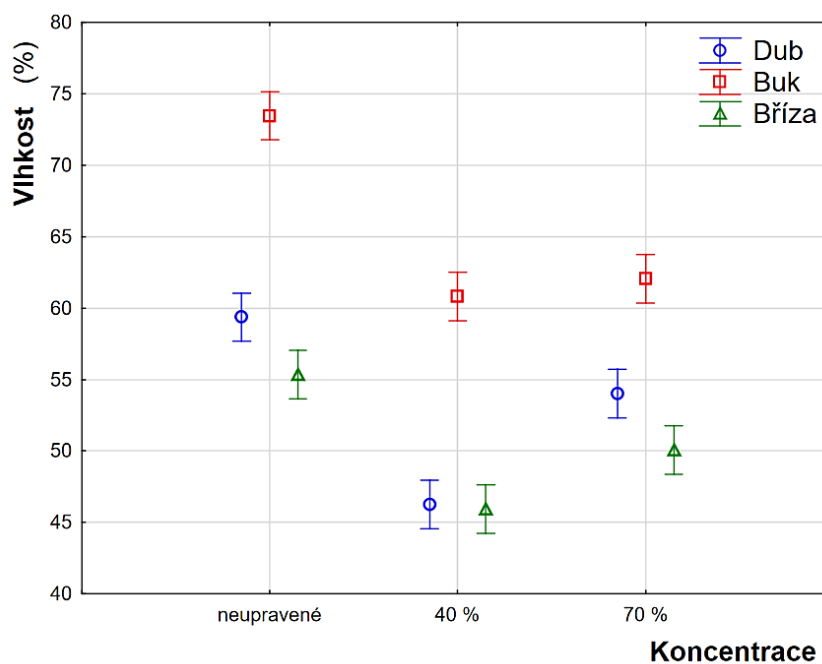


Obrázek 27: Statistické zhodnocení vlivu modifikace na rovnovážnou vlhkost dřeva

Ve výsledcích vlhkosti máčeného dřeva došlo k zajímavé změně vývoje. Referenční dřevo buku dosáhlo vlhkosti 73 %, dub dosáhl vlhkosti 59 % a bříza 55 %. Podobně jako u klimatizovaného dřeva byl při nižší koncentraci modifikace zaznamenán u všech dřevin pokles vlhkosti, u břízy a buku téměř shodně 17 %. U dubu činil pokles vlhkosti dokonce 22,1 %. Při vyšší koncentraci pryskyřice však nastal trend opačný a sice oproti předchozí skupině byla vlhkost vyšší, přestože ve srovnání s referenční skupinou byla vlhkost stále významně nižší, u dubu a břízy činil pokles 9 %, resp. 9,6 % a u buku 15,5 %. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 5 a na obrázku 28.

Tabulka 5: Základní statistické údaje vlhkosti dřeva po máčení

	[%]	Minimum	Průměr	Maximum	Sm. odch.	Var. koef.	Rozdíl
Dub	ref	56	59	62	2	3	
	40 %	40	46	52	3	7	-22,1
	70 %	45	54	58	3	6	-9,0
Buk	ref	70	73	81	3	3	
	40 %	55	61	66	3	5	-17,2
	70 %	52	62	74	7	11	-15,5
Bříza	ref	52	55	59	2	4	
	40 %	42	46	50	2	4	-17,0
	70 %	39	50	58	5	11	-9,6



Obrázek 28: Statistické zhodnocení vlivu modifikace na vlhkost po dlouhodobém máčení

Ponořením dřeva do vody se zintenzivní působení vody na vytvrzenou pryskyřici. Zatímco proti vzdušné vlhkosti poskytuje dobrou ochranu i pryskyřice vytvrzená v lumenech a cévách dřeva, kapalná voda při dlouhodobém máčení je schopna tuto překážku překonat a pro dosažení trvalé ochrany je zapotřebí stabilizovat pryskyřici v buněčné stěně a tím zablokovat hydroxylové (OH) skupiny (Cai, 2007; Altgen, 2020). Altun a Tokdemir (2017) měřili rovněž navlhavost dřeva při působení kapalné vody a dosáhli snížení vlhkosti o 46,3 % u borovice a 37,4 % u topolu. Altun (2017) provedl podobný experiment při modifikaci borovice a kaštanu dvěma koncentracemi pryskyřice. Při nižší koncentraci 25 % dosáhl snížení vlhkosti (v pořadí) o 34 % a 37 %, při vyšší koncentraci 50 % však byla vlhkost snížena pouze o 21 % a 35 %. Došlo tedy ke zhoršení účinku modifikace, podobně jako tomu bylo v tomto experimentu.

Řada autorů se shoduje na tom, že napuštěním lumenů lze docílit pouze krátkodobého snížení navlhavosti dřeva, pro dlouhodobý účinek modifikace je zapotřebí dosáhnout vysokého stupně nasycení buněčných stěn (Lukowsky, 2002; Furuno et al., 2004; Cai, 2007). Z výsledků této práce je tedy možno vyvodit závěr, že při koncentraci pryskyřice převyšující 50 % má pryskyřice nižší úspěšnost průniku do buněčných stěn, což potvrzují i výsledky studie Altun (2017). Důvody tohoto chování byly již vysvětleny v kapitole 5.1.

Pro zlepšení účinku modifikace na vlhkost dřeva doporučuje Altgen (2020) zvýšit teplotu vytvrzování, jako ideální se jeví 160–190 °C, kdy dochází k částečné hydrolyze hemicelulóz a jejich provázání s molekulami pryskyřice.

5.4. Bobtnání a sesychání

Rozměrové změny dřeva byly měřeny po 72 hodinách máčení. Všechna tělesa dosáhla vlhkost výrazně přesahující MNBS, takže lze konstatovat, že dřevo bylo měřeno v maximálně nabobtnalém stavu. V tabulce 6 jsou uvedeny naměřené hodnoty rozdělené do tří částí – objemové bobtnání, bobtnání v radiálním směru a v tangenciálním směru. Podle očekávání je tangenciální bobtnání výraznější než radiální. Ve výsledcích se projevuje podobný trend jako v případě vlhkosti.

V objemovém bobtnání byly naměřeny referenční hodnoty 13,5 % u dubu; 20,3 % u břízy a 22,3 % u buku, čímž se nijak nevymykají očekávání. Při 40% koncentraci pryskyřice byl u všech dřevin zaznamenán pokles objemového bobtnání, u dubu 14,8 %, u břízy 16,9 % a u buku dokonce 30,9 %. V případě modifikace vyšší koncentrací pryskyřice byl vliv na bobtnání dřeva nižší, pouze buk dosáhl téměř shodné hodnoty 30,2 %, objemové bobtnání břízy pokleslo o 13,5 % a dub pouze o 7,2 %. Průběh objemového bobtnání zachycuje obrázek 29.

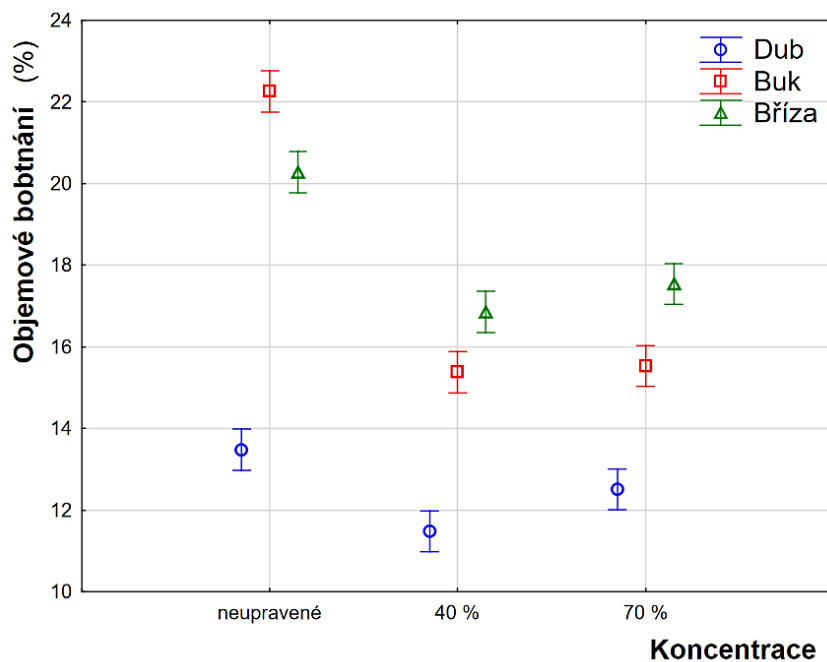
V jednotlivých anatomických směrech je vliv modifikace podobný jako u objemového bobtnání (viz. obr. 30). Referenční hodnoty jsou: (v pořadí dub; buk; bříza) 5,1 %; 6,9 %; 8,3 % v radiálním směru a 7,4 %; 13,7 %; 10,4 % v tangenciálním směru. V radiálním směru bylo po modifikaci nižší koncentrací pryskyřice bobtnání sníženo o 16,5 %; 17,7 %; 11,7 % a při vyšší koncentraci došlo k poklesu o 8,5 %; 20,8 %; 8,3 %. Všechny dřeviny se tedy chovaly srovnatelně, buk jako jediný dosáhl menšího bobtnání při vyšší koncentraci, ale u všech dřevin je rozdíl mezi koncentracemi nevýznamný. Větších rozdílů bylo dosaženo v tangenciálním směru, při nižší koncentraci bylo bobtnání sníženo o 15,9 %; 34,6 %; 18,8 % a při vyšší koncentraci o 6,3 %; 32,3 %; 13,3 %. V tangenciálním směru tedy došlo u všech dřevin k poklesu účinku modifikace při vyšší koncentraci pryskyřice.

Hodnoty bobtnání referenčních skupin byly opět porovnány s autory Balabán (1955), Tsoumis (1991), Matovič (1993), Požgaj et al. (1993), Rowell (2012) a Zeidler a Borůvka (2016). Hodnoty bobtnání pro dub se u těchto autorů pohybují v radiálním směru v rozmezí 4,2–5,7 %, přičemž většina autorů se drží spíše spodní hranice tohoto rozsahu, tangenciální bobtnání se udává 8,5–8,9 % a objemové 12,7–15 %. Naměřené hodnoty bobtnání dubu leží přesně v udaném rozmezí, lehce nadprůměrné je radiální bobtnání, naopak tangenciální bobtnání vyšlo podprůměrně, což ukazuje na sníženou radialitu testovacích těles. U buku je udáván rozsah bobtnání v radiálním směru 5,4–6,2 %

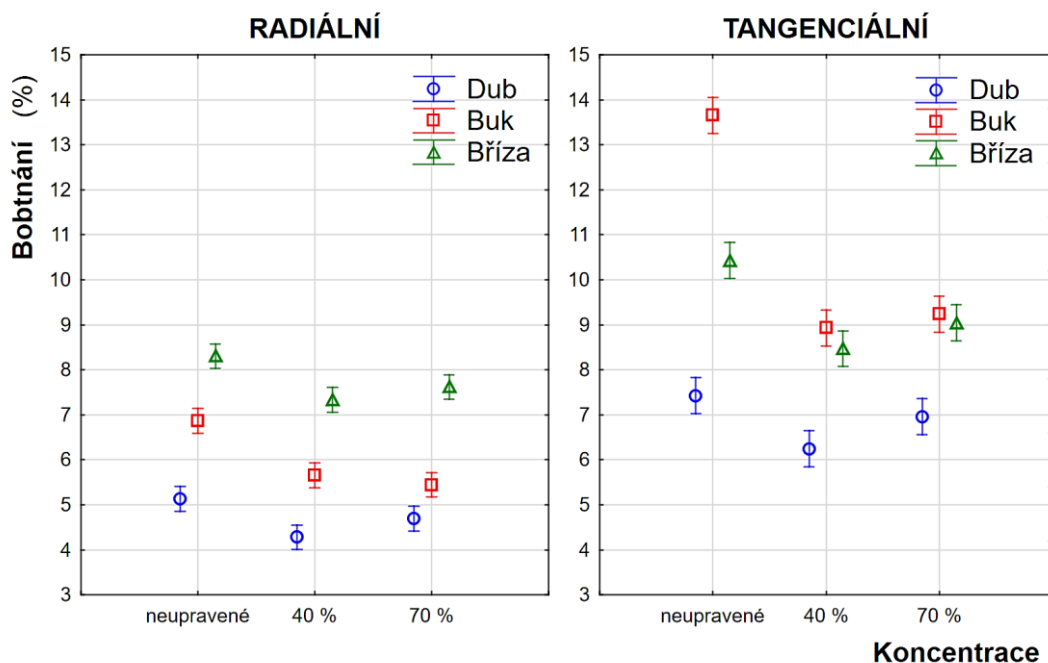
a v tangenciálním směru 10,5–13,4 %, objemové bobtnání buku má rozsah 16,5–21,4 %. Naměřené hodnoty bobtnání buku jsou lehce vyšší, než udává literatura, poměr radiálního a tangenciálního bobtnání je však shodný. U břízy jsou v literatuře hodnoty bobtnání v radiálním směru 5,6–8,4 % a v tangenciálním 8,5–10,2 %, objemové bobtnání se udává 13,6–19,3 %. Naměřené hodnoty břízy ve všech směrech velice dobře odpovídají hodnotám, které uvádí Matovič (1993). Všichni ostatní autoři však uvádějí bobtnání nižší.

Tabulka 6: Základní statistické údaje bobtnání po máčení

	[%]	Minimum	Průměr	Maximum	Sm. odch.	Var. koef.	Rozdíl	
objemové	ref	12,0	13,5	14,8	0,7	5,3		
	Dub	40 %	10,3	11,5	12,8	0,7	6,5	-14,8
		70 %	10,6	12,5	13,6	0,7	5,9	-7,2
	Buk	ref	20,7	22,3	23,1	0,6	2,9	
		40 %	12,9	15,4	16,9	1,1	7,2	-30,9
		70 %	13,0	15,5	18,3	2,0	12,7	-30,2
	Bříza	ref	18,7	20,3	21,6	0,6	3,2	
		40 %	15,3	16,9	18,4	1,0	5,8	-16,9
		70 %	13,9	17,5	20,2	1,8	10,2	-13,5
radiální	ref	4,1	5,1	6,3	0,5	10,6		
	Dub	40 %	3,3	4,3	5,8	0,6	12,9	-16,5
		70 %	4,0	4,7	5,4	0,4	8,5	-8,5
	Buk	ref	4,7	6,9	7,9	0,7	10,4	
		40 %	4,1	5,7	7,6	0,9	16,1	-17,7
		70 %	4,3	5,4	6,1	0,4	7,9	-20,8
	Bříza	ref	7,1	8,3	8,8	0,4	4,5	
		40 %	6,0	7,3	8,2	0,7	9,4	-11,7
		70 %	6,5	7,6	9,3	0,7	9,7	-8,3
tangenciální	ref	6,4	7,4	8,6	0,6	8,4		
	Dub	40 %	5,2	6,2	7,1	0,5	7,3	-15,9
		70 %	5,5	7,0	7,9	0,5	7,9	-6,3
	Buk	ref	12,5	13,7	15,4	0,7	5,1	
		40 %	7,4	8,9	9,9	0,7	8,1	-34,6
		70 %	7,2	9,2	12,7	1,9	21,1	-32,3
	Bříza	ref	9,6	10,4	11,0	0,4	3,5	
		40 %	7,9	8,5	9,3	0,4	4,8	-18,8
		70 %	6,6	9,0	10,5	1,2	12,9	-13,3



Obrázek 29: Statistické zhodnocení vlivu modifikace na objemové bobtnání



Obrázek 30: Statistické zhodnocení vlivu modifikace na bobtnání v jednotlivých anatomických směrech

Sesychání bylo počítáno podle vzorce (5) pouze objemové a nebyl vytvořen graf z ANOVY, protože sesychání ukazuje stejné výsledky jako bobtnání. Mezi bobtnáním a sesycháním existuje pevný vztah, který lze podle Požgaje et al. (1993) vyjádřit vzorci:

$$\alpha_i = \frac{100 \times \beta_i}{100 + \beta_i}, \quad \beta_i = \frac{100 \times \alpha_i}{100 - \alpha_i} \quad (8a, 8b)$$

Výsledky sesychání jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Základní statistické údaje sesychání

	[%]	Minimum	Průměr	Maximum	Sm. odch.	Var. koef.	Rozdíl
	ref	10,7	11,9	12,9	0,6	4,7	
Dub	40 %	9,3	10,3	11,4	0,6	5,8	-13,2
	70 %	9,6	11,1	11,9	0,6	5,3	-11,0
	ref	17,1	18,2	18,8	0,4	2,4	
Buk	40 %	11,4	13,3	14,4	0,8	6,3	-33,3
	70 %	11,5	13,4	15,5	1,5	10,9	-33,1
	ref	15,8	16,9	17,7	0,4	2,6	
Bříza	40 %	13,3	14,4	15,5	0,7	5,0	-15,9
	70 %	12,2	14,9	16,8	1,3	8,8	-22,7










Stabilizační efekt melamin-formaldehydové pryskyřice byl prokázán v řadě vědeckých prací, např. Stamm (1964), Pittman et al. (1994) a Altun (2017). Tento efekt je dosažen zejména při úspěšnému průniku pryskyřice do buněčné stěny buněk. Rapp et al. (1999) a Gindl et al. (2002) měřili a popsali, že je možné difundovat pryskyřici do buněčných stěn pouze pokud jsou stěny v nabobtnalém stavu. Je tedy důležité impregnovat dřevo vodným roztokem pryskyřice, nebo použít dřevo plně nabobtnalé vodou, které je ponořeno do vysoce koncentrované pryskyřice, jejíž pohyb je zapříčiněn osmotickým tlakem. Přestože tlakovou impregnací je možno účinně natlačit velké množství modifikační látky do celého objemu dřeva, průnik do buněčných stěn probíhá pouze difuzí, která vyžaduje čas, přestože je možné ji urychlit zvýšením teploty (Mantanis et al., 1995). Rapp et al. (1999) naměřili obsah pryskyřice v buněčné stěně 20 %, čehož bylo dosaženo po sedmidenním máčení.

Jak ukázaly výsledky měření vlhkosti, značné množství pryskyřice v tomto experimentu zůstalo pouze v lumenech buněk a stabilizační efekt tím byl snížen. Dub a bříza dosáhly při vyšší koncentraci znatelně nižšího WPG, což se projevilo i na vlhkosti a při této modifikaci skutečně bylo dosaženo nižšího stabilizačního efektu. Dřevo buku nasálo při vyšší koncentraci výrazně více pryskyřice, přesto bylo v obou měřeních dosaženo shodného stabilizačního efektu. Z toho lze usuzovat, že pryskyřice přijatá navíc při 70% koncentraci byla lokalizována pouze v lumenech buněk a z hlediska úspěšnosti modifikace tedy nedošlo k žádnému zlepšení.

5.5. Barva

Měření barvy ukázalo stabilní posun všech dřevin k tmavšímu odstínu. Průměrné hodnoty parametrů L^* , a^* , b^* a ΔE^* jsou uvedeny v tabulce 8, v závorkách jsou u každého parametru uvedeny směrodatné odchylky. V případě úpravy 40 % koncentrací se průměrná hodnota barevné odchylky ΔE^* pohybuje kolem 7, přesné hodnoty jsou: dub (6,8), buk (8,6), bříza (5,9). V případě impregnace koncentrací 70 % se barevná odchylka ΔE^* zvýšila: dub (14), buk (13,7), bříza (12,9), což činí průměrnou hodnotu 13,5. Barevná odchylka se tedy při vyšší koncentraci téměř zdvojnásobila. Podle rozdělení, které udává Cividini et al. (2007) se při nižší koncentraci jedná o výraznou barevnou změnu, při vyšší koncentraci již lze hovořit o zcela odlišné barvě. Při pohledu na jednotlivé parametry barvy je patrné, že parametry a^* a b^* se měnily pouze velmi nepatrně, u buku a břízy směrem ke žluto-červené, u dubu nelze vyzorovat téměř žádný posun. Celková barevná odchylka je tedy ovlivněna především poklesem parametru světlosti L^* . Pro barevné změny nebyla vypracována grafická podoba, neboť graf by nepodával relevantní představu o změně barevných parametrů. V tabulce je u každé skupiny zobrazena ukázka barvy složená z průměrných hodnot jednotlivých parametrů.

*Tabulka 8: Parametry barvy v systému CIEL*a*b*
v závorkách jsou uvedeny směrodatné odchylky*

			L^*	a^*	b^*	ΔE^*
DUB		ref	68,7 (2,6)	6,6 (0,5)	23,0 (0,6)	
		40 %	63,6 (3,3)	4,9 (0,5)	19,7 (1,3)	6,8 (1,6)
		70 %	54,7 (4,0)	6,6 (1,3)	21,9 (2,6)	14,0 (3,4)
BUK		ref	76,6 (3,8)	6,8 (2,6)	18,8 (1,1)	
		40 %	68,3 (3,8)	8,1 (1,3)	19,2 (2,0)	8,6 (2,5)
		70 %	63,7 (5,7)	8,5 (1,4)	20,6 (1,3)	13,7 (3,6)
BŘÍZA		ref	75,2 (2,2)	6,9 (0,6)	19,5 (0,9)	
		40 %	69,4 (2,9)	8,1 (0,8)	19,4 (1,8)	5,9 (1,7)
		70 %	63,4 (3,8)	9,5 (1,3)	22,6 (2,5)	12,9 (2,7)

Hlavní výhodou melamin-formaldehydové pryskyřice oproti fenol-formaldehydové a furfurylové je zachování přirozené barvy dřeva. Z hlediska hodnocení vlivu modifikace je tedy žádoucí, aby vzniklé barevné změny byly minimální. Baar (2010) ve své práci píše, že barva je silně variabilní a subjektivní, nelze ji hodnotit pouze čísly, ale důležité

je i pocitové vnímání barvy. V tomto smyslu je tedy předmětné doplnit provedené měření o vlastní hodnocení. Přestože vypočtená barevná odchylka ΔE^* je podle rozdělení Cividini et al. (2007) hodnocena jako odlišná barva, reálný pohledový rozdíl barev byl spíše nízký, nicméně impregnované dřevo bylo možné odlišit od referenčního. Pryskyřice opravdu zabarvila dřevo do lehce tmavších odstínů, nicméně toto bylo způsobeno zejména vyplavením extraktivních látek z vnitřku dřeva na povrch, kde se uvolnily do pryskyřice, předmětné je připomenout výrazné zabarvení zbytkové pryskyřice po procesu impregnace (viz. obr. 24). V porovnání s literaturou jsou výsledky barevné odchylky vyšší, Cai (2007) naměřil při modifikaci melamin-močovino-formaldehydovou pryskyřicí barevnou odchylku méně než 3, tedy nevýznamnou, rovněž Inoue (1993) nezaznamenal významnou změnu barvy.

Důvodem pro naměření vyšší barevné odchylky je fakt, že pryskyřice po vytvrzení zanechala na povrchu dřeva tenkou vrstvu křehké pěny a extraktiva rozpuštěná v pryskyřici zůstala na povrchu dřeva spolu s vrstvou pryskyřice. Tato povrchová vrstva se však snadno nechá zbrousit a po odstranění této vrstvy je barevný rozdíl mezi modifikovaným a surovým dřevem prakticky zanedbatelný. Přestože tedy byl prokázán vliv chemické modifikace melamin-formaldehydovou pryskyřicí na barvu dřeva, můžeme rovněž konstatovat, že při tomto procesu dochází k plnému zachování původního vzhledu dřeva. Vliv dřeviny je v tomto hodnocení nevýznamný, všechny testované dřeviny zaznamenaly srovnatelnou barevnou odchylku.

Mnoho studií bylo provedeno na atmosférickou degradaci dřeva upraveného MF pryskyřicí. Hansmann et al., (2005) naměřili výrazně menší barevnou odchylku při umělém stárnutí dřeva oproti neupravenému dřevu. Rapp a Peek (1999) prokázali, že melamin poskytuje dodatečnou ochranu ligninu vůči UV záření a zároveň zpomaluje vyplavování produktů fotodegradace. Tato ochrana je zdůvodňována zesíťováním makromolekul melaminu do pevné 3D sítě uvnitř buněčných stěn (Lukowsky, 1999). Modifikace melaminovou pryskyřicí zajišťuje při venkovní expozici lepší odolnost vůči zašednutí dřeva než jiné modifikace. Rovněž byl pozorován nižší výskyt prasklin dřeva vlivem vnější expozice.

5.6. Tvrdost

Tvrdost byla měřena smíšeně na radiálních i tangenciálních plochách, ale vyhodnocení vlivu impregnace bylo provedeno na identických plochách a není tak

ovlivněno rozdílností tvrdosti v jednotlivých anatomických směrech. Vliv směru měření není předmětem této práce. V tabulce 9 je uvedeno srovnání hodnot po impregnaci s odpovídající referenční skupinou. U dubu byla naměřená průměrná tvrdost před impregnací přibližně 50 MPa, po impregnaci nižší koncentrací se tvrdost zvýšila o 35,3 %, při vyšší koncentraci o 55,6 %. Buk vykazoval před impregnací tvrdost 54 MPa s velmi malými odchylkami. Po impregnaci se tvrdost zvýšila o 32,8 % v prvním případě a o 55 % v druhém. Bříza měla před impregnací nejnižší tvrdost, v průměru obou referenčních skupin 43 MPa, současně ale zaznamenala nejvyšší nárůst tvrdosti, při nižší koncentraci 55 %, při vyšší dokonce 73,5 % a konečná tvrdost břízy se tak vyrovnala tvrdosti dubu, viz. obr. 31.

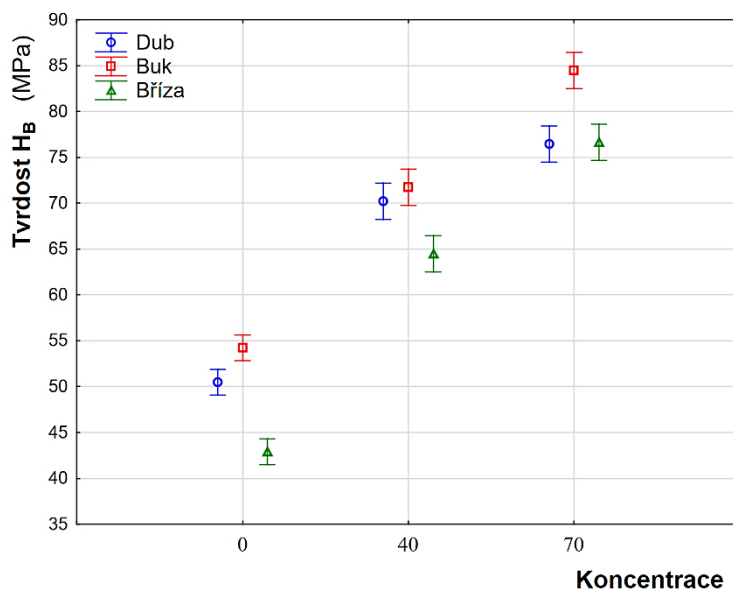
Tabulka 9: Základní statistické údaje Brinellovy tvrdosti

	[MPa]	Minimum	Průměr	Maximum	Sm. odch.	Var. koef.	Rozdíl (%)
DUB	ref 40	39,0	51,9	61,4	5,1	9,8	
	40 %	58,6	70,2	80,2	5,7	8,2	35,3
	ref 70	39,5	49,1	58,8	5,3	10,9	
	70 %	66,0	76,4	87,5	5,0	6,6	55,6
BUK	ref 40	47,8	54,0	61,4	3,8	7,0	
	40 %	66,9	71,7	77,0	3,2	4,5	32,8
	ref 70	46,3	54,5	63,7	4,2	7,8	
	70 %	75,2	84,5	90,8	4,6	5,5	55,0
BŘÍZA	ref 40	29,5	41,6	52,8	7,5	18,0	
	40 %	47,0	64,5	76,5	7,1	11,1	55,0
	ref 70	30,9	44,2	55,7	7,6	17,1	
	70 %	65,9	76,7	83,7	4,2	5,4	73,5

U tvrdosti bylo provedeno srovnání referenčních hodnot s autory Matovič (1993) a Zeidler a Borůvka (2016). Tito uvádějí tvrdost dubu v rozmezí 34–56 MPa, buku 27–44 MPa a břízy 23–37 MPa, přičemž radiální plochy těchto dřevin mají o 4–7 MPa nižší povrchovou tvrdost. Měření probíhalo smíšeně na radiálních i tangenciálních plochách, naměřené hodnoty by tedy měly být průměrem pro danou dřevinu. Hodnoty dubu leží v udávaném rozmezí, bříza se pohybuje těsně nad horní hranicí a u buku byly naměřeny hodnoty jednoznačně přesahující hodnoty v literatuře. Rozdíly mezi referenčními

skupinami daných dřevin nejsou statisticky odlišné, v grafu tak došlo k jejich sloučení pro lepší přehlednost výsledků.

Na obrázku 31 je dobře patrný trend tvrdosti v závislosti na koncentraci pryskyřice. Impregnace dřeva melaminovou pryskyřicí podle očekávání zvýšila tvrdost dřeva velmi výrazně, přičemž její účinek se zvyšuje s vyšší koncentrací. Jelikož je tvrdost měřena povrchově, kde lze očekávat nejvyšší příjem pryskyřice, není relevantní celkový příjem pryskyřice (WPG) (Wimmer et al., 2007). V případě tvrdosti také není důležitý průnik pryskyřice do buněčných stěn, uložení pryskyřice v lumenech buněk a mezibuněčných prostorech poskytuje dostatečné zvýšení tvrdosti, díky silnému zesíťování pryskyřice.



Obrázek 31: Statistické zhodnocení vlivu modifikace na tvrdost

Tvrdost dřeva je často považována spíše za technickou vlastnost než za individuální mechanickou vlastnost, a to z důvodu, že tvrdost je odvozena od několika různých sil, jako jsou tření, smykové a tlakové síly, které se objevují během měření (Kollmann a Côté 1968). Kúdela (1998) došel k závěru, že tvrdost je více než jakákoli jiná mechanická vlastnost závislá na podmínkách měření, metodě a anatomické stavbě dřeva, např. uvádí až pětinasobný rozdíl tvrdosti jarního a letního dřeva. Autor zjišťoval vliv jednotlivých vlastností dřeva a parametrů měření tvrdosti a došel mimo jiné k závěru, že tvrdost koreluje pozitivně s hustotou dřeva, ale nikoli v takové míře, v jaké udává Lysý a Jírů, (1961).

Z výsledků je jasně patrné, že modifikace pryskyřicí má významný vliv na tvrdost. Toto zjištění je v souladu s množstvím studií (např. Miroy, 1995; Hansmann, 2005; Wimmer, 2007; Klüpel, 2017). Jak bylo řečeno, tvrdost není přímo závislá na WPG,

přestože lze v literatuře vyzorovat vyšší tvrdosti u modifikací s vyšším příjmem pryskyřice. Běžně se nárůst tvrdosti u uvedených autorů pohybuje od 60 % do 120 %, srovnání tvrdosti s jinými autory je uvedeno v tabulce 10. Výsledky dosažené v této práci jsou spíše nižší oproti jiným autorům. Gindl et al. (2002) prokázal pomocí měření nanotvrdosti přímý vliv modifikace MF pryskyřicí na tvrdost buněčných stěn. Při obsahu pryskyřice 24 % naměřil nárůst tvrdosti o 115 % a dokázal tak, že pryskyřice je schopna posílit strukturu dřeva, namísto pouhého vyplnění dutin. Oproti tomu Klüppel (2017) provedl sérii měření tvrdosti dřeva borovice a došel k závěru, že pryskyřice zvyšuje tvrdost především snížením volných prostor ve dřevě a zda je pryskyřice lokalizována v lumenech, nebo buněčných stěnách, má pouze vedlejší účinek.

Tabulka 10: Srovnání procentuálního nárůstu tvrdosti a WPG vybraných autorů

Autor	WPG (%)	ΔH_B (%)	Dřevina
Klüppel	19	27	borovice
autor	12	33	buk
autor	7	35	dub
autor	12	55	bříza
autor	24	55	buk
autor	5	56	dub
Wimmer	7,3	57	smrk
Miroy	/	68	buk
Wimmer	13,2	69	smrk
autor	12	74	bříza
Hansmann	/	98	smrk
Klüppel	43	113	borovice
Wimmer	22,9	124	smrk
Hansmann	/	148	topol

Ve výsledcích této práce je možné si povšimnout, že tvrdost zaznamenala u všech dřevin stabilní nárůst při vyšší koncentraci pryskyřice, přestože hustota dřeva a příjem pryskyřice po modifikaci byla při 70 % koncentraci nižší oproti 40 %. Wimmer (2007) měřil hustotní profil impregnovaného masivního dřeva a jasně dokazuje, že v povrchových vrstvách dřeva je hustota vyšší než ve středu, protože se zde ukládá velké množství pryskyřice zejména v lumenech buněk a cévách. Gindl et al. (2004) zjišťoval

vliv hloubky průniku pryskyřice na hodnoty tvrdosti a došel k závěru, že pro dosažení optimálních výsledků postačí průnik 2 mm, což by v případě snadno impregnovatelných dřevin (buk, dub, bříza) neměl být problém, autoři však při experimentu na smrku, který je hodnocen jako těžko až extrémně těžko impregnovatelný, dosáhli průniku pouze 0,8 mm v případě použití vakuové impregnace a 4,5 mm při použití difúzního máčení po dobu tří dnů.

U dřevin se špatným prostupem kapalin je tedy důležité poskytnout pryskyřici dostatek času pro difúzi, zatímco dřeviny snadno impregnovatelné je možné úspěšně modifikovat tlakovou impregnací v krátkém čase. Dub a bříza měly při 70% koncentraci nižší WPG oproti 40% a přesto dosáhly zvýšení tvrdosti. Pokud je tedy cílem modifikace pouze zvýšení tvrdosti, ukazuje se 70% koncentrace jako výrazně efektivnější varianta. Při správném nastavení podmínek modifikace dojde k prosycení pouze povrchových vrstev při nízké celkové spotřebě pryskyřice.

6. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo posouzení vlivu chemické modifikace melamin-formaldehydovou pryskyřicí v koncentracích 40 % a 70 % na vlastnosti masivního listnatého dřeva, vybrány byly dřeviny dub, buk a bříza. Měřené vlastnosti zahrnovaly: hmotnostní nárůst dřeva po impregnaci (WPG), hustotu, rovnovážnou vlhkost, vlhkost po máčení, celkové bobtnání a sesychání dřeva, Brinellovu tvrdost a barevnou odchylku dřeva. Modifikace byla provedena vakuově-tlakovou impregnací.

Při nižší koncentraci bylo na všech dřevinách dosaženo příjmu pryskyřice přibližně 10 %, při vyšší koncentraci byl příjem u dubu a břízy nižší, u buku vyšší. Vývoj hustoty kopíroval příjem pryskyřice. U rovnovážné vlhkosti a tvrdosti bylo dosaženo vyššího účinku modifikace při vyšší koncentraci, u vlhkosti po máčení a bobtnání dřeva naopak. U všech měřených vlastností byl zjištěn významný pozitivní vliv modifikace. Při měření barevné odchylky bylo zjištěno pouze lehké ztmavení dřeva, které bylo způsobeno tenkou vrstvou pryskyřice na povrchu dřeva, kterou je možné snadno odstranit zbrúšením. Doporučená koncentrace pryskyřice pro modifikaci záleží na požadovaných parametrech produktu. Pro rozměrovou stabilizaci a ochranu dřeva je vhodnější nižší koncentrace, která zajistí lepší difúzi do buněčných stěn. Pro zvýšení tvrdosti postačí vyplnění lumenů buněk v povrchových vrstvách, čehož lze efektivněji dosáhnout při vyšší koncentraci.

Mnoho vědeckých prací i průmyslových aplikací již dokázalo, že chemickou modifikací lze ze dřeva udělat stabilní, trvanlivý a spolehlivý materiál. Melamin-formaldehydová pryskyřice nabízí vysoké kvality, zajišťuje např. vysokou odolnost vůči vodě, tvrdost povrchu a zejména zachování přirozeného vzhledu dřeva bez zbarvení. Modifikace melamin-formaldehydovou pryskyřicí funguje na jednoduchém principu vyplnění mikroskopických prostor a zafixování dřeva v trvale nabobtnalém stavu, přičemž ke zlepšení vlastností dřeva dochází zejména díky pryskyřici vytvrzené v buněčných stěnách, kde může vytvářet kovalentní vazby na hydroxylové (OH) skupiny celulózy. Modifikované dřevo je pro své vlastnosti předurčeno zejména pro venkovní expozice, jako je výroba podlah a chodníků, zahradního nábytku, schodů, pracovních stolů, oken a dveří, vybavení veřejného prostranství (např. lavičky) a obložení bazénů nebo saun. Hlavní nevýhodou melamin-formaldehydové pryskyřice je vysoká cena, proto se doposud nedočkala širokého uplatnění pro modifikaci dřeva, alternativou však může být močovino-melamin-formaldehydová pryskyřice, která má vyšší potenciál uplatnění na trhu díky relativně nižší ceně a dobré dostupnosti.

7. SEZNAM ZDROJŮ

- ADAMOPOULOS, S., A. Bastani, P. Gascon-Garrido, H. Militz and C. Mai, 2012. *Adhesive bonding of beech wood modified with phenol-formaldehyde compound*. European Journal of Wood and Wood Products 70(6): 897–910
- ALTGEN, M., D. Altgen, A. Klüpell a L. Rautkari, 2020. *Effect of curing conditions on the water vapor sorption behavior of melamine formaldehyde resin and resin-modified wood*. Journal of Materials Science 55(25): 11253-11266. ISSN 0022-2461. Dostupné z doi: 10.1007/s10853-020-04814-0
- ALTUN, S. a V. Tokdemir, 2017. *Modification with Melamine Formaldehyde and Melamine-Urea Formaldehyde Resin to Improve the Physical and Mechanical Properties of Wood*. BioResources 12(1): 586-596. Dostupné z doi: 10.15376/biores.12.1.586-596
- ALTUN, S., 2017. *Effects of Chemical Modification on Wood Properties*. The Online Journal of Science and Technology: 7(4). 57-63
- BAAR, J. a V. Gryc, 2014. *Colour of tropical wood and discolouration due to simulated sunlight*. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis 58(5): 13-20. ISSN 12118516. Dostupné z doi: 10.11118/actaun201058050013
- BALABÁN, K., 1955. *Nauka o dřevě: První část – Anatomie dřeva*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství v Praze. 216s.
- BASTANI, A., S. Adamopolous and H. Militz, 2015. *Water uptake and wetting behaviour of furfurylated, N-methylol melamine modified and heat-treated wood*. European Journal of Wood and Wood Products 73: 627–634. Dostupné z doi: 10.1007/s00107-015-0919-8
- BÖHM, M. a A. Zeidler, 2018. *Zajímavosti ze stavby dřeva – jak stavba dřeva ovlivňuje jeho vlastnosti*. Kostelec nad Černými lesy. Lesnická práce, 2017(96): 2–11
- BORŮVKA, V. a M. Babiak, 2016. *Vlastnosti dřeva v příkladech*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 139 s. ISBN 978-802-1326-187.
- CAI, X., 2007. *Wood Modifications for Valued-Added Applications using Nanotechnology-based Approaches*, Ph.D. dissertation, Université Laval, Quebec City, Quebec, Canada.

- CIVIDINI, R.; L. Travan, O. Allegretti, 2007. *White beech: A tricky problem in drying process*. International Scientific Conference on Hardwood Processing. September 24-26, Québec City, Canada.
- ČUNDERLÍK, I., 2009. *Štruktúra dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 135s. ISBN 978-80-228-2061-5.
- DEKA, M., W. Gindl, R. Wimmer a H. Christian, 2007. *Chemical modification of Norway spruce (Picea abies (L.) Karst) wood with melamine formaldehyde resin*. Indian Journal of Chemical Technology 14(2): 134-138.
- DRÁPELA, K., 2000. *Statistické metody II (pro obory lesního, dřevařského a krajinného inženýrství)*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 144s. ISBN 80-715-7474-0.
- DUBOVSKÝ, J., M. Babiak a I. Čunderlík, 2001. *Textúra, štruktúra a úžitkové vlastnosti dreva: návody na cvičenia*. Zvolen: Technická univerzita, 106s. ISBN 80-228-1014-2
- EPMEIER, H., M. Westin, A. O. Rapp, T. Nilsson, 2003. *Comparison of properties of wood modified by 8 different methods: Durability, mechanical and physical properties*. In: Proceedings from the First European Conference on Wood Modification, Ghent, Belgium, pp. 121-142.
- EPMEIER, H., M. Westin a A. Rapp, 2004. *Differently modified wood: comparison of some selected properties*. Scandinavian Journal of Forest Research 19(sup5): 31-37. ISSN 0282-7581. Dostupné z doi:10.1080/02827580410017825
- FENGEL, D. a G. Wegener, 1989. *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter, 632s. ISBN 3-11-012059-3.
- FURUNO, T., H. Kajita a Y. Imamura, 2004. *The modification of wood by treatment with low molecular weight phenol-formaldehyde resin: a properties enhancement with neutralized phenolic-resin and resin penetration into wood cell walls*. Wood Science and Technology 37(5): 349-361. ISSN 0043-7719. Dostupné z doi:10.1007/s00226-003-0176-6
- GANDELOVÁ, L., P. Horáček a J. Šlezingerová, 2009. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 176s. ISBN 80-7157-577-1.
- GEFFERT, A., J. Geffertova a M. Dudiak, 2019. *Direct Method of Measuring the pH Value of Wood*. Forests 10(10): 852. Dostupné z doi: 10.3390/f10100852

- GINDL W., F.Z. Yaghubi, R. Wimmer, 2003. *Impregnation of softwood cell walls with melamine-formaldehyde resin*. *Bioresource Technology* 87: 325-330
- GINDL W., H.S. Gupta, 2002. *Cell-wall hardness and Young's modulus of melamine-modified spruce wood by nano-indentation*. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 33:1141–1145
- GINDL, W., 2003. *Impregnation of softwood cell walls with melamine-formaldehyde resin*. *Bioresource Technology* 87(3): 325-330. ISSN 09608524. Dostupné z doi:10.1016/S0960-8524(02)00233-X
- GINDL, W., C. Hansmann, N. Gierlinger, B. Schwanninger, B. Hinterstoisser, a G. Jeronimidis. 2004. *Using a water-soluble melamine-formaldehyde resin to improve the hardness of Norway spruce wood*. *Journal of Applied Polymer Science* 93(4): 1900-1907. Dostupné z doi: 10.1002/app.20653
- GINDL, W., E. Dessipri, R. Wimmer., 2002. *Using UV-Microscopy to Study Diffusion of Melamine-Urea-Formaldehyde Resin in Cell Walls of Spruce Wood*. *Holzforschung* 56(1): 103-107
- HAGSTRAND, P., 1999. *Mechanical analysis of melamine-formaldehyde composites*. Gothenburg. Disertační práce. Chalmers University of Technology.
- HANSMANN, Ch., M. Deka, R. Wimmer a W. Gindl, 2006. *Artificial weathering of wood surfaces modified by melamine formaldehyde resins*. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64(3): 198-203. ISSN 0018-3768. Dostupné z doi:10.1007/s00107-005-0047-y
- HERÄJÄRVI, H., 2004. *Variation of basic density and Brinell hardness within mature Finnish Betula pendula and B. pubescens stems*. *Wood and Fiber Science*. 2004(36): 216-227.
- HILL, C.A.S., 2006. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. Bangor: John Wiley, 264s. ISBN 10 0-470-02172-1
- HORÁČEK, P., 2008. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. 2.*, přepřac. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 124s. ISBN 978-80-7375-169-2.
- INOUE, M., S. Ogata, M. Nishikawa, Y. Otsuka, S. Kawai a M. Norimoto, 1993. *Dimensional stability, mechanical properties, and color changes of a low molecular weight melamine-formaldehyde resin impregnated wood*. *Journal of the Japan Wood Research Society* 39: 181-189 ref. 2. ISSN 0021-4795.

- JERMER, J., B.L. Andersson and J. Schallnat, 2017. *Corrosion of fasteners in furfurylated wood: Final report after 9 years exposure outdoors*. The Proceedings IRG Annual Meeting, Ghent, Belgium. International Research Group on Wood Protection IRG/WP 17-40810. Dostupné z: <https://lib.ugent.be/catalog/pug01:8524854>
- KIELMANN, Bodo Caspar, Stergios ADAMOPOULOS, Holger MILITZ a Carsten MAI, 2014. *Decay resistance of ash, beech and maple wood modified with N-methylol melamine and a metal complex dye*. 89, 110-114 [cit. 2024-03-12]. ISSN 09648305. Dostupné z: doi:10.1016/j.ibiod.2014.01.011
- KLÜPPEL A., 2017. *Hardness and indentation modulus of resin-treated wood*. International Wood Products Journal, DOI: 10.1080/20426445.2016.1268358
- KOLLMANN, F. F. P. a W.A. CÔTÉ, 1968. *Principles of Wood Science and Technology*. Springer-Verlag New York, 592s. ISBN 978-3-642-87930-2. Dostupné z doi: 10.1007/978-3-642-87928-9
- KOLLMANN, F. F. P., E. W. Kuenzi a A. J. Stamm, 1975. *Particleboard. Principles of Wood Science and Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 312-550. ISBN 978-3-642-87933-3. Dostupné z doi:10.1007/978-3-642-87931-9_5
- KONTINEN, P. a C. Nyman, 1977. *Puulevyjen ja niiden pinnoitteiden kovuus [Hardness of wood-based panel products and their coatings and overlays]*. Paperi ja Puu - Paper and Timber 9/1977 (in Finnish with English summary)
- KUČEROVÁ, I., 2012. *Methods to measure the penetration of consolidant solutions into 'dry' wood*. Journal of Cultural Heritage. 13(3): 191-195.
- KÚDELA, J. a S. Kurjatko, 1998. *Analysis of wood hardness*. Seminar on Wood Structure and Properties 98: 199-203
- KUJALA, V. 1946. *Some recent research data on birches*. Comm. Inst. For. Fenn. 34(1): 1-36. (In Finnish with English summary)
- LARSSON-BRELID, P. 2013. *Benchmarking and state-of-the-art report for modified wood*. SP Report no. 54, SP Technical Research Institute of Sweden, Stockholm, Sweden: 1–31. ISSN 0284-5172
- LIN, Ch., O. Karlsson, G.B72 I. Mantanis a D. Sandberg, 2020. *Fire performance and leach resistance of pine wood impregnated with guanil-urea phosphate/boric acid and a melamine-formaldehyde resin*. European Journal of Wood and Wood

- Products 78(1): 107-111. ISSN 0018-3768. Dostupné z doi:10.1007/s00107-019-01483-y
- LIPTÁKOVÁ, E. a M. Sedliačik, 1989. *Chémia a aplikácia pomocných látok v drevárskom priemysle*. Bratislava: ALFA, 519s. ISBN 80-05-00116-9.
- LUKOWSKY, D., 1999. *Holzschutz mit Melaminharzen (Wood preservation with melamine resins)*. Hamburg. . Disertační práce. Universität Hamburg Fachbereich Biologie, 195s. Dostupné z doi: 10.13140/RG.2.1.2862.9361
- LUKOWSKY, D., 2002. *Influence of the formaldehyde content of waterbased melamine formaldehyde resins on physical properties of Scots pine impregnated therewith*. Holz als Roh- und Werkstoff 60(5): 349-355. ISSN 0018-3768. Dostupné z doi:10.1007/s00107-002-0324-y
- LYSÝ, F. a P. Jírů, 1961. *Nauka o dřevě: Pomocná kniha pro průmyslové školy dřevařské*. 2., přeprac. a dopln. vyd. Řada dřevařské literatury. Praha: SNTL, 638s
- MATOVIČ, A., 1993. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 212s. ISBN 80-7157-086-9.
- MIROY, F., P. Eymard a A. Pizzi, 1995. *Wood hardening by methoxymethyl melamine*. Holz Ms Roh- und Werkstoff 53: 276. Dostupné z doi: 10.1007/s001070050089
- MOGHADDAM, R. F., S. Chen, R. Hedjam a M. Cheried, 2013. *A maximal-information color to gray conversion method for document images: Toward an optimal grayscale representation for document image binarization*. Dostupné z doi:10.48550/arXiv.1306.6058
- MUSIL, I. a J. Möllerová, 2005. *Lesnická dendrologie. 2 listnaté dřeviny : přehled dřevin v rámci systému rostlin krytosemenných (Vyd. 1)*. Česká zemědělská univerzita, 216s. ISBN: 9788021313675
- NĚMEC, J., V. Jandáček a B. Hurda, 2005. *Dřevo: historický lexikon: tradice z pohledu dneška*. Praha: Grada, 80s. ISBN 80-247-1187-7.
- NOVÁK, D., 2020. *Porovnání radiálního a tangenciálního ohybu dubového a bukového dřeva při statickém a dynamickém zatížení*. Praha. Diplomová práce. ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE, 120s.
- PATŘIČNÝ, M., 2005. *Dřevo krásných stromů*. Třetí, přepracované vydání. Praha: Grada Publishing, 128s. ISBN 80-247-1193-1.
- PITTMAN, Ch. U., M. G. Kim, D. D. Nicholas, L. Wang, F. R. A. Kabir, T. P. Schultz a L. L. Ingram, 1994. *Wood Enhancement Treatments I. Impregnation of*

- Southern Yellow Pine with Melamine-Formaldehyde and Melamine-Ammeline-Formaldehyde Resins.* Journal of Wood Chemistry and Technology 14(4): 577-603. ISSN 0277-3813. Dostupné z doi:10.1080/02773819408003114
- POŽGAJ, A., D. Chovanec, S. Kurjatko a M. Babiak, 1993. *Štruktúra a vlastnosti dreva.* Bratislava: Príroda, 485s. ISBN 80-07-00600-1.
- RAHMAN, M. R., 2018. *Introduction to Reinforcing Potential of Various Clay and Monomers Dispersed Wood Nanocomposites.* Wood Polymer Nanocomposites, 314s: 1-36. ISBN 978-3-319-65735-6. Dostupné z doi: 10.1007/978-3-319-65735-6
- RAPP, A.O. a R.D. Peek, 1999. *Melaminharzimprägniertes sowie mit Wetterschutzlasur oberflächenbehandeltes und unbehandeltes Vollholz während zweijähriger Freilandbewitterung.* Holz als Roh- und Werkstoff 57(5): 331-339. Dostupné z doi:10.1007/s001070050353
- RAPP, A.O., H. Bestgen, W. Adam a R.D. Peek, 1999. *Electron Energy Loss Spectroscopy (EELS) for Quantification of Cell-Wall Penetration of a Melamine Resin.* Holzforschung 53(2): 111-117. Dostupné z doi: 10.1515/HF.1999.018
- REINPRECHT, L. a M. Pánek, 2016. *Trvanlivost a ochrana dřeva.* V Praze: Česká zemědělská univerzita, 132s. ISBN 978-80-213-2660-6.
- REINPRECHT, L., 2016. *Wood Deterioration, Protection and Maintenance.* JohnWiley&Sons, 357s. ISBN: 9781119106500. Dostupné z doi: 10.1002/9781119106500
- ROWELL, R.M., 2012. *Handbook of wood chemistry and wood composites, second edition.* Druhé vydání. CRC Press, 703s. ISBN 978-1-4398-5381-8.
- SANDBERG, D., A. Kutnar, O. Karlsson a D. Jones, 2021. *Wood modification technologies: principles, sustainability, and the need for innovation.* CRC Press-Taylor & Francis Group, 442s. ISBN 978-1-351-02822-6.
- SHAMS, M.I., H. Yano, K. Endou, 2004. *Compressive deformation of wood impregnated with low molecular weight phenol formaldehyde (PF) resin I: Effects of pressing pressure and pressure holding.* Journal of Wood Science 50(4): 337-342. Dostupné z doi: 10.1007/s10086-003-0570-6
- SCHMULSKY, R. a P. D. Jones, 2011. *Forest Products and Wood Science An Introduction.* Šesté vydání. Wiley Blackwell, 478s. ISBN 9780813820743.
- SCHNEIDER, M. H., 1994. *Wood Polymer Composites.* Wood and Fiber Science 26(1): 142-151.

- SCHWAB, E., 1990. *Die Härte von Laubhölzern für die Parkettherstellung*. Holz als Roh- und Werkstoff 48(2): 47-51. ISSN 0018-3768. Dostupné z doi:10.1007/BF02610703
- STAMM, A. J. a R. M. Seborg, 1939. *Resin-Treated Plywood*. Industrial & Engineering Chemistry 31(7): 897-902. ISSN 0019-7866. Dostupné z: doi:10.1021/ie50355a023
- STAMM, A. J., 1964. *Wood and Cellulose Science*. Ronald Press Company, 549s. ISBN 9780826084958.
- STAMM, A. J., E. G. Locke a R. M. Seborg, 1965. *Textbook: Wood and Cellulose Science*. Ronald, New York, 549s. Science 147(3658): 595-596. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.147.3658.595.b
- STAMM, A., H. Burr, A. Kline, 1946. *Heat Stabilized wood (Staybwood)*. Forest Products Laboratory 38(6): 630–634. Dostupné z doi: 10.1021/ie50438a027
- ŠLEZINGEROVÁ, J. a L. Gandelová, 2014. *Stavba dřeva*. 2. nezměněné vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 187s. ISBN 978-80-7375-966-7.
- TETREAULT J., 1999. *Coatings for Display and Storage in Museums*. Technical bulletin no. 21. ISBN: 0-662-27955-7
- TSOUMIS, G., 1991. *Science and Technology of Wood: Structure, Properties, Utilization*. New York: Van Nostrand Reinhold, 494s. ISBN 978-3-941300-22-4
- ÚRADNÍČEK, L., P. Maděra, S. Kolibáčová, J. Koblížek a J. Šetl, 2001. *Dřeviny České republiky*. Písek: Matice lesnická, 333s. ISBN 80-86271-09-9.
- VAN DER ZEE, M.E., N.L. Schipholt, B.F. Tjeerdsma, P. Brynildesn and I. Mohoric, 2007. *Glueability and paintability of furfurylated wood (Kebony)*. In: Hill, C.A.S., Jones, D., Militz, H. and Ormondroyd, G.A. [eds.]. Proceedings of the Third European Conference on Wood Modification, Cardiff, UK, 231-234.
- VELLING, P. 1979. *Wood density in two Betula pendula Roth progeny trials*. Folia For. 416: 1-24. (In Finnish with English summary).
- VERKASALO, E. 1998. *Raudus- ja hieskoivun laatu puuaineen tiheyden perusteella arvioituna. [Quality of European silver and white birch evaluated on the basis of wood density]*. In P. Niemisto, and T. Vaara. eds. Rauduskoivu tanaan-ja tulevaisuudessa, Tutkimuspaiva Tampereella 12.3.1997. Finnish Forest Research Institute. Research notes 668: 1 2 7 140. (In Finnish).
- WELLONS, J. D., 1977. *Adhesion to Wood Substrates*. Wood Technology: Chemical Aspects . WASHINGTON, D. C: AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. ACS

Symposium Series, 150-168. ISBN 9780841203730. Dostupné z
doi:10.1021/bk-1977-0043.ch010

- WIMMER, R., M. Deka, W.A. Gindl, H. Christian, 2007. *Chemical modification of Norway spruce (Picea abies (L) Karst) wood with melamine formaldehyde resin*. Indian Journal of Chemical Technology 14(2): 134-138
- XU, X., 2020. *Wood modification with resin impregnation technology for value-added services*. SVOA Materials Science and Technology 2(1): 09-21.
- YELLE, D. J. a J. Ralph, 2016. *Characterizing phenol-formaldehyde adhesive cure chemistry within the wood cell wall*. International Journal of Adhesion and Adhesives 70: 26-36. ISSN 01437496. Dostupné z
doi:10.1016/j.ijadhadh.2016.05.002
- ZEIDLER, A. a V. Borůvka, 2016. *Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin - podklady pro cvičení*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 89 s. ISBN 978-802-1326-743.
- Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky: Report on the state of forests and forestry in the Czech Republic: stav k 2022*. 2023. Praha: Ministerstvo zemědělství v nakladatelství Lesnická práce. ISBN 978-80-7434-703-0.

Normy

- ASTM D1729-22. Standard Practice for Visual Appraisal of Colors and Color Differences of Diffusely-Illuminated Opaque Materials. 2017. ASTM International. doi: 10.1520/D1729-96.
- ČSN 49 0103. Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach. 1979. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN 49 0108. Drevo. Zisťovanie hustoty. 1993. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN 49 0126. Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zisťovania napúčavosti. 1989. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 350 (49 0081). Trvanlivost dřeva a materiálů na bázi dřeva – Zkoušení a klasifikace odolnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva proti biologickým činitelům. 2019. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ISO 7724-3:1984. Paints and varnishes Colorimetry: Part 3: Calculation of colour differences. 1984. ICS: 87.040.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Molekulární struktura celulózy	12
Obrázek 2: Přibližné zastoupení chemických složek ve vrstvách buněčné stěny.....	14
Obrázek 3: Schéma buněčné stěny	15
Obrázek 4: Thyly v cévě.....	17
Obrázek 5: Schématická struktura listnatého dřeva.....	18
Obrázek 6: Sorpční isoterma.....	20
Obrázek 7: Graf průběhu objemového bobtnání u vybraných dřevin	22
Obrázek 8: Vizualizace barevného prostoru CIEL*a*b*	25
Obrázek 9: Mechanismus reakce acetandhydridu na hydroxylové skupiny za vzniku kyseliny octové.....	29
Obrázek 10: Strukturní vzorec furfuryl-alkoholové pryskyřice	30
Obrázek 11: Mechanismus reakce epoxidové pryskyřice s hydroxylovými skupinami dřeva	32
Obrázek 12: Mechanismus reakce alkoxyilanu za vzniku alkoholu	33
Obrázek 13: Strukturální vzorec močovino-formaldehydové pryskyřice.....	33
Obrázek 14: Strukturální vzorec fenol-formaldehydové pryskyřice	34
Obrázek 15: Strukturální vzorec melamin-formaldehydové pryskyřice.....	36
Obrázek 16: Vzhled bukového dřeva na jednotlivých řezech	40
Obrázek 17: Vzhled dubového dřeva na jednotlivých řezech	41
Obrázek 18: Vzhled březového dřeva na jednotlivých řezech.....	42
Obrázek 19: Ukázka značení a pozic měření na tělesu břízy	43
Obrázek 20: Tělesa pro měření bobtnání	44
Obrázek 21: Měření barvy	46
Obrázek 22: Měření tvrdosti	47

Obrázek 23: Příprava na chemickou modifikaci.....	48
Obrázek 24: Výstupní produkty modifikace.....	49
Obrázek 25: Statistické zhodnocení WPG pro jednotlivé koncentrace a dřeviny	52
Obrázek 26: Statistické zhodnocení vlivu modifikace na hustotu dřevin.....	55
Obrázek 27: Statistické zhodnocení vlivu modifikace na rovnovážnou vlhkost dřeva ..	57
Obrázek 28: Statistické zhodnocení vlivu modifikace na vlhkost po dlouhodobém máčení.....	58
Obrázek 29: Statistické zhodnocení vlivu modifikace na objemové bobtnání dřeva	61
Obrázek 30: Statistické zhodnocení vlivu modifikace na bobtnání dřeva v jednotlivých anatomických směrech	61
Obrázek 31: Statistické zhodnocení vlivu modifikace na tvrdost.....	66

Seznam tabulek

Tabulka 1: Procentuální zastoupení buněčných elementů v listnatém dřevě	16
Tabulka 2: Základní statistické údaje procentuálního nárůstu hmotnosti (WPG)	51
Tabulka 3: Základní statistické údaje hustoty v absolutně suchém stavu.....	54
Tabulka 4: Základní statistické údaje rovnovážné vlhkosti.....	56
Tabulka 5: Základní statistické údaje vlhkosti dřeva po máčení	57
Tabulka 6: Základní statistické údaje bobtnání po máčení.....	60
Tabulka 7: Základní statistické údaje sesychání.....	62
Tabulka 8: Parametry barvy v systému CIEL*a*b*	63
Tabulka 9: Základní statistické údaje Brinellovy tvrdosti	65
Tabulka 10: Srovnání procentuálního nárůstu tvrdosti a WPG vybraných autorů	67

8. PŘÍLOHY

Technical Data Sheet



® Madurit MW 840/75WA

Characteristics

Aqueous solution of a modified Melamine-Formaldehyde resin

Application

Solid wood impregnation

Supply form

Approx. 75% solution in water, colorless to slightly yellow

Specification

(referring to the day of delivery by the manufacturer)

	Unit	Value
<i>These technical data are determined by our Quality Control Laboratory for each production batch (lot) before release:</i>		
Non-volatile content (2g, 1h., 120°C, glass dish – flat type - acc. to DIN 12605, 3.5 cm diameter)	%	74 - 76
Dynamic viscosity DIN EN ISO 3219-B (23 °C)	mPa*s	350 - 750
pH value DIN 19260-64 (20 °C)		9.0 – 11.0
Specific gravity DIN 12791 part 1+3 (20 °C)	g/ml	1.245 – 1.260
Technical information (not regularly determined)		
Water tolerance DIN EN ISO 8989 (20 °C, deionized water)	ml/g	>25
Reactivity at 100°C +0.1% phosphoric acid 75%/solid resin	min.	18 – 35
Free Formaldehyde content DIN EN ISO 11402	%	< 0.2
Storage stability At 20 – 25 °C		approx. 2 months

Properties and application

Madurit MW 840/75WA is a modified melamine type resin with high reactivity that is used for impregnating natural wood products. The melamine resin penetrates the wood cell structures in the matrix and then crosslinks by acid catalysis with the cellulose in the wood. Through this reaction with the cellulose or by the formation of corresponding networks through self-condensation of the resin molecules, the hardened resin protects the wood from degradation and improves

dimensional stability and moisture resistance.

The impregnation provided improves resistance to degradation as tested according to EN standard 113 and 252. Thus, impregnation with Madurit MW 840 can provide a viable alternative to wood treatment with the toxic heavy metal salt solution(s) of Cr, Cu and As. Compared with other wood modification processes, treatment with melamine formaldehyde resin is less expensive, and minimizes color contribution of

the resin to the wood without damaging mechanical properties. Further, dimensional stability (swell and shrinkage) of the wood is improved by reduced moisture uptake.

By introducing larger amounts of resin, the hardness as well as the fire resistance of the wood is increased. The natural character of the wood, the influence of heart and sapwood and the conditions during wood storage should be considered before application.

Processing

Madurit MW 840 is processed from aqueous dilutions with a solids content of 10 to 40%. The impregnation is carried out in vacuum-pressure plants. Addition of acid catalyst is usually not necessary, since acidic groups promoting resin condensation are usually present in the wood. Because the wood partly gives off acids to the impregnation solution, a pH monitoring and a

possible correction must be performed after the impregnation process to improve the solution stability.

The drying of wood should be controlled in stages to minimize cracking of the wood and to avoid resin boiling. During the first 24 h, a temperature of 50 °C should not be exceeded; during the second drying phase, sufficient

condensation reaction of the resin in the wood must be ensured. If for technical reasons or to minimize discoloration of wood, a temperature of 100 °C is not reached, a check on whether the condensation reactions have sufficiently completed should be made, so that exceeding the limit of formaldehyde in the wood is avoided.

Storage

Madurit MW 840/75WA should be stored in closed containers made of polyester, PE, PP or stainless steel, if possible at 20-25 °C. Under these conditions, storage stability amounts to at least 2 months. During this time period, shifts in technical characteristics may occur caused by ageing effects.

If exposed to higher temperatures, the resin may become unusable even before reaching the storage life indicated above. Careful monitoring of stocks is therefore necessary especially during the summer months. The product is sensitive to low temperatures. At temperatures below 0 °C it becomes highly

viscous but reverts to its original viscosity on being heated to room temperature. Storage tanks must be designed in such a way that they can be emptied completely. Tanks should be cleaned carefully with warm water before being refilled

Work safety and environmental protection

Information about working safety and environmental protection are available in the safety data sheet.

This information is based on our present state of knowledge and is intended to provide general guideline for our products and their uses. It should not therefore be construed as guaranteeing specific properties of the products described or their suitability for a specific application. No legal liability shall be derived from it. Any existing industrial property rights must be observed. The quality of our products is guaranteed under our General Conditions of Sale.

In case of technical questions please contact: Prefere Melamines GmbH, Alt Fechenheim 34, D-60386 Frankfurt am Main, Tel.: +49 69 4109 2040

In case of commercial questions please contact: Prefere Melamines GmbH, Alt Fechenheim 34, D-60386 Frankfurt am Main, Tel.: +49 69 4109 2319

® registered trade mark
Issue: July 2019, replaces June 2011

Příloha 2: Duncanův test mnohonásobného porovnání pro WPG

$\sigma^2 = 26,927$ sv = 171	DUB 40 %	DUB 70 %	BUK ref	BUK 40 %	BUK 70 %	BŘÍZA ref	BŘÍZA 40 %	BŘÍZA 70 %
DUB ref	0,0000	0,0029	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
DUB 40 %		0,1006	0,0000	0,1102	0,0000	0,0000	0,0062	0,0055
DUB 70 %			0,0040	0,0017	0,0000	0,0051	0,0000	0,0000
BUK ref				0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
BUK 40 %					0,0000	0,0000	0,2114	0,2015
BUK 70 %						0,0000	0,0000	0,0000
BŘÍZA ref							0,0000	0,0000
BŘÍZA 40 %								0,9126

červeně jsou zvýrazněny hodnoty hladiny významnosti $p < 0,05$

*σ^2 – rozptyl,
sv – stupně volnosti*

Příloha 3: Duncanův test mnohonásobného porovnání pro hustotu

$\sigma^2 = 2446,8$ sv = 171	DUB 40 %	DUB 70 %	BUK ref	BUK 40 %	BUK 70 %	BŘÍZA ref	BŘÍZA 40 %	BŘÍZA 70 %
DUB ref	0,0004	0,0479	0,0084	0,0000	0,0000	0,1756	0,0000	0,0012
DUB 40 %		0,1073	0,3491	0,0000	0,0000	0,0000	0,3475	0,7428
DUB 70 %			0,4427	0,0000	0,0000	0,0012	0,0135	0,1755
BUK ref				0,0000	0,0000	0,0001	0,0760	0,5011
BUK 40 %					0,0000	0,0000	0,0001	0,0000
BUK 70 %						0,0000	0,0000	0,0000
BŘÍZA ref							0,0000	0,0000
BŘÍZA 40 %								0,2342

červeně jsou zvýrazněny hodnoty hladiny významnosti $p < 0,05$

*σ^2 – rozptyl,
sv – stupně volnosti*

Příloha 4: Duncanův test mnohonásobného porovnání pro rovnovážnou vlhkost

$\sigma^2 = 57241$ sv = 171	DUB 40 %	DUB 70 %	BUK ref	BUK 40 %	BUK 70 %	BŘÍZA ref	BŘÍZA 40 %	BŘÍZA 70 %
DUB ref	0,0017	0,4468	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
DUB 40 %		0,0130	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
DUB 70 %			0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
BUK ref				0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
BUK 40 %					0,0000	0,0050	0,0000	0,0000
BUK 70 %						0,0232	0,0149	0,0000
BŘÍZA ref							0,0000	0,0000
BŘÍZA 40 %								0,0676

červeně jsou zvýrazněny hodnoty hladiny významnosti $p < 0,05$

*σ^2 – rozptyl,
sv – stupně volnosti*

Příloha 5: Duncanův test mnohonásobného porovnání pro vlhkost po máčení

$\sigma^2 = 14,608$ sv = 171	DUB 40 %	DUB 70 %	BUK ref	BUK 40 %	BUK 70 %	BŘÍZA ref	BŘÍZA 40 %	BŘÍZA 70 %
DUB ref	0,0000	0,0000	0,0000	0,2332	0,0340	0,0009	0,0000	0,0000
DUB 40 %		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,7985	0,0016
DUB 70 %			0,0000	0,0000	0,0000	0,2733	0,0000	0,0011
BUK ref				0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
BUK 40 %					0,3011	0,0000	0,0000	0,0000
BUK 70 %						0,0000	0,0000	0,0000
BŘÍZA ref							0,0000	0,0000
BŘÍZA 40 %								0,0009

červeně jsou zvýrazněny hodnoty hladiny významnosti $p < 0,05$

*σ^2 – rozptyl,
sv – stupně volnosti*

Příloha 6: Duncanův test mnohonásobného porovnání pro radiální bobtnání

$\sigma^2 = 0,3824$ sv = 171	DUB 40 %	DUB 70 %	BUK ref	BUK 40 %	BUK 70 %	BŘÍZA ref	BŘÍZA 40 %	BŘÍZA 70 %
DUB ref	0,0000	0,0251	0,0000	0,0099	0,1093	0,0000	0,0000	0,0000
DUB 40 %		0,0364	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
DUB 70 %			0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000
BUK ref				0,0000	0,0000	0,0000	0,0171	0,0002
BUK 40 %					0,2781	0,0000	0,0000	0,0000
BUK 70 %						0,0000	0,0000	0,0000
BŘÍZA ref							0,0000	0,0005
BŘÍZA 40 %								0,1458

červeně jsou zvýrazněny hodnoty hladiny významnosti $p < 0,05$

*σ^2 – rozptyl,
sv – stupně volnosti*

Příloha 7: Duncanův test mnohonásobného porovnání pro tangenciální bobtnání

$\sigma^2 = 0,8168$ sv = 171	DUB 40 %	DUB 70 %	BUK ref	BUK 40 %	BUK 70 %	BŘÍZA ref	BŘÍZA 40 %	BŘÍZA 70 %
DUB ref	0,0001	0,1030	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,0000
DUB 40 %		0,0126	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
DUB 70 %			0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
BUK ref				0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
BUK 40 %					0,3107	0,0000	0,1084	0,6964
BUK 70 %						0,0000	0,0122	0,4887
BŘÍZA ref							0,0000	0,0000
BŘÍZA 40 %								0,0583

červeně jsou zvýrazněny hodnoty hladiny významnosti $p < 0,05$

*σ^2 – rozptyl,
sv – stupně volnosti*

Příloha 8: Duncanův test mnohonásobného porovnání pro objemové bobtnání

$\sigma^2 = 1,3027$ sv = 171	DUB 40 %	DUB 70 %	BUK ref	BUK 40 %	BUK 70 %	BŘÍZA ref	BŘÍZA 40 %	BŘÍZA 70 %
DUB ref	0,0000	0,0074	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
DUB 40 %		0,0043	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
DUB 70 %			0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
BUK ref				0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
BUK 40 %					0,6764	0,0000	0,0001	0,0000
BUK 70 %						0,0000	0,0003	0,0000
BŘÍZA ref							0,0000	0,0000
BŘÍZA 40 %								0,0570

červeně jsou zvýrazněny hodnoty hladiny významnosti $p < 0,05$

*σ^2 – rozptyl,
sv – stupně volnosti*

*Příloha 9: Duncanův test mnohonásobného porovnání pro barvenou odchylku ΔE^**

$\sigma^2 = 4,6653$ sv = 171	DUB 40 %	DUB 70 %	BUK ref	BUK 40 %	BUK 70 %	BŘÍZA ref	BŘÍZA 40 %	BŘÍZA 70 %
DUB ref	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
DUB 40 %		0,0000	0,0000	0,0007	0,0000	0,0000	0,0648	0,0000
DUB 70 %			0,0000	0,0000	0,1612	0,0000	0,0000	0,2497
BUK ref				0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000
BUK 40 %					0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
BUK 70 %						0,0000	0,0000	0,0145
BŘÍZA ref							0,0000	0,0000
BŘÍZA 40 %								0,0000

červeně jsou zvýrazněny hodnoty hladiny významnosti $p < 0,05$

*σ^2 – rozptyl,
sv – stupně volnosti*

Příloha 10: Duncanův test mnohonásobného porovnání pro tvrdost H_B

$\sigma^2 = 27,810$ sv = 171	DUB 40 %	DUB 70 %	BUK ref	BUK 40 %	BUK 70 %	BŘÍZA ref	BŘÍZA 40 %	BŘÍZA 70 %
DUB ref	0,0000	0,0000	0,1834	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
DUB 40 %		0,0037	0,0000	0,8330	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
DUB 70 %			0,0000	0,0052	0,0000	0,0000	0,0000	0,3239
BUK ref				0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
BUK 40 %					0,0000	0,0000	0,0000	0,0002
BUK 70 %						0,0000	0,0000	0,0000
BŘÍZA ref							0,0000	0,0000
BŘÍZA 40 %								0,0000

červeně jsou zvýrazněny hodnoty hladiny významnosti $p < 0,05$

*σ^2 – rozptyl,
sv – stupně volnosti*