

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2023

Bc. Dominik Sládek

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ
KATEDRA ZPRACOVÁNÍ DŘEVA A BIOMATERIÁLŮ

VLIV MODIFIKACE LEPIDEL TERMOSETY NA OHYBOVÉ
VLASTNOSTI VRSTVENÉHO DŘEVA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: BC. DOMINIK SLÁDEK
VEDOUCÍ PRÁCE: ING. ADAM SIKORA PH.D.

2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Dominik Sládek

Dřevařské inženýrství

Název práce

Vliv modifikace lepidel termosety na ohybové vlastnosti vrstveného dřeva

Název anglicky

Influence of thermoset adhesive modification on bending properties of laminated wood

Cíle práce

Cílem práce bude analýza vlivu modifikace vybraných lepidel termosety na ohybové vlastnosti vrstveného dřeva. Lamely ve skladbě vrstveného materiálu budou z bukového, dubového a akátového dřeva a pro jejich vzájemné spojení budou použity vybrané druhy PUR lepidel. V práci bude řešeno několik druhů aplikace termosetů, za účelem zlepšení vlastností lepené spáry ve skladbě vrstveného materiálu a také bude řešeno různé opracování povrchu jednotlivých lamel. Na základě statistického vyhodnocení budou stanoveny významnosti jednotlivých sledovaných faktorů.

Metodika

1. Literární rozbor problematiky lepení ve vztahu k rozdílné struktuře dřeva a dopad této problematiky na výsledné ohybové namáhání vrstvené dřeva.
2. Navržení metodiky a testování.
3. Experimentální zjištění vlivu vybraných faktorů na sledované ohybové charakteristiky.
4. Statistické vyhodnocení.
5. Práci čleňte do standardních kapitol – úvod, literární rozbor, cíl práce, materiál a metodika, výsledky, diskuse, závěr, použitá literatura a souhrn.

Harmonogram práce:

1. Koncepční řešení práce (říjen 2022).
2. Analýza problematiky s důrazem na téma práce (listopad 2022).
3. Metodika práce (listopad 2022).
4. Měření a vyhodnocení (prosinec 2022).
5. Výsledky a diskuse (leden 2023).
6. Závěr (březen 2023).

Doporučený rozsah práce

60 – 70 stran

Klíčová slova

Adheziva, Vrstvené dřevo, Ohybové vlastnosti, Termosety

Doporučené zdroje informací

- Babiak, M., Gaff, M., Sikora, A., a Hýsek, Š. (2018). „Modulus of elasticity in three-and four-point bending of wood,“ *Composite Structures*, 204(15). DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.113
- Biszczyński, A., Talaśka, K., a Wilczyński, D. (2022). „Analysis of the adhesive spread and the thickness of the adhesive bonded joint depending on the compressive force applied to bonded materials with different surface structure,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 114. ISSN 0143-7496
- Bodig, J., a Jayne, B. A. (1982). „Mechanics of Wood and Wood Composites,“ Van Nostrand-Reinhold CO, Inc., New York, pp. 712. ISBN: 0-89464-777-6
- Bucur, V. (2014). „Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites,“ Springer, pp. 401. ISBN: 9400789726
- Frese, H., a Blaß. (2006). „Characteristic bending strength of beech glulam,“ *Material and Structures*, 40(1). DOI: 10.1617/s11527-006-9117-9
- Moghadamzadeh, H., Rahimi, H., Asadollahzadeh, M., a Hemmati, A.R. (2011). „Surface treatment of wood polymer composites for adhesive bonding,“ *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(8), ISSN 0143-7496
- Pizzi, A. (1989). „Wood Adhesives: Chemistry and Technology,“ Marcel Dekker Inc., New York, ISBN 0-8247-8052-3.
- Shukla, S. R., a Kamdem, P. (2008). „Properties of laminated veneer lumber (LVL) made with low density hardwood species: Effect of the pressure duration,“ *Holz als Roh- und Werkstoff* 66(2), 119-127. DOI: 10.1007/s00107-007-0209-1
- Vasiliev, V. V., a Morozov, E. V. (2018). „Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures,“ 4th Ed., Elsevier, 75-189. ISBN: 9780081022092.
-

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Adam Sikora, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Přemysl Šedivka, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 11. 7. 2022

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 31. 8. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 25. 09. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Vliv modifikace lepidel termosety na ohybové vlastnosti vrstveného dřeva“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Adama Sikory, Ph.D. a, použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 5. 4. 2023

Bc. Dominik Sládek

Poděkování

Rád bych zde poděkoval Ing. Adamovi Sikorovi, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a zpracování této práce. Dále děkuji Ing. Tomáši Holečkovi za zajištění zkušebních těles, pomoc s modifikací a rady při měření.

Abstrakt ve státním jazyce

Téma závěrečné práce se zabývá problematikou lepení dřevin, které jsou charakteristické tím, že se obtížně lepí. Pro tuto práci bylo použito dřevo dubu, buku a akátu. Lepené nosníky byly vystaveny ohybovému statickému a dynamickému namáhání pro vyhodnocení vlivu aplikace termosetů do adhezivního systému. Částice termosetů by měly podpořit a zvýšit pevnost adhezivního systému. Byly provedeny dvě varianty lepení, a to referenční pouze s použitím jednosložkového PUR lepidla typu Kestopur 1030. Druhou metodou bylo lepení využívající kombinaci jednosložkového PUR lepidla stejného typu Kestopur 1030, hloubkové penetrace typu DEKPRIMER NANO a částice termosetu na bázi epoxyfenolických pryskyřic s velikostí frakce 1-60 nm. Adheze lepidla k lepenému povrchu se významně odvíjí od stupně opracování povrchu, proto v práci byla řešena tato problematika. Byly použity dva rozdílné typy opracování, a to broušení o zrnitosti brusného papíru 120 s úběrem 0,1 mm a frézování s frézovací hlavou se čtyřmi noži s úběrem 0,2 mm. Na základě provedené FTIR analýzy, nově vytvořený adhezivní systém vytváří hydrofobní lepenou spáru. Z tohoto důvodu byly zkušební soubory testovány při rozdílných vlhkostních stavech. První vlhkostní stav byl, že vzorky byly klimatizovány na 12 % vlhkosti. Druhý stav byl za zvýšené vlhkosti v rozmezí 15–21 %. V rámci analýzy vlivu sledovaných faktorů na statické ohybové vlastnosti byly řešeny standardní charakteristiky trojbodového ohybu jako je modul pružnosti, mez úměrnosti a mez pevnosti. Dynamické ohybové namáhání bylo vyhodnocováno na základě rázové zkoušky pomocí Charpyho kladiva. Zvolené zkoušky by měly prokázat, jestli bude docházet při zvýšené vlhkosti ke komplexnějšímu namáhání adhezivního systému. Dále zlepšení adheze lepidla na lepený povrch po opracování a následného přidání termosetu s hloubkovou penetrací.

Klíčová slova: adheziva, lepené vrstvené dřevo, pevnost v ohybu, dub, buk, akát, opracování povrchu, hloubková penetrace

Abstrakt v cizím jazyce

The topic of the final thesis deals with the problem of gluing wood species that are characterized by the fact that they are difficult to glue. The wood used for this work was oak, beech and acacia. The glued beams were subjected to bending static and dynamic stresses to evaluate the effect of applying thermosets to the adhesive system. The thermoset particles should support and increase the strength of the adhesive system. Two adhesive bonding options were carried out, namely the reference only using a single component PUR adhesive such as Kestopur 1030. The second method was bonding using a combination of a single component PUR adhesive of the same type Kestopur 1030, a DEKPRIMER NANO type deep penetration and epoxy-phenolic resin based thermoset particles with a fraction size of 1-60 nm. The adhesion of the adhesive to the bonded surface is significantly dependent on the degree of surface treatment, therefore this issue was addressed in this work. Two different types of machining were used, namely 120 grit sandpaper grinding with 0.1 mm removal and milling with a four-knife milling head with 0.2 mm removal. Based on FTIR analysis, the newly developed adhesive system produces a hydrophobic bonded joint. For this reason, the test sets were tested at different moisture conditions. The first humidity condition was that the samples were conditioned to 12% humidity. The second condition was under elevated humidity ranging from 15-21%. The standard three-point bending characteristics such as modulus of elasticity, proportionality limit and ultimate strength were addressed in the analysis of the effect of the studied factors on the static bending properties. The dynamic bending stresses were evaluated based on the Charpy hammer impact test. The chosen tests should demonstrate if more complex stresses will occur in the adhesive system at elevated humidity. Furthermore, the improvement of adhesion of the adhesive to the bonded surface after machining and subsequent addition of a thermoset with deep penetration.

Keywords: adhesives, glued laminated timber, bending properties, oak, beech, acacia, surface treatment, deep penetration

Cíle práce

Cílem této diplomové práce je na základě experimentálního měření statickým a dynamickým ohybem podle příslušných norem ověřit hypotézu, vlivu modifikace adhezivního systému termosetickými nanočásticemi. Modifikovaný adhezivní systém byl na bázi polyuretanového jednosložkového lepidla. Tohoto hlavního cíle bude dosaženo skrz dílčí cíle, které lze shrnout ve čtyřech následujících bodech:

1. Analýza různých druhů dřevin ve skladbě pětivrstvého lepeného materiálu a jejich dopad na statické a dynamické vlastnosti. Lepených komponentů lepených modifikovaným adhezivním systémem na základě polyuretanového jednosložkového adheziva a termosetických nanočástic.
2. Analýza různých stupňů opracování a jejich dopad na zvolené charakteristiky při ohybovém zatížení lepených komponentů lepených modifikovaným adhezivním systémem na základě polyuretanového jednosložkového adheziva a termosetických nanočástic.
3. Analýza rozdílných vlhkostních stavů lepených prvků lepených pomocí modifikovaného adhezivního systému a jejich dopad na ohybové vlastnosti.
4. Analýza vzájemných interakcí druhů dřeva, stupňů opracování a rozdílných vlhkostních stavů na ohybové vlastnosti lepených komponentů lepených pomocí modifikovaného adhezivního systému.

Obsah

Cíle práce	8
Obsah	9
Seznam ilustrací	11
Seznam tabulek	12
Seznam příloh	13
1 Úvod	14
2 Charakteristika použitých dřevin	16
2.1 Akát (<i>Robinia pseudoacacia</i>).....	16
2.2 Dub (<i>Quercus robur</i>).....	17
2.3 Buk (<i>Fagus sylvatica</i>).....	18
3 Strukturální hladiny dřeva	19
3.1 Chemická strukturální hladina dřeva.....	19
3.1.1 Elementární složení dřeva.....	19
3.1.2 Celulóza	20
3.1.3 Hemicelulózy	21
3.1.4 Lignin.....	22
3.1.5 Doprovodné látky organického původu.....	22
3.2 Sub-mikroskopická hladina	25
3.3 Mikroskopická strukturální hladina dřeva.....	26
3.3.1 Mikroskopická hladina listnatých dřevin.....	26
3.4 Makroskopická strukturální hladina dřeva	27
4 Vrstvené lepené dřevo	29
4.1 Charakteristika lepeného vrstveného dřeva.....	30
4.1.1 Výhody lepeného vrstveného dřeva.....	31
4.1.2 Nevýhody lepeného vrstveného dřeva	32
5 Adheziva a problematika lepení	33
5.1 Teorie lepení.....	33
5.1.1 Tlak při lisování	34
5.2 Adheze	34
5.2.1 Mechanická adheze	35
5.2.2 Chemická adheze	36
5.3 Smáčivost	37

5.4	Koheze	38
5.5	Zlepšení vlastností lepené spáry	39
5.5.1	Povrchová úprava.....	39
5.5.2	Další možnosti zvyšování adheze	40
5.5.3	Aditiva do adhezivního systému.....	41
5.6	Polyuretanová lepidla	41
6	Mechanické vlastnosti lepeného vrstveného dřeva	43
6.1	Statická zkouška v ohybu	43
6.2	Dynamická zkouška v ohybu.....	46
6.2.1	Druhy vzniklých lomů	46
6.2.2	Dynamická zkouška v ohybu dle Charpyho	47
7	Metodika diplomové práce	49
7.1	Komponenty pro výrobu.....	49
7.1.1	Lamely	49
7.1.2	Termosety a penetrace	49
7.1.3	Polyuretanové lepidlo	50
7.2	Výroba zkušebních těles.....	51
7.3	Měření vzorků	53
7.4	Zkouška Rázové houževnatosti	54
7.5	Zkouška statickým ohybem.....	55
7.6	Vyhodnocení dat ve statistice.....	58
8	Výsledky a diskuse	59
9	Závěr.....	66
10	Seznam použité literatury.....	67
	Přílohy.....	72

Seznam ilustrací

Obrázek 1 Dřevo akátu (Bevedo.cz 2023).....	16
Obrázek 2 Dřevo dubu (Nabytekdusek.cz 2023).....	17
Obrázek 3 Dřevo buku (Nabytekdusek.cz 2023).....	18
Obrázek 4 Celulóza (Pančík 2023)	20
Obrázek 5 Hemicelulóza (orgpad.com 2023).....	21
Obrázek 6 Lignin (Vieira, FR et al. 2022).....	22
Obrázek 7 Základní vzorec tříslavin (Wikiskripta.eu 2023)	24
Obrázek 8 Mikroskopická hladina listnatých dřevin (Mezistromy.cz 2023).....	27
Obrázek 9 Model mostu z lepeného lamelového dřeva (Kuklík 2015)	29
Obrázek 10 Druhy adhezí (vlastní tvorba).....	35
Obrázek 11 Adheze a koheze (Shingley 2010).....	35
Obrázek 12 Mechanická adheze (Bednařík 2011)	36
Obrázek 13 Chemická adheze (abclepidla.cz 2023).....	37
Obrázek 14 Uspořádání zmíněných napětí v nosníku (Babiak et al. 2018).....	43
Obrázek 15 Graf Hookova zákona pro materiály ze dřeva (Požgaj <i>et al.</i> 1993) ...	45
Obrázek 16 Uložení vzorku do Charpyho kladiva (Melzer 2017).....	48
Obrázek 17 a) Nano penetrace, b) termosety ve formě prášku.....	50
Obrázek 18 Technický list lepidla (Lepidla-eshop.cz, 2023)	50
Obrázek 20 Normované vzorky 20x20x300 mm (vlastní tvorba)	51
Obrázek 21 Výroba lamel (vlastní tvorba)	52
Obrázek 22 Kódování vzorků (vlastní tvorba)	53
Obrázek 23 Měření vzorků (vlastní tvorba).....	54
Obrázek 24 Charpyho kladivo (vlastní tvorba).....	55
Obrázek 25 Zkouška pevnosti v ohybu na stroji TIR (vlastní tvorba).....	57
Obrázek 26 Analýza vlivu termosetů na pevnost v ohybu	60
Obrázek 27 Změna modulu pružnosti u klimatizovaných vzorků	61
Obrázek 28 Analýza vlivu termosetů na mez úměrnosti	63
Obrázek 29 Analýza vlivu termosetů na rázovou houževnatost.....	64
Obrázek 30 Analýza vlivu termosetů na rázovou houževnatost.....	65

Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení dřeva (Blažej et al. 1975)	19
Tab. 2 Pevnostní třídění vrstveného dřeva (ČSN EN 14080–2013, Sikora 2021)	31

Seznam příloh

Příloha 1 Duncanův test pevnosti v ohybu [MPa] (klimatizované).....	72
Příloha 2 Duncanův test FP [N] (klimatizované).....	72
Příloha 3 Duncanův test FE [N] (klimatizované)	73
Příloha 4 Duncanův test YP [mm] (klimatizované).....	73
Příloha 5 Duncanův test YE [mm] (klimatizované)	74
Příloha 6 Duncanův test pevnosti v ohybu [MPa] (máčené)	74
Příloha 7 Duncanův test LOP [MPa] (máčené)	75
Příloha 8 Duncanův test MOE [MPa] (máčené).....	75
Příloha 9 Duncanův test FP [N] (máčené)	76
Příloha 10 Duncanův test FE [N] (máčené).....	76
Příloha 11 Duncanův test YP [mm] (máčené)	77
Příloha 12 Duncanův test YE [mm] (máčené).....	77
Příloha 13 Duncanův test W (klimatizovaný).....	78
Příloha 14 Duncanův test IBS (klimatizovaný)	78
Příloha 15 Duncanův test W (Máčené).....	79
Příloha 16 Duncanův test IBS (Máčené)	79

1 Úvod

Diplomová práce řeší problematiku na téma, vliv modifikace lepidel termosety na ohybové vlastnosti vrstveného dřeva. Princip vrstvení dřeva je výroba několika vrstev lepených na sebe pro zlepšení vybraných vlastností. Pro tuto práci byly zvoleny tři druhy dřevin a to dub, buk, akát z důvodu velkého procenta extraktivních látek ve dřevě. To má za následek špatnou přilnavost lepidla na povrch a tím zhoršení mechanických vlastností lepeného spoje. Celá tato problematika vychází ze strukturálních hladin dřeva. Tato problematika se bude chtít zamezit různými druhy opracování povrchu lamel a přidáním tepelně vytvrzovaných termosetů ve formě rozemletého prášku, jako modifikace lepidla. Práce je rozdělena na dvě části, a to na teoretickou a praktickou.

Z historie se dřevo již od starověku používalo na konstrukční účely Nejčastěji se ze dřeva vyrábějí nosné stěny, stropy a střešní konstrukce, dále i v interiéru se dřevo stále více využívá na výrobu nábytku a dalších komponentů. Vrstvené dřevo jako takové se začalo používat již na začátku minulém století a čím dál více začíná být oblíbené pro použití na konstrukční účely

Tento celý proces využití vrstvení dřeva v této práci má zásadní využití ve stavebnictví pro nosné prvky, a i pro výrobu v interiéru například úložného nebo sedacího nábytku (Glos *et al.* 2004). V dnešní době materiály, které se používají ve dřevozpracujícím průmyslu dále zušlechťují postupnými změnami. (Zemiar *et al.* 1999, Sandberg *et al.* 2018, Sikora 2021). Materiály na bázi vrstveného lamelové dřeva, lze určitými způsoby modifikovat. Nejběžnější modifikací je opracování povrchu jednotlivých lamel a přidáním různých druhů aditiv pro zlepšení přilnavosti povrchu při procesu lepení. (Nelson 1997, Gašparík *et al.* 2016). Zvýšený mechanických vlastností dřeva například pevnost a tuhost dosáhneme přidáním nedřevěných komponentů různých druhů, složení a v případě této práce přidáním termosetů do PUR lepidla. (Dai 2006, Parvez 2009).

V práci je řešena problematika rázové houževnatosti s trojbodovým statickým ohybem. Z důvodu toho, že namáhání konstrukčních prvků ohybem je jedním z nejběžnějších způsobů namáhání. Tuto problematiku nejvíce ovlivňují faktory, jako je druh dřeva, způsob opracování lamel, přidáním aditiv do adhezivního systému, výběr správného lepidla a modifikování lepidla (Ellis a Steiner 2002, Yoshihara a Itoh 2003, Wang a Cooper 2005, Frese a Blaß 2006, Sikora 2021).

Vrstvené lamely jsou ve většině případů spojovány pomocí lepidla, v této práci bylo

vybrané PUR lepidlo, již zmíněné výše. Musí se brát v potaz při lepení dřeva i struktura dřeva. Pro kvalitní lepený spoj s kvalitní adhezí lepidla ke dřevu a druhému materiálu, dostačující soudržnost a houževnatost naneseného lepidla se vyžaduje čistý povrch, správně vysušené lamely a mechanicky opracované dřevo. Zvýšení kvality lepeného spoje a pevnosti spoje je hlavním cílem pro lepení dřeva (Sedliačik 2003).

Tato práce poskytne podklady pro zlepšení využití obtížně lepených dřevin do vrstvených materiálů pomocí modifikace adhezivního systému. Výhodou zvolené modifikace pomocí termosetů je jednoduchost a ekonomická náročnost. Možnosti využití takto lepených nosníků bylo ověřeno běžně používanými experimentálními zkouškami na rázovou houževnatost a trojbodovým statickým ohybem, a to podle platných norem. Výsledky prokazují statisticky významný vliv této modifikace adhezivního systému na zvolené mechanické vlastnosti.

2 Charakteristika použitých dřevin

2.1 Akát (*Robinia pseudoacacia*)

Dřevo akátu se rozděluje na jádro a běl. Běl je zabarvena do žlutohnědé a někdy přechází až do barvy žlutobílé, podle lokace, kde se strom vyskytuje. Jádro dřeva má odlišnou barvu, než běl, největší zastoupení má žlutá barva, ale může být i žlutohnědá. Na příčném směru jde dobře pouhým okem rozeznat rozdělení letokruhů a hranice mezi jarním a letním dřevem. Akát a jeho makroskopická stavba se řadí do skupiny dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva. Na pomezí tangenciálního a radiálního směru u akátu jsou dobře rozpoznatelné hluboké rýhy, které se tvoří především v letním dřevě. Příčný řez je charakteristický pro výskyt velkých makropórů. Ze skupiny dalších makroskopických znaků jsou u akátu dobře viditelné tečky především v letním dřevě. Jako u dubu a buku, také akát disponuje v radiálním směru zrcátky, která jsou tvořené dřevnými paprsky. Dřevo akátu jako takové u nás je řazeno do skupiny nejtvrděších a nejtěžších dřevin (akela.mendelu.cz, Cierjacks *et al.* 2013).

Největší přednosti akátu jsou jeho dobré mechanické vlastnosti, srovnatelné se dřevem dubu. Jsou to vlastnosti jako pevnost, pevnost v ohybu, houževnatost vysoká hustota a hmotnost a také hlavně extrémní trvanlivost dřeva. V suchých podmínkách se trvanlivost udává 1500 let. Ponořené ve vodě až 500 let. To akát posouvá na první příčky v trvanlivosti dřeva, a proto se v dnešní době stále více používá na venkovní stavby, například terasy, pergoly, v bednářství na výrobu sudů, ale také konstrukční stavby, jako mosty a mola (Kuneš *et al.* 2019).

Strom může dorůst do výšky až 30 metrů a jeho tloušťka se udává v rozmezí od 30–76 cm. U všech dalších druhů rostlin z čeledi bobovitých, tak i Trnovník akát má na kořenech obsažené nitrogenní bakterie. Dále strom disponuje velkou koncentrací flavonoidů, které mají za účel chránit dřevo, které vyrůstá do země (Slavík, 1995, Fér, 1994).



Obrázek 1 Dřevo akátu (Bevedo.cz 2023)

2.2 Dub (*Quercus robur*)

Základní charakteristiky pro dřevo dubu jsou, úzká běl, která má žlutohnědou barvu a jádro, které je zbarveno do tmavě hnědé barvy. Jedny z hlavních znaků pro dřevo dubu jsou znaky pouhým okem dobře rozpoznatelné letokruhy s hranicí, kde se rozděluje jarní a letní dřevo všechny tyto znaky jsou obsažené na příčném řezu. V jarním dřevě se vyskytují velké makropóry spolu s lumeny buněk. Rozdíl mezi jarním a letním dřevem je, že letní dřevo má více zastoupené mikrocévy, které mají tendenci se spojovat a vytvářet takzvané žíhání na povrchu dřeva. Pro dřevo dubu je tento makroskopický znak typický. Zrcátka, které jsou nejvíce obsažená v radiálním směru. Tento znak je také velmi typický pro dřevo dubu. Popisovaný znak se vytváří za pomoci pravých a nepravých dřevných paprsků. Ve velké míře jsou zrcátka obsažena v radiálním směru, to má za následek, že jsou dobře zpozorovatelné i pouhým okem. Dub je zařazen do kategorie kruhovitě pórovitých dřeviny. Je to jeden z důvodů, že samotné dřevo dubu nemá hladký povrch, jako například u dřeva jiných listnatých stromů. Na dřevě jsou dobře zvýrazněné znaky jako rýhování, které se nachází pouze v běli stromu, a to v radiálním a tangenciálním směru dřeva. Na příčném řezu dřevo dubu má znaky jako hluboké vpichy nebo dírky (Wagenführ 2002, Šlezingerová *et al.* 2004).

Nejpoužívanější a nejvýznamnější fyzikální a mechanické vlastnosti jsou u dubu jeho pevnost, tvrdost, vysoká hmotnost, hustota a dobrá trvanlivost. Na vzduchu dřevo dubu dokáže vydržet přes 700 let, při použití ve vodě je jeho potenciál takřka neomezený a dokáže vydržet navěky. Také má sám od sebe dobrou požární odolnost, při použití impregnace, nebo retardérů hoření se dub stává skoro nehořlavým v porovnání s ostatními dřevinami. Dub má největší využití ve stavebnictví, nejvíce při stavbách mostů, konstrukcí, které jsou ve vodě a v malé míře na střešní konstrukce. Z důvodu vysoké ceny je jeho potenciál dost omezený. (Kohout 1996, Adámek *et al.* 2004).



Obrázek 2 Dřevo dubu (Nabytekdusek.cz 2023)

2.3 Buk (*Fagus sylvatica*)

Mezi jedno z hlavních rozdělení a charakteristik pro buk je, že dřevo patří mezi listnaté, tvrdé a těžké dřeviny. Podle makroskopické struktury se řadí mezi dřeviny, které mají roztroušeně pórovitou strukturu. Nejzákladnější makroskopický znak dubu je dobře rozpoznatelné přechody mezi jarním a letním dřevem. Jarní dřevo, které se jednoduše pozná, protože má světlejší barvu pomalu směrem ke dřeni tmavne a přechází do letního dřeva. Ve struktuře dřeva není rozlišeno, kde se nachází běl a kde jádro neboli běl s vyžralým jádrem. Nejčastější vada u dřeva buku je vytvoření nepravého jádra, které narušuje barevnou strukturu dřeva a barva se mění na šedou až hnědou. Jeden z důležitých makroskopických znaků, který je pro bukové dřevo typický jsou velké dřevné paprsky. V radiální směru jsou okem rozpoznatelné, jako velká zrcátka. Jsou velmi hojně rozesety po celém směru dřeva. Na příčném směru jsou viděny pouze tmavé čárky, které jsou různých velikostí a tloušťky. U tangenciálního řezu jsou nejméně rozpoznatelné, pouze dlouhé tmavé pásy na příčném řezu. Velikostně se pohybují v rozmezí od 1-5 mm. Bukové dřevo se v naší zemi řadí do skupiny těžkých a středně tvrdých dřevin (akela.mendelu.cz, Chovanec, 1977).

Strom může dosahovat výšky až 35 m, průměrná výška se pohybuje okolo 20 m. Dřevo buku se zařazuje do skupiny dřevin, které jsou tvrdé a těžké. Struktura dřeva má z velké části rovnoměrnou hustotu. Významnou předností buku je jeho dobrá štípatelnost. Nevýhodou pro širší používání je jeho špatná pružnost, v určitých momentech dřevo buku praská. Pro svoji kvalitu a barvu dřeva buk patří mezi nejvíce významná hospodářská dřeva. Dřevo se používá na konstrukční účely, výrobu dých, překližek, aglomerovaných materiálů jako DTD, DVD desky, a především na výrobu nábytku z důvodu dobré ohýbatelnosti pomocí plastifikace (Hrabák *et al.* 2015)



Obrázek 3 Dřevo buku (Nabytekusek.cz 2023)

3 Strukturální hladiny dřeva

3.1 Chemická strukturální hladina dřeva

Ve dřevě je složitý soubor látek, ze kterých jsou nejvíce zastoupeny biopolymery. Jejich základní rozdělení podle chemického složení je na hlavní složky ve dřevě a doprovodné. Obsažení hlavních složek ve dřevě dosahuje až na 97 %, doprovodné složky můžou dosahovat maximálně jen do 10 %. Hlavní složky ve dřevě jsou Celulóza zastoupená (35–55 %), Hemicelulózy zastoupené (20–35 %) a lignin, který je zastoupený (15–36 %) Doprovodné složky ve dřevě se rozdělují do dvou skupin, a to anorganická složka a organická složka (Požgaj *et al.* 1997, Kuklík, 2005, Adámek *et al.* 2004, Holčák 2017).

Organická složka dřeva je zastoupena v podílu kolem 1-3 % u domácích dřevin a u tropických může dosahovat až k 15 %. Jedná se o vápenaté, draselné a hořečnaté soli. Anorganická složka dřeva se vyskytuje v menším množství než organická, pouze 0,1-0,5 % u domácích dřevin, 5 % u tropických a jsou nejrůznější vosky, terpeny, steroly, pektiny a tuky (Kuklík, 2005, Adámek *et al.* 2004).

Tab. 1 Chemické složení dřeva (Blažej et al. 1975)

Chemické zloženie niektorých domácich drevin (BLAŽEJ a kolektív 1975)

Komponent	Smrek (<i>Picea abies</i> KARST. [%])	Borovica (<i>Pinus sylvestris</i> L.) [%]	Buk (<i>Fragus silvatica</i> L.) [%]
Celulóza	45,6	43,2	39,2
Hemicelulózy (Manán)	27,6 (16,0)	28,0 (12,5)	35,3 (1,5)
(Xylán)	(9,0)	(13,0)	(28,0)
Lignin	(26,9)	(26,6)	(20,9)

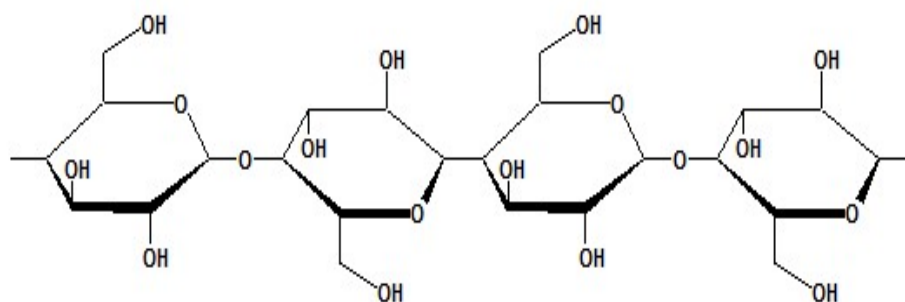
3.1.1 Elementární složení dřeva

Ve dřevě jsou dále zastoupeny základní prvky. Jejich množství jen nepatrně kolísá v rozdílu druhu dřeviny. Největší procentuální zastoupení ve dřevě má uhlík, ten se pohybuje okolo 49,5 %, dále kyslík 44,2 %, vodík 6,3 % a dusík 0,2 – 1,5 %, záleží na obsahu alkaloidů ve dřevě (Požgaj *et al.* 1997). Dále se ve dřevě vyskytuje i malé množství organických prvků. Při spalení dřeva jako jediný zůstávají v pevném skupenství – popel. Dřeviny na našem území mají podíl těchto prvků velmi malý. Největší množství

najdeme v bělí kmene, zato největší množství minerálních prvků obsahuje kůra a to až 7 %. Různé druhy dřevin mají zvýšený obsah křemíku ve dřevě, nejvíce tropické dřeviny, až 2 %. To má za následek rychlé otupování nástrojů na opracování dřeva (Čunderlík, 2009).

3.1.2 Celulóza

Jedná se o nerozvětvený opakující se homopolymer, který je složený ze složek celobiózy. Samotná celobióza se skládá ze dvou beta-D glukopyranózových jednotek, tyto jsou lineární a umístěny v polohách 1–4. Vedlejší jednotky s nimi sousedí, jsou otočené o 180°. Celulóza se procentuálně pohybuje v rozmezí od 43-52 % hmotnosti listnatých a jehličnatých stromů (Boerjan *et al.* 2003). Patří mezi hlavní strukturní složku a tvoří stěny dřeva. Celulózový řetězec vede přes amorfni i krystalická místa v samotné celulóze. Velikost jedné makromolekuly celulózy se pohybuje okolo 0,01 mm. Hlavní řetězce v mřížce celulózy drží pospolu vedlejší sekundární vodíkové vazby (Lynd *et al.* 2002). Hlavní dopadem tohoto sekundárního spojení je anizotropie pevnostních a pružnostních vlastností celého řetězce celulózy, dále se to odráží v celkovém anizotropním chování dřeva, nejvíce ve fyzikálních a mechanických vlastnostech. Krystaly celulózy se spojují vedlejšími silami, a to má za příčinu odolnost proti vodě a dalších organických rozpouštědel (Požgaj *et al.* 1997).



celulóza

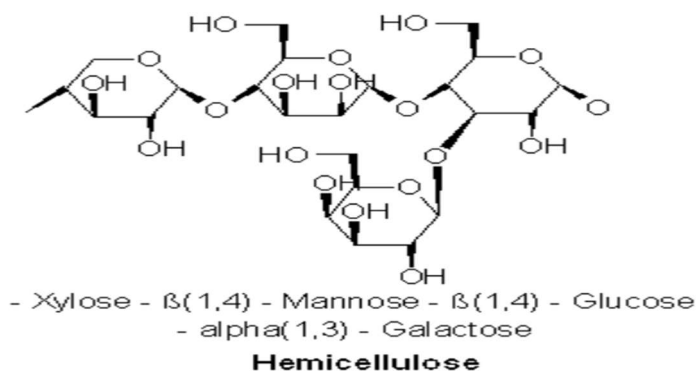
Obrázek 4 Celulóza (Pančík 2023)

Důležitým faktorem pro řetězec celulózy je délka. Čím delší řetězec tím se zvyšuje polymerační stupeň, a tak dřevo jako celek dostává větší pevnost. Celulóza má dobrou odolnost proti tahové síle, která působí na její řetězce. Pro zabezpečení tuhosti po délce řetězce, jsou využívány vodíkové vazby. Dokáží zpevnit řetězec natolik, že může snášet nárazy a předcházet místům, kde by se mohl vytvořit zlom. (Haigler, 1990).

Pevný podíl celulózy má krystalickou strukturu je ale méně zastoupená ve dřevě než ten amorfní. Oproti amorfní části má hlavní činnost a význam, při kontaktu s vodou i různými rozpouštědly. V krystalické části se molekuly pohybují pomaleji, a to je důvod proč má větší pevnost a odolnosti, proti vnějším vlivům, než amorfní část. Množství krystalické a amorfní části holocelulóz dává za následek míru pružnosti, bobtnání, lámavosti. Přímo s krystalickým poměrem je ve dřevě úzce spjatá i chemická odolnost, tažnost a soudržnost vláken (Požgaj *et al.* 1997).

3.1.3 Hemicelulózy

Druhou nejvýznamnější složkou buněčné stěny dřevin jsou hemicelulózy. Podílí se spolu s celulózou na strukturální opoře buňky. Ve dřevě je obsažena v rozmezí od 15 % do 35 %. Jedná se o heterogenní polymer, tím se výrazně liší od celulózy. Hemicelulózy jsou tvořeny převážně z pentózy (β -D-xylóza, α -L-arabinóza) a také hexózy (α -D-manóza, β -D-glukóza, α -D-galaktóza). Další složkou je kyselina uronová (α -D-glukuronová, α -D-4-O-methylgalakturonová a α -D-galakturonová) (Gírio *et al.* 2010). Rozdělení hemicelulózy záleží na množství obsažených monosacharidů, rozděluje se na: xylany, mannany, beta-glukany a xyloglukany. Nejzastoupenější a nejvýznamnější skupinou jsou xylany. U listnatých stromů mohou dosahovat až ke 30 % zastoupení v buněčné stěně (Ebringerová *et al.* 2005).



Obrázek 5 Hemicelulóza (orgpad.com 2023)

3.1.4 Lignin

Strukturu ligninu tvoří soubor vysokomolekulových polymerních látek, které jsou tvarované do prostoru. Hlavní souborem látek, ze kterých je lignin složen se nazývají fenypropány. Oproti celulóze a hemicelulóze nezapadá lignin do polysacharidů i když je tvořený z uhlíku, kyslíku a vodíku. Celková struktura ligninu je na fenolické bázi (Čunderlík, 2009). Všechny látky v ligninu obsahují p-kumarylu alkoholu, který postrádá ve svém vzorci-OCH₃ skupiny. Dále obsahuje sinapyl alkohol s dvěma aryl-OCH₃ a koniferyl alkohol s aryl-OCH₃, bez těchto obsažených látek by se lignin nikdy nedokázal vytvořit (Hendriks *et al.* 2009). Všechny zmíněné jednotky jsou mezi sebou propojené pomocí různých vazeb chemické struktury. Nejvíce se ve dřevě vyskytují tyto vazby: di-aryl propanová, beta-aryl etherová, di-aryl etherová, pinoresinolová, spirodienové a bifenylová (Mathews *et al.* 2015). Rozdíly v ligninu nastávají mezi jehličnatými a listnatými stromy, největší změna je ve strukturální stavbě. U jehličnatých stromů se v ligninu zvětší jedna metoxylová skupina na jednom fenolickém jádře. Ve skladbě listnatých stromů se změní dvě metoxylové skupiny. Z toho plyne, že jehličnaté dřevo má větší obsah ligninu ve dřevě, než listnaté (Bugg *et al.* 2011).



Obrázek 6 Lignin (Vieira, FR *et al.* 2022)

3.1.5 Doprovodné látky organického původu

V chemické strukturální hladině dřeva se nalézají i další složky sacharidů, a to pouze v malém množství, jedná se o pektiny, proteiny a škrob. V submikroskopické stavbě ve střední lamelle a membránách buněčných ztenčenin je obsaženo velké množství pektinových vazeb. Ve dřevě má velký potenciál a slouží jako pojivo (Rowell 2013,

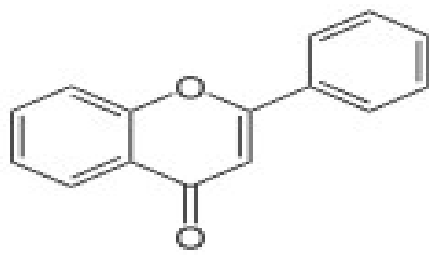
Holčák 2017). Velmi významná látka, která plní zásobní funkci pro dřevo je škrob. Složení škrobu ve dřevě je ze dvou polysacharidů, jedná se o amylopektin a amylosu (Gandelová *et al.* 2002, Holčák 2017). Polysacharidy, které mají heterogenní bázi, tak vyplňují mezibuněčné prostory a slouží jako přírodní adheziva ve dřevě. Pletivo, které má takový charakter, dokáže do určité meze zlepšovat mechanické vlastnosti, například tvrdost, plasticitu a elasticitu. Ty to již zmíněné schopnosti se nejvíce využívají v potravinářském průmyslu, na výrobu aditiv, ze kterých se dále vyrábí různé gely. Nejvíce jsou polyuronidy známy jako dřevní guma (Jankovský *et al.* 1999, Holčák 2017).

Skupina Izoprenoidů

Tato skupina obsahuje dvě základní složky, ze kterých se tvoří izoprenoidy, a to jsou terpenoidy a steroidy. Pro tuto práci je významná především skupina terpenoidů, která je obsažena ve dřevě jako extraktivní látky. Ze základní skupiny izoprenoidů vznikají pro tuto práci významné terpeny. Terpeny s nízkým stupněm jsou nejvíce zastoupené ve dřevěch, které mají měkkou strukturu. Tvrdé listnaté dřeviny mají vyšší stupeň výskytu a koncentrace takzvané vyšší terpeny (Barnett *et al.* 2003, Holčák 2017). Různé druhy terpenů mají potenciál pro výrobu přírodních éterických olejů nebo silic. Silice mají různé vlastnosti, například těkavost, když dojde ke smíchání s vodní párou a dále dobrá rozpustnost v látkách s lipoidním charakterem. Silice se nejvíce používají v lékařství, nebo v potravinářském průmyslu. Již zmíněné vlastnosti silic se používají k procesu samotného získávání silic ze dřeva (Jankovský *et al.* 1999). Pro získání silic a éterických olejů se používá destilace ve které je médium vodní pára. Po destilaci zůstává až 90 % odpadu, ve kterém jsou nejvíce obsaženy pryskyřičné kyseliny spolu se steroly. Nejvíce pryskyřičný kyselin je obsaženo ve dřevě borovice, dosahuje to až k 67 % ze všech extraktivních látek obsažených ve dřevě. Úplný opak obsahu terpenů ve dřevě je u listnatých dřevin, tam se objevují pouze výjimečně. U dubu bylo zjištěno pouze stopové množství izolovaných látek například skvalen a betulin (Gandelová *et al.* 2002, Holčák 2017).

Fenolické látky

Jedná se o jednu z nejdůležitějších skupin z extraktivních látek ve dřevě. Obecně známým zástupcem této skupiny je samotný fenol. Ten se ale v této základní podobě ve dřevě nevyskytuje. Vlastnosti dřeva, které fenolické látky ve velké míře ovlivňují jsou barevné skvrny na dřevě, samotné zbarvení dřeva, přirozená ochrana proti různým škůdcům a trvanlivost dřeva. Skupina lignanů má největší podíl ve dřevě a je koncentrován ve zbarveném dřevě jádrové oblasti. Naopak v běli je koncentrace takřka nulová (Barnett *et al.* 2003, Holčák 2017). Druhá důležitá a základní skupina jsou flavonoidy. Největší koncentrace flavonoidů je obsažena v jádrové dřevě. Z toho vyplývá, že flavonoidy mají zásadní vliv na zlepšení trvanlivosti dřeva přírodní cestou (Nascimento *et al.* 2013, Holčák 2017). Složka, která doprovází flavonoidy jsou takzvané stilbeny, ty mají za následek ve spojení s flavonoidy zlepšení a zásadní zvýšení přírodní trvanlivost dřeviny. Největší koncentrací stilbenů ze všech našich dřevin je ve dřevě borovice a nejvíce v jádru, kde nejčastěji propuká nakažení. (Barnett *et al.* 2003, Holčák 2017). Největší skupinou, která je tvořena extraktivními látkami ve dřevě jsou taniny, někdy je můžeme znát i pod názvem třísloviny. Jejich charakter je na bázi polyfenolických látek. Hlavním využitím taninů pro dřevo je ochrana proti degradaci biotickými činiteli. Taniny můžeme jednoduše poznat díky odpuzující koncentrované vůni. Využití dřeva s velkým obsahem tříslovin je oblíbené v potravinářském průmyslu, a to konkrétně při výrobě kvalitního vína a různých druhů tvrdého alkoholu. Taniny jako takové jsou klasifikovány na dvě skupiny, a to hydrolizované (štěpitelné) a nehydrolizované (kondenzované). Toto rozdělení vzniklo na základě možného štěpení. Látky se štěpí buď pomocí hydroxidů, nebo za pomoci minerálních kyselin (Jankovský *et al.* 1999, Holčák 2017).



Obrázek 7 Základní vzorec tříslovin (Wikiskripta.eu 2023)

3.2 Sub-mikroskopická hladina

Zabývá se vrstvami buněčné stěny, které jsou možné rozlišovat a popisovat jen z příčného řezu a za pomoci dobrého elektronového mikroskopu. Tato hladina se rozděluje na několik druhů. Rozdíl mezi druhy je v chemickém složení a také pod jakým úhlem jsou uspořádané v dané skupině celulóзовé fibrily. Všechny buňky, které dřevo obsahuje jsou navzájem spojené mezibuněčnou vrstvou, kterou nazýváme střední lamela (Čunderlík, 2009, Požgaj *et al.* 1997, Bodig a Jayne 1982).

Střední lamela má specifické vlastnosti a ty se odlišují od ostatních sekundárních vrstev, které jsou také obsažené v buněčné stěně. Ve střední lamelle se nejvíce jako stavební jednotka objevuje lignin, ten má ale odlišné složení než klasický lignin ve stěnách buňky. Zajímavostí této vrstvy je, že neobsahuje celulózu, jen v ojedinělých případech se objevuje minimální množství (Křivánková 2011, Balas 2013).

Základním prvkem pro tuto hladinu je primární stěna, vytvořená při diferenciaci buněk a probíhá v kambiu. Primární od slova, že se vytváří jako první stěna v celé buňce. V určité míře obsahuje celulózu a to zapříčiňuje, že při diferenciaci se může zvětšovat nezávisle do všech směrů. Stejně jako u střední lamely, tak ve složení dominuje lignin. Nachází se pod úhlem 0–90 °, záleží na postavení buňky (Čunderlík, 2009, Jankovský *et al.* 1999).

Sekundární vrstva ve dřevě se nejčastěji rozděluje ještě na další tři vrstvy, a to vnější S1, střední S2 a vnitřní S3. Tyto tři skupiny se rozlišují podle úhlu uložení v buňce. Vnější vrstva S1 má uspořádání myofibril do spirálovitého tvaru a pohybuje se od 50° do 70°. Základní jednotkou této stěny je lignin. Vrstva S2, je ve středu sekundární vrstvy, má největší zastoupení ze všech tří vrstev. Obsahově tvoří 70 až 80 % z celé sekundární vrstvy. Z takového obsahu jsou její vlastnosti hlavní a klíčové pro celou buňku. Největší zastoupení ve vrstvě mají celulóзовé fibrily. Vrstva tvoří lamelové uspořádání, které tvoří lignin a hemicelulózy. Tyto lamely se přiřazují jako pravidelný přírůstek celé buňky za jeden den. Orientace fibril v S2 vrstvě se pohybuje v rozmezí od 5 do 20 °. Poslední část sekundární stěny je S3 vrstva. Má podobnou funkci a skladbu jako vrstva S1. Vrstva S3 je tvořena z velké části polysacharidy a nejmenší zastoupení má lignin, což je úplný opak, jako u S1 vrstvy. Fibrily jsou orientovány pod úhlem od 60 do 90°. U některých dřevin má S3 vrstva charakteristický znak. Jedná se o bradavičnatou vrstvu, ta má za následek všechny difúzní procesy. To znamená propouštění vody do jiných buněčných stěn přes lumeny a ty jsou právě obsaženy ve vrstvě S3 (Čunderlík, 2009, Gandelová *et al.* 2002).

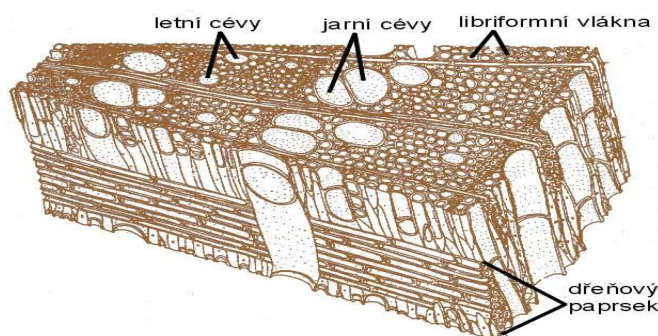
3.3 Mikroskopická strukturální hladina dřeva

Od chemického hladiny dřeva se dále přechází k mikroskopické, která není pozorována lidským okem. Ke zkoumání se používají různé druhy speciálních mikroskopů. Každá dřevina se skládá z velkého počtu různých buněk, které jsou shromážděny do velkých shluků a mají určitou funkci. Rozdělené buňky neboli dceřiné hned po dělení dokáží vykonávat určité funkce v pletivu buňky. Určitá skupina dceřiných buněk nemá funkci v pletivu, ale dokáží si zachovat svoji schopnost dělení a tím dřevo dokáže stále růst a vyvíjet se (Horáček *et al.* 1998). Složení jedné buňky se rozděluje na buněčnou stěnu a ta funguje jako obal celé buňky. Dále důležitou složkou je lumen, ten má v sobě umístěné protoplasty a buněčné prostory. Uvnitř protoplastu jsou obsaženy základní prvky buňky, bez které by nemohla fungovat, a to jsou vakuoly, jádro, plastidy, mitochondrie a poslední je protoplazma (Gandelová *et al.* 2002).

3.3.1 Mikroskopická hladina listnatých dřevin

Skupina listnatých dřevin se v mikroskopické hladině výrazně odlišuje od dřevin jehličnatých. Mikroskopická hladina listnatých dřevin je ve větší míře založena na různých typech pletiv, které mají podrobnější a důležitější fyziologické funkce než u jehličnatého dřeva. Všechny hlavní životní funkce stromu jsou podmíněny a podporovány speciálním přímo určeným druhem pletiva. Skrze všechny cévy ve dřevě listnáčů probíhá vodivá funkce. Cévy s vodivou funkcí mají jiný tvar než ostatní cévy. Jedná se o větší průměr a délku cévy. Tento tvar mají cévy z důvodu vedení velkého objemu vody s rozpuštěnými minerálními látkami, celá tato funkce se nazývá transpirační tok ve dřevě. V listnatých dřevinách se vyskytují i cévice, ale oproti jehličnatým dřevinám pouze v malém množství a jen u některých druhů dřevin. Jejich funkce je pouze pomocná, a to, že napomáhají ke správnému transpiračnímu toku vody. Mechanická funkce zajišťuje pevnost celého dřeva. Tvoří ji soubor pletiv, které jsou taktéž mechanického původu a nazývají se libriformní vlákna. Vlákna jsou složená z buněk, které jsou hrubé na povrchu buněčné stěny. Libriformní vlákna vynikají pro svoji délku, je to nejdelší soubor pletiv ve dřevě, a má malý průměr lumenu oproti jiným druhům pletiv. Pouze některé listnaté druhy dřevin využívají cévice, jako přechod z mechanických vláken a více zdokonalené libriformní vlákna. Zásobní funkci zajišťují v listnatém dřevě stejně jako v jehličnatém parenchymatické buňky. Listnaté dřevo má větší koncentraci parenchymatických buněk než dřevo jehličnaté. Popisované zvýšení výskytu parenchymatických buněk ve dřevě má

za následek vysoká koncentrace tvorby a výskytu dřevního parenchymu. Každé samostatné pletivo jde dobře poznat na první pohled z důvodu různých tvarů. U kruhovitě pórovitých dřev jarní cévy dokáží dosáhnou délka až na desetiny milimetru, ostatní již zmiňované komponenty dosahují pouze několika desítek mikrometrů. Na hustotě a druhu zastoupení pletiv ve dřevě má největší následek druh dřeviny, podmínky, kde strom roste, poloze v kmenu a výšce stromu (Čunderlík, 2009).



Obrázek 8 Mikroskopická hladina listnatých dřevin (Mezistromy.cz 2023)

3.4 Makroskopická strukturální hladina dřeva

Do makroskopické hladiny dřeva se řadí znaky, které jsou rozpoznatelné na první pohled jen okem, žádné další přístroje k tomu nejsou potřeba. Makroskopická hladina se nejčastěji používá pro poznávání druhů dřevin a dalších faktorů například vady dřeva, textura a kvalita dřeva. Nejdůležitější jsou dřeňové paprsky, letokruhy, jádro, běl, suky, vyzrálé dřevo a doprovodné znaky jsou textura, lesk a barva. Není ovšem předem dané, že dřeviny musí obsahovat všechny vypsané znaky, každé dřevo je jiné a nemá totožnou strukturu (Požgaj *et al.* 1997, Křivánková 2011, Balas 2013).

Dřeňové paprsky

Základem pro tvorbu dřeňových paprsků jsou parenchymatické buňky, které jsou uloženy kolmo na letokruhy ve dřevě. Hlavní dřeňové paprsky začínají vznikat od dřeně a vedou po radiálním směru. Vedlejší dřeňové paprsky neboli sekundární, nevznikají ve stejnou dobu jako hlavní paprsky, ale až po nějaké době, ani nevedou stejně jako hlavní od dřeně. Tangenciální řez je nejobtížnější na určení. Paprsky jsou viditelné pouze jako dlouhé čárky, které mají různou šířku a hustotu rozmístění (Jírů a Lysý 1961, Celý 2009).

Jádro

Centrální část ve dřevě, která má odlišné vlastnosti než okolní běl. Od běli je odlišeno tmavším zbarvením. Složení jádra obsahuje dutiny, a buněčné stěny. Ty produkují látky, které mají funkci proti pronikání vody. U jehličnatých dřevin to jsou pryskyřice a u listnatých dřevin sloučeniny gum, které ještě navíc mají funkci vyztužování dřeva (Požgaj *et al.* 1997, Balas 2013).

Běl

Nejhlavnější funkcí běle ve dřevě je schopnost transportu vody s dalšími rozpuštěnými látkami a skladování látek ve dřevě. Nejjednodušeji jde běl poznat z příčného řezu. Běl má většinou světlé zbarvení, ale může být i tmavé, to záleží na druhu dřeviny. Bělové dřeviny mají v celém průřezu takřka stejnou vlhkost oproti jádrovým dřevinám, které uprostřed kmene mají vlhkost rapidně menší z důvodu toho, že jádro není schopné vést vodu, tak jako běl (Požgaj *et al.* 1997).

Letokruhy

Označuje se jako každoroční přírůstek dřeva. V našem podnebném pásmu odpovídá pravidelný roční přírůstek, jako jedno celé vegetační období. Růst dřeva nastává právě jen ve vegetačním období. Po vegetačním období nastává vegetační klid, to znamená, že kambium nevytváří nové buňky a pletiva a zůstává v nezměněném stavu. Strom vytváří dva druhy dřeva s odlišnými vlastnostmi, a to se nazývá jarní a letní dřevo. Letní dřevo vytváří menší roční přírůstky, ale oproti jarnímu dřevu má lepší mechanické vlastnosti a kvalitu. Jarní dřevo přirůstá rychleji a má v sobě větší obsah vlhkosti než letní dřevo, protože probíhá transport vody z kořenů do asimilačních částí stromu (Čunderlík 2009).

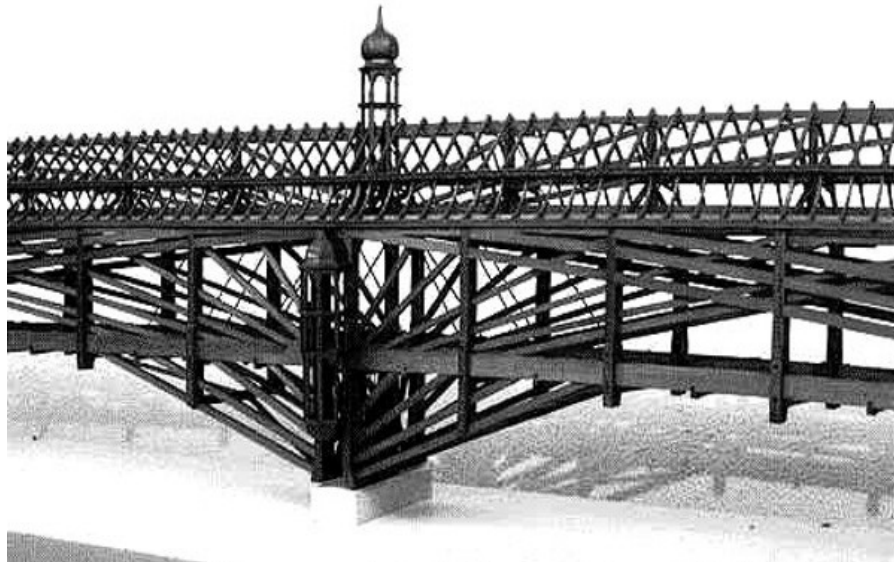
Vyzrálé dřevo

Ve dřevě se vyskytuje v prostřední části kmene a má obdobné složení jako jádro, vyzrálé dřevo není nějak odlišeno od barvy běle. Jelikož už je dřevo vyzrálé, tak nemá takovou procentuální vlhkost jako okolní běl. Jedná o zvláštní makroskopický znak, a to z důvodu, že je rozpoznatelné pouze u dřeva, které je nově pokácené a není vysušené (Jirů a Lysý 1961, Celý 2009, Požgaj *et al.* 1997).

4 Vrstvené lepené dřevo

První využití a výroba lepeného vrstveného dřeva přišla do Českých zemí okolo roku 1952. Hlavním impulzem pro výrobu a použití byly konstrukční prvky velkých rozměrů a tvarů. V pozdější době sedmdesátých a osmdesátých letech 20. století se postupně začaly zkoumat a vytvářet další kladné předpoklady pro širší využití lepeného vrstveného dřeva ve stavebnictví i na výrobu komponentů do interiéru. Tento rozmach zapříčinilo, že dřevařské podniky začali úzce spolupracovat s chemickým průmyslem. Znamenalo to přístup k novým druhům lepidel, nové druhy modifikace dřeva a lepší ochranné prostředky proti nežádoucím činitelům. Další spolupráce byla i se strojním a elektrotechnickým průmyslem, ta přinesla novinky v podobě nových strojů na třídění řeziva, nové pilařské technologie, počítačem řízené sušárny a strojní technologie pro lepší a novou výrobu materiálů na bázi dřeva (Kuklík 2015).

Pro zlepšení vlastností staveb se v dnešní době nejvíce používají konstrukce na bázi dřeva. V největší míře se používají lepené dřevěné komponenty. Tyto výrobky výborně konkurují, nebo dokonce v některých případech převyšují stavby z betonu nebo oceli. Dřevěné konstrukce jsou výhodnější z několika základních důvodů, jedním z nich je lehkost konstrukce a také tvarová variabilita (Kuklík 2015).



Obrázek 9 Model mostu z lepeného lamelového dřeva (Kuklík 2015)

Lepené dřevo je výborný a vysokohodnotný inženýrský materiál na konstrukční účely, který skoro ve všech dosavadních případech vyřadil z výroby klasicky používané

rostlé dřevo. Tomuto důvodu předchází několik zásadních výhod oproti klasickému rostlému dřevu, které se vztahuje k principu výroby lepeného lamelového dřeva s určitou kontrolou jakosti dřeva. Zlepšení únosnosti lepeného lamelového dřeva má zásadní podíl třídění lamel, podle pevnosti a kvality lepených spojů. Na tento proces se používá strojní třídění dřeva, které bere v potaz hustotu a modul pružnosti dřeva. Toto jsou základní faktory, které musí splňovat vysokohodnotné lepené lamelové dřevo (Pecina 2007, Vasiliev a Morozov 2018).

4.1 Charakteristika lepeného vrstveného dřeva

Všeobecně se ve zkratce nazývá lepené vrstvené dřevo BSH. Dále se rozděluje na další typy, jako například DUO, TRIO a jiné. Jedná se o konstrukčně únosné lamely, které se vyrábí ze slepovaných výřezů poskládaných na sebe. Směr vláken by měl být vždy ve směru celého nosníku, když se jedná o nějaký určitý druh zakřivení, tak vlákna by měli být stejným směrem, jak u klasického rovného nosníku. Nejčastěji se na výrobu nosníků používají jehličnaté dřeviny a to smrk, modřín, borovice, douglaska, liliovník a další druhy borovic, podle místa výroby nosníků. V menší míře se používá i listnaté dřevo, a to nejvíce buk, dub, olše, jasan a bříza. Při výrobě nosníků pro lokality se zvýšenou vlhkostí nebo kontaktu s vodou se jednotlivé lamely impregnují proti prostupu vlhkosti. Největší předností výroby nosníků z lepeného vrstveného dřeva je zvýšení mechanických vlastností, to se nejvíce projevuje u tuhosti a pevnosti. Toto zlepšení vlastností napomáhá k výrobě větších a delších nosníků spolu s větší únosností než u klasického řeziva. Na výrobu nosníků z lepeného lamelového dřeva se musí používat řezivo z vysoké pevnostní třídy C24 . Využití plného potenciálu lepeného lamelového dřeva se dosahuje tím, že lamely s největší pevností a nejmenším odklonem vláken se používají jako okrajové vrstvy, z důvodu rozložení napětí při namáhání. Důvod je takový, že v okrajových vrstvách probíhá největší a nejsilnější namáhání. Z tohoto důvodu jsou různé typy lamelového dřeva, a to kombinované lamelové dřevo, které bylo popsáno výše nebo tzv. homogenní lepené lamelové dřevo, kde se vyžadují prvky, které mají totožné vlastnosti. Při výrobě kvalitního nosníku se používají nejčastěji lepidla s vysokou pevností, hydrofóbní a hlavně s odolností proti trvalému zatížení (Kovaříková 2006, Obucina *et al.* 2017, Sandberg *et al.* 2018, Apawood.org 2006).

Tab. 2 Pevnostní třídění vrstveného dřeva (ČSN EN 14080–2013, Sikora 2021)

<i>Pevnostní třídy heterogenního vrstveného dřeva</i>							
<i>Pevnost [MPa]</i>	20c	22c	24c	26c	28c	30c	32c
Pevnost v ohybu	20	22	24	26	28	30	32
Modul pružnosti	10 400	10 400	11 000	12 000	12 500	13 000	13 500

<i>Pevnostní třídy homogenního vrstveného dřeva</i>							
<i>Pevnost [MPa]</i>	20h	22h	24h	26h	28h	30h	32h
Pevnost v ohybu	20	22	24	26	28	30	32
Modul pružnosti	8 400	10 500	11 500	12 000	12 600	13 600	14 000

4.1.1 Výhody lepeného vrstveného dřeva

Lepené vrstvené dřevo je upřednostňováno z důvodu výroby z přírodního materiálu, který je oproti ocelovým konstrukcím dobře recyklovatelný a má lepší estetické vlastnosti. Materiál dále disponuje vysokou pevností a nízkou konstrukční hmotností, kdy lepený nosník při stejné velikosti oproti betonovému dosahuje pouze 1/6 hmotnosti a proti oceli je to až o 2/3. Jelikož je nosník tvořený z lamel, tak se dokáže modifikovat. V Praxi se využívá metoda řazení lamel podle kvality. Na vnější stranu se dávají kvalitnější lamely a do středu s menší kvalitou. Je to z důvodu, že na vnější straně probíhá větší namáhání, než ve středu nosníku. Použití těchto nosníků dává možnost další přestavby, bez následků a demolice. Velká výhoda nosníků z vrstveného dřeva je, že se při použití urychluje celá výstavba, než při použití nosníků z oceli, nebo betonu. Z pohledu ekologie se lepené nosníky řadí na přední pozice, oproti ocelovým, nebo betonovým. Mají mnohonásobně menší uhlíkovou stopu a na výrobu mají razantně menší nároky. Cenově a dostupností jsou na tom také lépe. Vrstvené dřevo disponuje svým způsobem také nehořlavostí. Je to z důvodu vedení tepla, nosníky vedou teplo až 400krát pomaleji než ocelové. Je to důvod k tomu, že při požáru ohoří jen vnější vrstva nosníku a vytvoří ochranný obal. Vnitřní část zůstane neporušená a neztrácí mechanické vlastnosti. Z toho plyne, že dřevěné nosníky vydrží při požáru podstatně déle než ocelové (Kovaříková 2006, Msdk.cz 2018, Palis.cz 2018, Sikora 2021, Daibau 2023)

4.1.2 Nevýhody lepeného vrstveného dřeva

Nosníky z lepeného vrstveného dřeva se vyrábí pouze ze dřeva a z vybraného lepidla. Lepidlo má chemickou podstatu složení, aby mohlo čelit biotickým a abiotickým činitelům. Pro zlepšení vlastností lepidla se přidávají různá aditiva, která jsou zdravotně nezávadná, ale nedoporučuje se používat takto modifikované nosníky v interiérech. K této nevýhodě se přidává další, a to použití nátěrů proti vlhkosti, tímto krokem nosníky pomalu ztrácí přirozený vzhled a již nejsou tak atraktivní pro použití na viditelná místa. Jelikož vrstvené dřevo je lepené, tak přichází problém možnosti delaminace nosníku při namáhání nebo popřípadě při zvýšení vlhkosti. Delaminaci má za následek špatná adheze mezi lepidlem a lepenými plochami nebo úplné selhání lepidla. Jedinou nebo jednu z mála nevýhod pro výrobu lepeného lamelového dřeva, jsou vysoké náklady na výrobu oproti klasickému řezivu z důvodu lepení a vytvrzování lepidla. (Kovaříková 2006, Palis.cz 2018, Sikora 2021).

5 Adheziva a problematika lepení

5.1 Teorie lepení

Správná teorie lepení a cíl lepení je spojení k sobě dvou lepených prvků. Mezi lepenými prvky se musí vytvořit film lepidla se správnými mechanicko – fyzikálními schopnostmi a vlastnostmi, jsou to adheze, koheze a smáčivost. Hlavní zásadou pro dobře lepený spoj je drsnost lepeného povrchu. Tloušťka naneseného lepidla se udává v optimální hranici viz níže, která je pro každé lepidlo jiná. Obecně se je dáno, že čím je tenčí lepená vrstva, tak lepený spoj dostává lepší vlastnosti a má větší pevnost. Dále tenká vrstva lepidla dokáže zamezit vznikání vnitřních napětí, které jsou následkem smršťování, když je lepidlo déle nanesené a začíná vysychat. Teoreticky vytvoření jen adhezivní vrstvy v lepené spáře, která by obsahovala totožně velké částičky, jako ve vrstvě s kohezí a koheze by chyběla v lepené spáře. Protože v kohezivní vrstvě vznikají vnitřní napětí a chyby ve skladbě. Tak pouze s adhezivní vrstvou by byly spoje nejkvalitnější a nejpevnější. Vytvoření, tak tenké vrstvy, aby se uskutečnily schopnosti již více popisované, je problém i ve specializovaných laboratořích. Při lepení prvků ze dřeva se udává správná vrstva lepidla okolo 0,1 mm, pro nejkvalitnější spoj (Beran 2014, Sedliačik 2003, Biszczanik 2022).

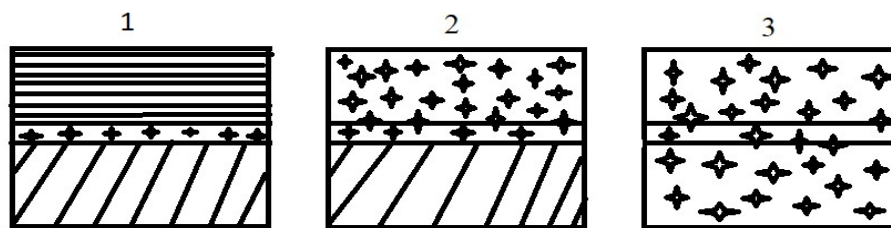
Tenká vrstva rozetřeného lepidla se dokáže vytvořit pouze po přesném dodržení několika zásad a kroků. Hlavními kroky jsou: vhodná aplikovatelnost lepidla na lepený povrch, správné podmínky a co největší přiblížení lepených povrchů na sebe, podle druhu lepidla zvolená správná doba pro manipulaci s lepidlem a samotné lepení. V poslední řadě doba vytvrzování lepidla, a to záleží na druhu zvoleného lepidla. V dřevařské průmyslu se používají materiály, které jsou hodně různorodé, a tak se musí používat i různé druhy lepidel. Ve velké míře se používají pro nanesení správné vrstvy lepidla – nanášecí stroje. Lisy slouží ke správnému stlačení prvků k sobě a dále zvyšování teploty pro zrychlení vytvrzování lepidla a rychlejší průběh chemických reakcí v lepidle. Všechny druhy lepidla mají při lepení kapalné skupenství. To je jediný způsob, aby byla zajištěna správná a bezchybná přilnavost k obou lepeným prvkům. Hlavní faktory, které ovlivňují kvalitu a pevnost lepené spáry jsou: adheze (přilnavost samotného lepidla k lepenému prvku), koheze (pevnost samotného lepidla a soudržnost v jeho struktuře), soudržnost (neboli celková pevnost lepené spáry) a smáčivost (kvalita smáčivosti lepeného povrchu), (Beran 2014, Sedliačik 2003).

5.1.1 Tlak při lisování

Základní poučky pro lisování v jednoduchých jednoetážových lisech jsou, při lepení více dílců, tak všechny dílce by měli mít bezpodmínečně stejnou tloušťku, aby nedocházelo k defektům a špatnému rozložení tlaku na lepené dílce. Zalisováním dílců dochází k vytlačování přebytečného lepidla. Tím se v lepeném spoji vytváří jednotná vrstva lepidla a vtlačuje se hlouběji do pórů dřeva. Nadměrný tlak má za následek úplné vytlačení lepidla pryč z lepené spáry a možné deformace, nebo úplného zničení lepených dílců. Velikost lisovacího tlaku závisí na typu dřeviny i lepidla, pro dřevinu se najde v tabulkách a u lepidla je to uvedeno v technickém listu. Další faktory, co se musí brát v potaz u určení správného tlaku jsou, teplota, za jaké probíhá lisování a druh opracování lepených dílců (Trávník a Svoboda, 2007).

5.2 Adheze

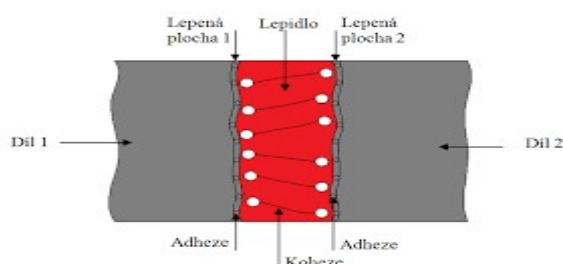
Přesná definice adheze zní spojení dvou látek nebo fyzické přitahování a jde obzvlášť o makroskopicky pozorovatelné přitahování dvou odlišných látek. Jedná se o jeden základních pilířů pro kvalitní lepení. Když lepidlo nemá schopnost kvalitně se spojit s materiálem, tak spoj nebude pevný a dochází k rozlepení spoje, který se klasifikuje jako lepený materiál – lepidlo. Když dojde k takovému případu, tak se jedná o to, že koheze neboli soudržnost lepidla a pevnost samotného lepeného povrchu je vyšší než adheze. Za vznikem adhezivních sil stojí dva modely, které jsou obsaženy mezi lepidlem a povrchem prvku, který chceme lepit. Jedná se o modely mechanických vazeb a chemických vazeb. V ojedinělých případech může nastat také autoadheze. Autoadheze znamená, když lepidlo a oba materiály, které se spojují mají totožné chemické složení. Ta se dále rozděluje ještě na dva druhy, a to jednostranná a oboustranná. Autoadheze přichází na řadu tehdy, když má povrch lepeného prvku a použité lepidlo totožné složení (Beran 2014, Pokorný 2000, Havránek 2017, Biszczanik 2022).



- 1 - lepidlo má jiné složení, než lepený povrch, nejvíce se s tím setkáváme
- 2 - chemické složení lepidla a jedné lepené plochy je stejné, autoadheze, která je částečná
- 3 - složení lepidla a lepených ploch je naprosto stejné, probíhá autoadheze, která je úplná

Obrázek 10 Druhy adhezí (vlastní tvorba)

Nejsnazší a nejčastější způsob, jak docílit správné a kvalitní adheze je spojením pevných a tekutých látek. Tekutá látka má výhodu v tom, že se dokáže vytvarovat a dostat do všech nerovností a tvarů na povrchu lepené plochy. Dále dokáže pohlcovat různé plyny a páry, které vylučuje lepený povrch. Kapalina dosáhne stavu, kdy se promění v lepidlo jen za podmínky dobré smáčivosti lepeného povrchu a poté za určených pravidel dále pomalu přechází do finálního pevného stavu (Osten 1986, Havelka 2011).

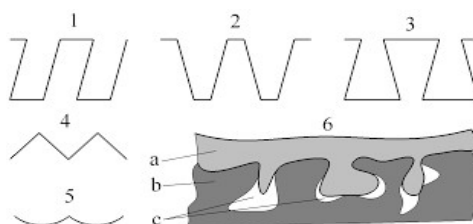


Obrázek 11 Adheze a koheze (Shingley 2010)

5.2.1 Mechanická adheze

Pojem mechanická adheze se používá pouze v případě, kdy je povrch lepeného materiálu drsný a hrubý s výčnělky a prohlubínami. Například u dřeva hrají významnou roli druhy opracování povrchu. Nejčastěji se jedná o hoblování a broušení, tím se zdrsňuje povrch lepených ploch pro lepší přilnutí lepidla. Spojovací materiál v našem případě lepidlo je nejčastěji v kapalném skupenství, tak dostává schopnost zatékat a vyplňovat hrubý povrch lepené plochy. Vyplněním nerovností lepeného materiálu vzniká po zaschnutí pomyslný zámek (mechanické kotvy), který drží při sobě lepidlo spolu s lepenými plochami. Čím více spojení a zatečení lepidla do lepené plochy, tím více se zvětšuje pevnost lepeného spoje. Tato popisovaná mechanická adheze je zásadním

faktorem pro lepení dřeva, papíru, plastů z pěny, nebo keramiky. Lepení broušených ploch, které nemají takový drsný povrch je tento typ adheze bezvýznamný. V dnešním průmyslu a montážích se tento způsob lepení používá jen zřídka. Dosavadní největší využití má pouze u výroby překližek a v pryžovém průmyslu (Langmaier 1999, Beran 2014, Havránek 2017)

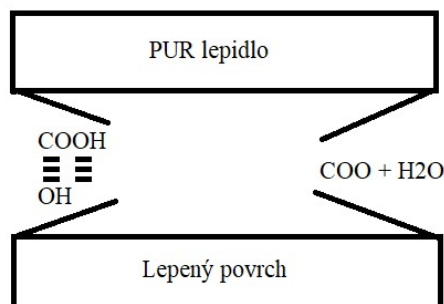


Obrázek 12 Mechanická adheze (Bednařík 2011)

5.2.2 Chemická adheze

Výhodou chemické, jiným slovem specifické adheze oproti mechanické je taková, že se dokáže použít na drsné povrchy i na hladké, kde mechanická adheze ztrácí svůj účinek. Hlavní charakteristika mechanické adheze spočívá v pohybu van der Waalsových sil. Všechny tyto zmíněné síly jsou založené na elektrickém potenciálu. Jejich další funkce je míchání s dalšími molekulami, které jsou obsažené v lepeném povrchu a také lepidla, kde se vytváření důležité kovalentní vazby pro samotnou adhezi. Kvalitní a pevný spoj se vytvoří tak, že se musí dodržovat určitý postup, aby nedošlo k vytvoření adhezivního lomu. Správný postup naopak vytváří kohezivní lom, a to má za následek reakce dvou komponentů, a to je samotné adhezivo a adherend. Sloučením těchto dvou komponentů vznikne rozhraní a začínají se vytvářet kovalentní vazby. Chemickým způsobem se nejčastěji a nejlépe lepí prvky, které mají reaktivní lepenou plochu. Když povrch není přirozeně dost reaktivní, tak se chemicky modifikuje, aby se mohla správně vytvořit a proběhnout reakce mezi lepeným povrchem a zvoleným lepidlem. Nej kvalitněji se lepí povrchy, které mají vysoce zoxidovaný lepený povrch to jsou kovy, plasty a z přírodních materiálů, papír a dřevo. Další klíčová zásada dobrého lepeného spoje, je výběr kvalitního lepidla, tak aby lepidlo mělo ty správné volné skupiny, které budou reagovat se skupinami na lepeném povrchu. Nejvíce reagující lepidla, která jsou dostupná na trhu se začínajícími chemickými skupinami: hydroxy-, karboxy-, isokyanátovo-, a epoxy. Ve většině procesů chemické vazby probíhají a vytvářejí se správně, ale obecný předpoklad je, že lepení

v termodynamickém prostředí, ve kterém probíhá převážná většina lepení, nepřispívá k vytvoření chemických vazeb. Z toho vyplývá, že se nemůže zvýšení, nebo zlepšení pevnosti po dokončení všech reakcí procesu lepení, zaručit kvalitní spoj (Shingley *et al.* 2010, Beran 2014, Havránek 2017).



Obrázek 13 Chemická adheze (abclepidla.cz 2023)

5.3 Smáčivost

Smáčivost se jeví jako přilnavost použitého lepidla na lepený povrch a schopností udržet se na povrchu. Zásadní podíl na smáčivosti mají již zmíněné kohezivní síly a adhezivní síly. Tyto zmíněné síly jsou svým potenciálem odpuzivé a přitažlivé, jsou obsažené ve vrstvách, a spojují se. Málo smáčivé lepidlo, nebo které špatně smáčí lepenou plochu adherentu, tak ve všech případech dochází k vytváření a zachytávání malých bublinek se vzduchem, a to nejvíce ve struktuře, která se nazývá fázová. Z tohoto problému se vytváří špatné vazby, které mají malou pevnost mezi samotným lepidlem a lepenou plochou. To se přenáší do finální pevnosti samotného lepeného spoje a přechází to k rozlepení a poruše celé vrstvy, která se na to váže. Při správné postupu lepení nenastane rozlepení, nebo defekt mezi vazebnými vrstvami, ale mimo vrstvy. Ve smáčivosti záleží nejvíce na faktoru kontaktního úhlu. Když se kontaktní úhel přiklání k nule, tak by měla proběhnou smáčivost lepeného povrchu nejkvalitněji (Válek 2006, Havránek 2017).

V chemickém složení lepidel, jsou obsaženy ve velké míře reaktanty, z tohoto důvodu jsou lepidla orientována jednostranně pomocí elektrifikace. Jinak řečeno mají polární potenciál. To má za následek, že lepidla nejlépe smáčí stejně nabitě plochy neboli polární. Nejlepšími polárními povrchy jsou například papír, dřevo, lehce pooxidované

povrchy kovů a sklo. Polární potenciál u lepeného povrchu je vytvořen z povrchové energie. Povrchová energie je známa pod pojmem povrchové napětí. Samotná polarita povrchu se zvedá za zvyšování se povrchového napětí. Pro dobrou smáčivost musí být povrchové napětí lepeného povrchu větší než napětí v samotném lepidle. Když se tak stane, tak dochází k rozptýlení kapičky lepidla a k dobré smáčivosti. V opačném případě zůstane lepidlo, jako kapičky a objevují se již zmíněné kapičky vzduchu a dochází ke slabé smáčivosti. Pro kvalitní adhezi lepeného povrchu je základním faktorem správná a kvalitní smáčivost (Beran 2014, Křížek 2022).

5.4 Koheze

Koheze se dá definovat hlavní skupinu sil, ve které se mezi sebou pojí částice stejného materiálu a tím se vytváří soudržnost materiálu. Kohezi mají všechny materiály vstupující do procesu lepení i dřevo velikost, jakou koheze sama o sobě má se udává, jako kohezní energie. Znamená to, že jak velkou energii musí vyvinout, aby došlo k odpoutání jedné částice od dalších. Pevnost a velikost koheze je úzce spjata s výběrem a složením použitého lepidla. Největší kohezi vykazují lepidla, které jsou dvousložkové a na epoxydové bázi. Jako materiál největší kohezi vykazují reaktoplasty, kde ve složení probíhají a vytvářejí se různé druhy vazeb. Termoplasty jsou úplným opakem reaktoplastů, mají malou kohezi a celková soudržnost je horší, reaktoplasty byly zmíněné z důvodu toho, že jejich podobná skupina, a to termosety se používá jako aditivum do používaného lepidla pro (Beran 2014, Pokorný 2000, Havránek 2017).

V ojedinělých případech, kde je problém s vytvořením adhezivních sil, které mají potenciál, ještě předtím, než proběhne úprava lepeného povrchu a před samotným lepením, tak se dostává na řadu koheze. Ta má největší vliv na samotné lepidlo a jeho soudržnost lepené vrstvy. Také velkým znakem pro kohezi lepené vrstvy je tažnost lepidla, jinak řečeno celková délka nanesené vrstvy použitého lepidla. Kvůli velikosti nanesené vrstvy se lepidla rozdělují na krátká a dlouhá. Lepidlo, které má delší nanesenou vrstvu, tím nabírá na vyšší viskozitě a dostává menší povrchové napětí (Bublík 1966, Havelka 2011).

5.5 Zlepšení vlastností lepené spáry

5.5.1 Povrchová úprava

Opracování povrchu je velmi důležitý proces, před samotným lepením. Surové dřevo má různorodou strukturu povrchu. Na povrchu se objevují skupiny trubiček, které jsou mikroskopického charakteru neboli kapiláry, které se zapojují do odvádění vody naneseného lepidla, ale ve všeobecnosti to tak neplatí. Dále kapiláry ovlivňují celkový povrch lepeného dřeva a adhezi lepidla. Tento důvod vede k tomu, že před každým lepením je důležité lepený povrch opracovat, aby se zkvalitnil celkový lepený spoj. Povrch, který se opracuje nekvalitně, nebo špatným způsobem, může vést k degradaci spoje a vytvoření trhlin a zvýšení celkového napětí v lepeném spoji. Zvýšení napětí vzniká v místech, kde se nahromadí větší tloušťka adhezivního filmu. Postupně, jak lepidlo začne vytvrzovat, tak lepidlo ztrácí svůj objem, jaký mělo při manipulaci na lepený povrch. Toto může vést ke vzniku nežádoucího napětí mezi lepidlem a lepenými plochami. Celý tento proces vede k degradaci lepeného spoje, už při malém mechanickém namáhání. Další důležitý faktor pro kvalitní lepený spoj je čistota lepeného povrchu. Částičky prachu a tukové látky negativně ovlivňují spoj. Dochází ke špatné smáčivosti dřeva a nenechávají proniknout do struktury dřeva potřebné impregnace a penetrace, které se přidávají pro lepší kvalitu lepeného filmu a lepších vlastností spoje (Sedileková 2011, Mihulja 2009).

Broušení povrchu

Pro kvalitní lepený spoj se udává nejlepší opracování lepeného povrchu broušením. Jedná se o mechanické obrábění dřeva. Po dokončení procesu na broušené ploše vznikají drobné vlnky, které nijak nezhoršují kvalitu. Proces probíhá na několik průchodů strojem. První fáze je broušení hrubým brusným papírem a druhá fáze je dobrušování na polotovár, používá se jemnější brusný papír. Při broušení se musí zvolit správný postup, který spočívá v přesném seřízení stroje na úběr materiálu. Špatné seřízení vede k velkému odběru materiálu a dochází k poškození brusného papíru a kvality povrchu a tím snížení pevnosti lepeného spoje. Při broušení se musí dávat pozor na usazování prachových částic na lepeném povrchu. Po procesu se musí lepené plochy důkladně očistit (Uhlíř 2003, Barčík 2009, Slezáková 2016, Ženatý 2016)

Frézování povrchu

Proces frézování lepeného povrchu se uskutečňuje na válcových frézách. Jedná se o rotační pohyb válců s noži, který odebírá přebytečný materiál, zušlechťuje a vyhlazuje povrch dřeva pro lepení. Na rozdíl od broušení, kde se používá brusný papír namísto nožů. Stejně jako u broušení, tak i u frézování dochází ke zvlnění povrchu. Frézování se odlišuje od broušení horší kvalitou povrchu, protože je větší úběr materiálu a nedokáže povrch tak zdokonalit. Kvalita frézovaného povrchu závisí na správném seřízení stroje a řezné geometrie. Frézovaný povrch lépe přijímá další potřebné impregnace povrchu než neopracovaný. Bylo zvoleno právě frézování povrchu, pro lepší přenos termosetů do adhezivního systému povrchu. Stejně jako po procesu broušení, tak frézování platí stejné zásady očištění lepené plochy, před samotným broušením (Hlásková 2018, Kršňák 2021).

5.5.2 Další možnosti zvyšování adheze

Dodatečné nátěry můžeme chápat také jako zlepšení přilnavosti lepeného povrchu dřeva do jeho struktury chemickými látkami, pro zkvalitnění následného lepení. Hloubkové impregnace dokáží odbourat přirozené bobtnání a sesychání dřeva, také zlepšit ochranu proti vlhkosti a vodě, jak dřeva, tak i lepené spáry. Pro kvalitní impregnování se musí vybrat správný druh impregnace dle toho, jaký bude mít výrobek další zpracování, využití a v jakém bude prostředí (Baraks a Nikiforov 1969, Baier a Týn 2001, Hess 2017).

Hloubková penetrace

Jedná se o jednosložkovou kapalinu s nízkou viskozitou. Její složení je z roztoku kyseliny křemičité. Dále je ještě modifikovaný dalšími chemickými procesy a přidanými nano částicemi, které mají velký potenciál vytváření kotvení lepidla. To znamená, že funguje jako adhezivní most pro lepení nebo další impregnování. Doporučené použití penetrace je především na opracované povrchy dřeva. Nejvíce se používá na hoblované a broušené povrchy, může se použít i na neopracovaný povrch, ale účinek není tak kvalitní. Hlavní důvod použití penetrace je takový, že po opracování je lepený povrch hladký a zamezuje se propustnost, tím pádem polyuretanové lepidlo nedokáže proniknout dost hluboko do povrchu. Po použití penetrace na lepený povrch, ten naruší a umožní tak

lepší proniknutí lepidla do povrchu. Samotné lepení pak vykáže lepší kvalitu a životnost. Penetrace se používá pro všechny druhy dřevin i tropické (Barvy na dřevo 2023, Kvalitní barvy 2023).

5.5.3 Aditiva do adhezivního systému

Jedná o přídavné složky, které se přidávají k lepidlu nebo na lepený povrch v malém množství pro zlepšení kvality lepeného spoje. Mohou být ve formě prášku nebo roztoků. Příklady zlepšení kvality; spoj dokáže být hydrofobní, lepší přilnavost lepidla, zvýšení pevnosti a pružnosti lepeného spoje (Gabriel 2011).

Termosety jsou na rozdíl od termoplastických polymerů při zpracování ve viskózním stavu. Nedochází ke změnám v chemické ani molekulární stavbě. Při použití termosetů dochází k chemickým reakcím u lepidel k výrobě kompozitních dílů, fungujících jako vyztužování a ochraně proti vlhkosti. V důsledku těchto reakcí tvoří termosetové pryskyřice zesíťovanou síť, která po snížení teploty vytvrdne to znamená, že již nemohou téci ani se rozpouštět. Na rozdíl od klasických zesíťovaných elastomerů a kaučuků, které se běžně používají, je teplota skelného přechodu (T_g) termosetů, které se v práci používají obecně nad pokojovou teplotou., která je 21 °C. Mohou obsahovat přísady, nebo aditiva pro ještě lepší vlastnosti. Používají se jako katalyzátory pro podporu nebo urychlení vytvrzování. Mnoho druhů termosetů se používá ve výrobě formou prášku, který je použit jako materiál, který vyplňuje nebo vyztužuje. Zatímco epoxidové pryskyřice jsou nejznámější termosety, jež zahrnují fenolové pryskyřice, nenasycené polyestery, polyuretany, dikyanáty, bismaleimidy, akryláty a methakryláty. Velký význam mají termosety v protipožární ochraně nejvíce se používají, jako nehořlavý materiál přimíchávaný do lepidel, nebo přidávaný rovnou do výrobku (Gotro a Prime 2022).

5.6 Polyuretanová lepidla

Nejdůležitější podmínkou pro celý proces lepení je správný výběr lepidla a jeho formy. Závisí to na adherentech v lepidle a na konečném použití lepených výrobků. Po chemické stránce jsou polyuretanová lepidla tvořena pomocí polyolefinových skupin řetězců, které jsou podporovány kratšími řetězci na bázi diizokyanátu. V ojedinělých případech mají tyto krátké řetězce schopnost prodlužovat hlavní řetězce. Polyolefinové skupiny přenášejí svoji variabilitu na kratší řetězce pro zvládnutí nízkých teplot, a hlavně

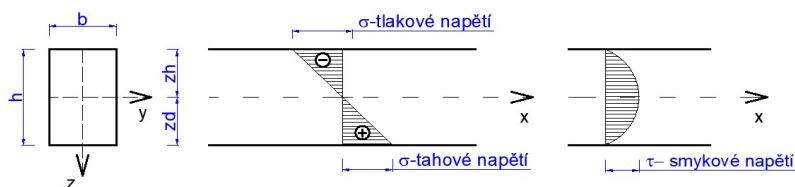
při pokojové teplotě propůjčují svoje elastomerní schopnosti. Polyuretanová lepidla jsou oblíbená z důvodu reakce izokyanátů spolu s vodíkem, jež je obsažen na povrchu lepeného povrchu, a to vede k možnosti lepit materiály, které mají rozdílnou vlhkost lepených ploch. Další přednost polyuretanu je doba vytvrzování, tak se nejčastěji pohybuje okolo 3-4 hodin, po této době je lepený spoj dostatečně pevný a odolný proti vodě, a čas pro manipulaci a nanesení lepidla se pohybuje okolo 20 min. Kvalitně slepený vytvrzený spoj se jeví jako pružný a odolný proti dynamickému namáhání. Nevýhody lepení tímto druhem lepidla je vysoká cena, emise z uvolňovaného izokyanátu a v poslední řadě je zapotřebí pro kvalitní spoj vysoký lisovací tlak (Sandberg 2018, Veselý 2013, Pizzi 1989)

Polyuretanová lepidla se nejdříve vyráběla jako dvousložková, ale od toho se postupem času upustilo. Z důvodu, že docházelo ke špatnému poměru míchání vícesytných alkoholů a vícefunkčních izokyanátů. Při nedodržení poměru ztrácelo lepidlo požadované vlastnosti a kvalita lepeného spoje klesala. U samotného průběhu lepení je vhodné, když povrch nasává lepidlo. Bez tohoto faktoru nebude lepení fungovat a musí se přidávat různé primery. Skladování jednosložkových polyuretanů je podobné jako u kyanoakrylátových lepidel – musí být v suchu (Beran 2014, Biszczanik 2022).

6 Mechanické vlastnosti lepeného vrstveného dřeva

6.1 Statická zkouška v ohybu

Namáhání konstrukčních prvků ohybem je jedním z nejběžnějších způsobů namáhání dřeva. Celá zkouška se zaměřuje na problematiku ohýbaného prvku. Celá zkouška patří do kategorie statických destruktivních zkoušek. Cíl této zkoušky spočívá v dosažení maximálního průhybu u použitého nosníku. Podélně namáhaný nosník ohybovou silou je umístěn ve speciálních podpěrách. Již zmíněná síla vytváří ohybovou deformaci. Tato síla se vyhodnocuje, až po dokončení zkoušky, kdy se nosník trvale poruší. Největší význam této zkoušky je na materiálech křehkých i tvárných. U křehkých materiálů se vytváří lom, a u tvárných to slouží spíše jako technologická zkouška. Při které dostáváme charakteristiky chování materiálů jako celku při ohybu (Louda a Odehnalová 2023, ČSN EN ISO 7438, 2005, Frese a Blaß 2006). Ohyb je komplexní namáhání, které se skládá z normálového a tangenciálního napětí. Pod normálové napětí se řadí namáhání jako tah a tlak. Pod tangenciální napětí jsou řazené smyky. Tahové namáhání se vytváří ve spodní části namáhaného prvku a tahové na opačné straně neboli horní části. Tyto namáhání se odvíjejí od směru zatěžované síly. Jinými pojmy se také označují jako konkávní a konvexní (Sikora 2021, Požgaj *et al.* 1993, Babiak *et al.* 2018).



Obrázek 14 Uspořádání zmíněných napětí v nosníku (Babiak *et al.* 2018).

Po průběhu zkoušky ohybem se vyhodnocují parametry např. napětí, které se vypočítá podle vzorečku:

$$\sigma_o = \frac{M_o \max}{W_o}$$

Kde jednotlivé veličiny znamenají: σ_o napětí v daném ohybu v [MPa], $M_o \max$ se udává jako maximální ohybový moment v [N×mm] a W_o jako modul průřezu v daném ohybu v [mm³].

Současně s pevností probíhá vyhodnocování i maximálního průhybu nosníku, než vznikne konečné deformace. Vyjadřuje se ze vzorečku:

$$M_{o \max} = \frac{F}{2} \times \frac{u}{2}$$

Jednotlivé veličiny znamenají: $M_{o \max}$ maximální průhyb nosníku v [N×m], dále F je síla v [N] a poslední veličina je u v [mm] a ta znamená vzdálenost podpěr.

Posledním vyhodnocovaným parametrem pro pevnost ohybu je hodnota průhybu zkoušeného nosníku. Ta se vypočítá ze vztahu:

$$y = \frac{F \times u^3}{48 \times E \times J}$$

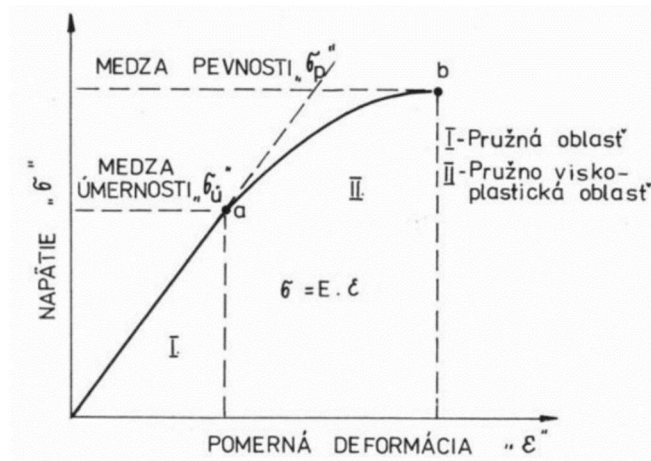
Jednotlivé veličiny jsou: y jako průhyb nosníku v [mm], F jako zatěžující síla v [N], dále E jako modul pružnosti nosníku v tahu v [MPa] a v poslední řadě J jako setrvační moment v průřezu [mm⁴].

Mez úměrnosti

Součástí pevnosti v ohybu je také mez úměrnosti, která se značí R_u . Definice meze úměrnosti je taková, bere se jako napětí v nosníku a deformace nosníku musí být přímo úměrná zatížení daného nosníku. Celá tato definice nám říká, že napětí meze úměrnosti se dá vyjádřit v grafu pomocí obyčejné přímky. Obecně se této přímce říká Hookova. Z této přímky se dá vyjádřit a zakreslit samotný Hookův zákon. Hookův zákon nám vysvětluje, že použité napětí je přímo úměrné vytvořené elastické deformaci nosníku, nebo z opačného směru elastická deformace je přímo úměrná vytvořenému napětí v nosníku (Pöhlandt 1989). Hookův zákon se vyjadřuje pomocí zobecněného vzorečku:

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

Jednotlivé veličiny znamenají: σ napětí v tahu daného nosníku v [MPa], E je jako modul pružnosti nosníku v tahu také v [MPa] a ε jako poměrné prodloužení nosníku.



Obrázek 15 Graf Hookova zákona pro materiály ze dřeva (Požgaj *et al.* 1993)

Mez Pevnosti

V ohybu nosníku je mez pevnosti označovaná R_m . Jedná se o velmi důležitý faktor pro celou zkoušku pevnosti v ohybu. Udává maximální hodnotu napětí v nosníku, které může vzniknout, než dojde k jakémukoliv porušení nosníku. Tento jev je dobře pozorovatelný z důvodu vytvoření krčku způsobené zmenšováním se průřezu nosníku při zatěžování. Ve vytvořeném krčku vzniká epicentrum vzniklého lomu a porušení nosníku. Po porušení nosníku již napětí v nosníku rapidně klesá (Pöhlandt 1989, Babiak *et al.* 2018).

Mez pružnosti

Pro ohyb mez pružnosti znamená, že je vyjádřena jako napětí R_E , které se při zatížení projevují jako pouze elastické deformace. Tato mez a napětí má, pro praxi značně ztížené určení. Protože každý materiál má jinou mez pružnosti a dále se mez pružnosti mění i podle teplotních a vlhkostních podmínek při zkoušení. Tento problém byl vyřešen uvedením smluvní veličinou meze pružnosti, značící $R_{0,005}$. Znamená to vytvoření trvalé deformace, která je plastická. V praxi při zkoušení nosníků se jedná o trvalé prodloužení nosníku, které je značeno a určeno jako $\Delta L = 0,005 \%$. Celé toto číslo v procentech je vyjádřeno z počáteční délky zkoušeného nosníku, pod označením L_0 (Pöhlandt 1989, Frese a Blaß 2006, Louda a Odehnalová 2023).

6.2 Dynamická zkouška v ohybu

V prostředí, ve kterém je daný materiál využíván, je vystaven stále dokola se opakujícím a měnícím se silám. Tyto již zmíněné síly jsou pro materiál vysoce rizikové, protože na materiál působí dynamicky silou, která má rázový potenciál. Po proběhnutí zkoušky ve většině případů dochází k okamžitému fatálnímu poškození zkoumaného materiálu, a to je rozdíl oproti statickému namáhání, kdy se materiál deformuje v malém rozsahu. Tento druh zatížení se zkoumá pomocí speciálních zkoušek rázem, které rychle mění zatížení (Michalisko 2010).

Zkouška rázové houževnatosti spočívá v principu, kdy dřevo pojme práci, která vznikla dynamickým ohybem (Požgaj *et al.* 1993). Nespočet používaných materiálů má svůj charakteristický lom. Mají to za následek typy molekul v daném materiálu, dále také postup výroby materiálu, orientace vláken ve dřevě. Na rozdíl od statického ohybu, kde se materiál zdeformuje až po velkém průhybu, nebo také nemusí dojít k stálému porušení. Tak materiál u rázové houževnatosti je podstatně křehčí a dochází okamžité deformaci materiálu (Swallowe 1999).

6.2.1 Druhy vzniklých lomů

Pro určení správného lomu jsou základní dvě charakteristiky. První pojednává o energii, která je zapotřebí pro vznik lomu. Čím je za potřebí menší energie, tak je lom zařazen do kategorie křehkých lomů. Při opačném jevu, kdy je za potřebí velké množství energie pro vznik lomu, tento typ lomu nazýváme houževnatý. Druhý typ charakteristiky se zabývá odlišným odvětším než první typ. Vyhodnocuje pouze mechanismy, které porušují strukturu materiálu. Výsledky tohoto typu se vyhodnocují pomocí znaků, které jsou na základě mikrografiky. Toto vyhodnocení nám určuje druhy vzniklých lomů a pomáhá nám je zařazovat do dvou skupin, a to lomy štěpné a tvárné. Tato práce se zabývá pouze jednu skupinu lomů, a to jsou lomy křehké a houževnaté z první skupiny (Václavík 2015, Kunz 1994).

Charakteristika křehkého lomu

Již zmíněno výše se jedná o lom, při kterém je použita minimální energie. Při vzniku lomu, který dojde z důsledku nashromážděné energie, není potřeba znovu dodávat další energii. Vytvořená trhлина ve dřevě se postupně šíří lomem a není možné jí zastavit.

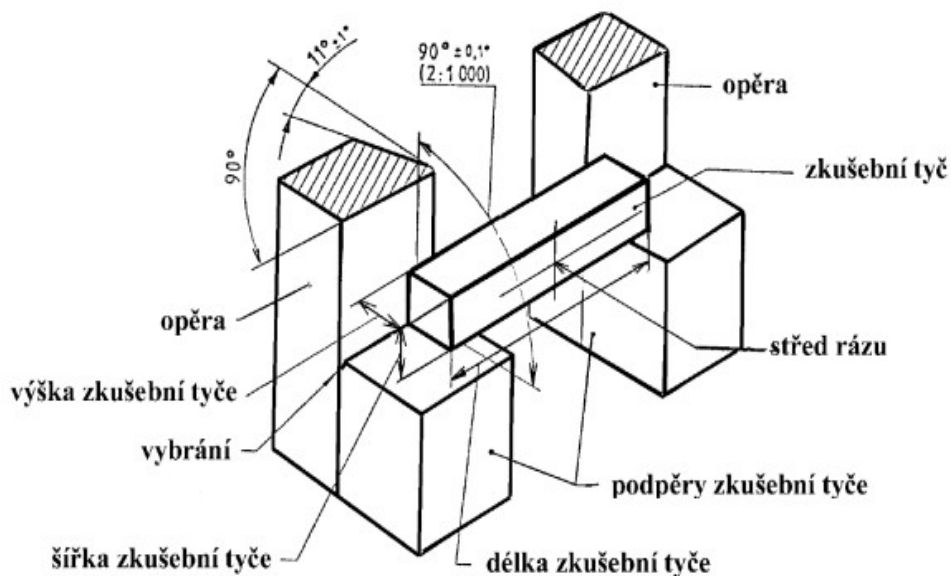
Velkou nevýhodou tohoto druhu lomu je, že na první pohled, je deformace materiálu nerozpoznatelná. Tím pádem není žádný ukazatel, který by se bral v potaz pro možné vytvoření takového lomu (Václavík 2015, Kunz 1994).

Charakteristika houževnatého lomu

Tento lom je zapříčiněn působením smykového napětí ve dřevě při použití energie. Někdy ho nazýváme důlkový. Je to z důvodu, že při průběhu lomu se vytvářejí plochy, které jsou lomové a mají tvar důlků. Na rozdíl od křehkého lomu, je potřeba velkého množství energie pro vytvoření lomu, má to za následek správný odklon vláken ve dřevě a také kvalitu dřeva bez možných vad (Václavík 2015, Kunz 1994).

6.2.2 Dynamická zkouška v ohybu dle Charpyho

Tato zvolená metoda je jednou nejvíce používaných, nejjednodušších a zároveň i nejstarších metod, kterou se zkouší a vyhodnocuje rázová houževnatost dřeva. První zkoušky probíhaly již okolo roku 1900. Pro tyto zkoušky jsou vhodné nejrůznější druhy materiálů, jako například dřevo, kov a plasty. Tato zkouška se může rozdělovat na dva typy zkoušení – neinstrumentované a instrumentované. První zmíněný typ, který byl použit i v této práci je nejvíce používaný. Má základ v kvantitě zkoumaných vzorků. Vykazuje pouze výsledky, jakou má houževnatost zkoumaný materiál za určitých podmínek. Dále jakou je potřeba vydat energii, aby se materiál porušil a deformoval. Druhý typ zkoušky probíhá úplně na odlišném principu, a to pomocí moderní technologie, které snímají materiál. Je to založeno na elektrických impulzech, které vytváří snímky a zaznamenávají celý průběh zkoušky, postupné zatížení materiálu, potřebnou energii a v poslední řadě celkové zatížení. Při průběhu tohoto typu zkoušky je větší možnost kontrolovat celý průběh. A tím zvýšit správnost průběhu, protože celá zkouška je zaznamenávána do grafů a z grafů je snadné odstranit nežádoucí faktory, nebo se jich vyvarovat (Duan *et al.* 2003).



Obrázek 16 Uložení vzorku do Charpyho kladiva (Melzer 2017)

Celý proces zkoušky podle Charpyho podléhá normě ČSN 49 0117. Norma určuje podmínky pro testování dřeva, za kterých může celá zkouška probíhat. Protože pro každý zkoušený materiál je jiná norma a jiné podmínky. Při průběhu zkoušky se zkušební těleso usazuje do podpěr, které můžeme vidět na obrázku výše. Vzorek se musí usadit tak, aby při průběhu zkoušky kyvadlo směřovalo na střed tělesa a také správným směrem, a to naležato nebo naplocho. Správné uložení vzorku závisí na druhu materiálu. u dřeva nejvíce záleží na odklonu vláken a také na řezech. Testování vzorků vyrobené ze dřeva, nebo jinou modifikací dřeva například lepené vrstvené dřevo platí přesné rozměry zkušebních těles uvedené v normě. Před použitím by tělesa měla být zkontrolována, jestli nějaké není poškozené, aby nedocházelo k nepřesným výsledkům. Průběh zkoušky by měl probíhat za pokojové teploty 21 °C a 60 % vlhkosti, energie, která se absorbuje, by měla být v rozmezí 10–80 %.

Rázová houževnatost se vyjadřuje ze vzorce, který je uvedený níže, protože samotná zkouška poskytne pouze jeden faktor a tím je přerážecí práce W . Dále se musí ještě přidat rozměry zkušebního tělesa, poté se dostane finální výpočet (ISO 179, 2000, Melka 2021).

$$A_w = \frac{W}{b \times h} [J \times cm^{-2}]$$

7 Metodika diplomové práce

V metodice práce je popisováno vytváření a zkoumání lepených vrstvených těles z vybraných listnatých dřevin akátu, dubu, buku. Kromě vlivu druhu dřeva ve skladbě vrstveného materiálu, byly také zkoumány vlivy opracování lepených ploch (broušené a frézované) a modifikace adhezního systému termosety. Zkušební soubory byly testovány statickým a dynamickým ohybem. Jednotlivé soubory byly testovány ve dvou variantách – klimatizované na 12 % vlhkost a máčené po dobu 4 hodin při teplotě vody 21 °C. V rámci statického ohybu byly analyzovány charakteristiky, jako modul pružnosti, mez úměrnosti a pevnost v ohybu. U dynamického ohybu to poté byla rázová houževnatost.

7.1 Komponenty pro výrobu

7.1.1 Lamely

Fošny jednotlivých druhů dřeva byly před pořezem na jednotlivé lamely kvalitativně vytríděny. Lamely byly roztríděny tak, aby orientace vláken v lamelách byla v radiálním směru. Poté zpracovány na formátovací pile na jednotlivé lamely o rozměrech 900 mm na délku, 50 mm na šířku a 5 mm na tloušťku. Povrchy jednotlivých lamel byly povrchově opracovány viz. specifikace v metodice a dále upraveny hloubkovou penetrací, následně slepeny.

7.1.2 Termosety a penetrace

Použité termosety byly ve formě rozemletých drobných částic s frakcí 1-60 nm, aby byla zajištěna co nejlepší rozpustnost a dále podpořena jeho funkce zesíťování a propojení s povrchem. Samotný termoset se přidával do penetrace DEKPRIMER NANO v poměru 5 g termosetu na 100 ml penetrace. Pro výrobu byla zvolena penetrace DEKPRIMER NANO, která je založena na akrylátové bázi pro lepší pronikání do povrchu a sjednocení savosti po celém povrchu.



**Obrázek 17 a) Nano penetrace, b) termosety ve formě prášku
(zahrada-dilna.cz 2023, vlastní tvorba)**

7.1.3 Polyuretanové lepidlo

Pro vytvoření lepeného spoje, bylo zvoleno jednosložkové polyuretanové lepidlo, za vlhka vytvrzující na spojování dřevěných materiálů, které se prodává s komerčním názvem KESTOPUR 1030. Lepidlo bylo zvoleno z důvodů, že je přímo určené pro lepení lepeného vrstveného dřeva, dobře odolává proti vlhkosti, krátkému času vytvrzení, vytvoření vysoce pevnostního spoje, žádného obsahu formaldehydu a nízkého napěňování.

Specifická hmotnost.....	1,5 kg/dm ³
Barva	běžová
Viskozita	5000 mPas (Brookfield, RVT, 20°C)
Spotřeba	150...300g/m ²
Otevřený čas.....	max. 30 min., 20°C
Lisovací čas.....	min. 90 – 120 min, 20°C
Potřebný tlak	0,5 – 1,0 N/mm ²
Vlhkost dřeva	10–20% (doporučená vlhkost 14%)

Obrázek 18 Technický list lepidla (Lepidla-eshop.cz, 2023)

7.2 Výroba zkušebních těles

Zkušební tělesa byla vyrobena, aby mohla být testována trojbodovým statickým ohybem pro který je norma EN 310 (1993) a dynamickým ohybem s normou ČSN 49 0117 (1993) o rozměrech 20x20x300 mm ze třech druhů dřev. Vzorčky se rozdělily na série podle druhu dřeviny (akát, dub, buk) typu opracování (frézované, broušené). Podle typu adhezivního systému (s termosety nebo pouze PUR lepidlo). Dále podle stupně vlhkosti (klimatizované, máčené). Podle typu zkoušky (rázová houževnatost, pevnost v ohybu). Každá série byla po 30 ks zkušebních těles, aby byla zabezpečena statistická relevance.



Obrázek 19 Normované vzorky 20x20x300 mm (vlastní tvorba)

Výroba lamel začala standardními technologickými operacemi krácení na zkracovací pile, formátování na formátovací pile typu SCM si 400 Class (SCM group S.P.A) na rozměry 1000 mm na délku, 50 mm na šířku a 5 mm na tloušťku. Na délku byla ponechána nadmíra 100 mm, z důvodu kvalitativního třídění již vyřezaných lamel. Dále se lamely zařizly na finální délku 900 mm. Poté probíhalo opracování povrchu lamel, broušením na širokopásé brusky SCM sandya 300 (SCM group S.P.A.) s úběrem 0,1 mm a frézováním na tloušťkovací frézce typu SCM s630 Class (SCM group S.P.A.) s úběrem 0,5 – 1 mm. Oba druhy opracování byly prováděny s ohledem na finální tloušťku lamel a to 4 mm. Výroba postupovala dál v popsání všech lamel podle vytvořeného kódu. Na finálně připravených lamelách se měřily rozměry a to délka, šířka a tloušťka. Pro následné vyhodnocení hustoty každé vyrobené lamely. Vyrobené a změřené lamely se rozdělily na

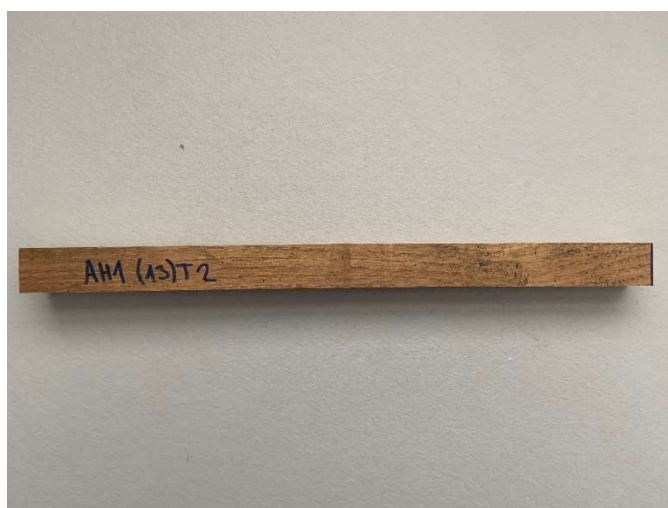
dva druhy, a to na pouze lepené bez, použití penetrace a termosetu. Druhá skupina byla postupně impregnovaná hloubkovou penetrací s přidanými termosety. Po rozmíchání a propojení s penetrací se termoset natíral na opracované lamely z obou stran. Doba vytvrzení a zaschnutí byla 24 h. Po zaschnutí následovalo lepení lamel polyuretanovým lepidlem do požadovaného tvaru a velikosti. Samotné lepení probíhalo po 25 ks lamel, z důvodu malého lisu. Nanášení lepidla se provádělo pomocí plastové, nebo dřevěné stěrky. Po pěti kusech se přiložily lamely na sebe a na poslední lamelu se dal proklad, aby nedošlo ke spojení všech lamel dohromady. Na základě technického listu daného lepidla se nanášelo 150 až 300 g/m². Vytvrzování bylo za pokojové teploty, která činila 21 °C. Lisování probíhalo v mechanickém lisu nastaveného podle technického listu lepidla, který je možno vidět na obrázku č. 13. Čas vytvrzení lepidla v lisu odpovídal požadavkům v technickém listu použitého lepidla. Poté se lamely vyndaly, odstranilo se přebytečné lepidlo a začala operace vymanipulování na formátovací pile. Tam se jednotlivé slepené lamely rozřezaly na dva dlouhé kusy o rozměrech 900 mm na délku a 20 mm na šířku. Dalším krokem bylo vymanipulování vzniklých vad, nebo přirozených vad jako, trhliny nebo suky, aby se zabránilo zkreslení výsledků a poklesu pevnosti. Poté se jednotlivé lamely na krátily, na finální zkušební tělesa podle normy pro rázovou houževnatost a pevnost v ohybu. Dále následovalo popisování jednotlivých vzorků, podle vytvořeného klíče. Vzorky byly označovány podle druhu použitého dřeva, způsobu opracování povrchu, rozdělení na vzorky na pevnost v ohybu, na rázovou houževnatost, číslování jednotlivých vzorků, způsob modifikace lepidla (pouze PUR lepidlo, PUR lepidlo s přidáním termosetů), a v poslední řadě rozdělení vzorků na máčené a klimatizované. Po dokončení kódování se vzorky skládaly do balíků po 30 ks, které tvořily jednu sérii.



Obrázek 20 Výroba lamel (vlastní tvorba)

Tímto krokem skončila výroba a tělesa se přesunula do klimatizační komory, aby se sjednotila a ustálila vlhkost na 12 %. Při sjednocení vlhkosti proběhla u vzorků s přidáním termosety ještě aktivace termosetů v sušárně. Sušárna byla zahřátá na konstantní teplotu 120 °C. Čas pro samotnou aktivaci byl zvolen na 60 min. Z důvodu toho, aby proběhla dostatečná aktivace i ve středu lepených lamel, a nejen na povrchu. Penetrace se zvolila z důvodu dobrého spojení s termosety a hlubokého pronikání do struktury dřeva. Vytvoření mechanických kotev spolu s termosetem pro lepší a kvalitnější lepený spoj.

Před zahájením zkoušky se jednotlivé série vzorků postupně vyndávaly z klimatizační komory, aby nedocházelo ke změně vlhkosti. Pro skupinu máčených vzorků byl následovný postup, že vyndané vzorky z klimatizační komory se poskládaly do nádoby, zatěžkaly a zalily vodou o pokojové teplotě na 4 h.



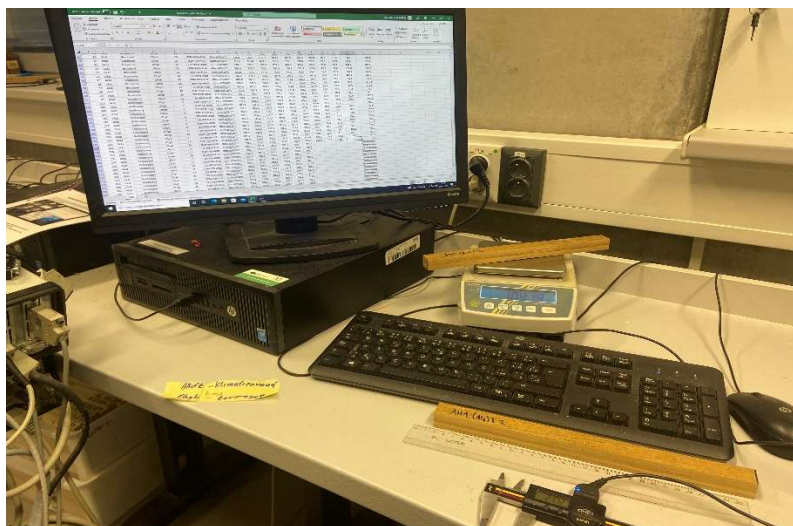
Obrázek 21 Kódování vzorků (vlastní tvorba)

7.3 Měření vzorků

Měření vzorků probíhalo na dvě části. První část bylo měření pouze lamel před slepením a vyřezáváním zkušebních těles. Druhá část byla měření již hotových zkušebních těles podle normy EN 310 (1993). Pro měření sloužily přístroje, jako digitální posuvné měřítko a laboratorní váha.

Druhé měření bylo rozděleno na dvě části, a to na měření klimatizovaných vzorků a

máčených vzorků. Před každým měřením klimatizovaných vzorků se vzorky vyndávaly z klimatizační komory. Na zkušebních tělesech se měřila délka, šířka a hmotnost, pro následné vypočítání hustoty a jako komponenty pro počítání dalších zkoušek. Máčené vzorky se nejdříve ponořily na 4 h do vody, následně se měřily a ukládaly na mokrý hadr, aby minimálně klesla vlhkost, před průběhem zkoušky. Na máčených vzorcích se měřily stejné atributy, jak u klimatizovaných.



Obrázek 22 Měření vzorků (vlastní tvorba)

7.4 Zkouška Rázové houževnatosti

Zkouška probíhala přesně podle stanovené normy a to ČSN 49 0117 (1993) pro určení rázové houževnatosti. Zkušebním zařízením bylo Charpyho kladivo, které mělo přerážecí práci 160 J. Testování jednotlivých zkušebních souborů probíhalo postupně, vzhledem k rozdílným vlhkostem tak, aby se při testování neměnila dosažená vlhkost. Vzorky se ukládaly na střed do určených podpěr na kladivu, pro lom vzorku uprostřed zkušebního tělesa. Výsledkem zkoušky bylo množství energie potřebné pro přerážení v Joulech. Máčené vzorky po vyndání z vody nemohly být dlouho na vzduchu z důvodu rychlého snižování vlhkosti, tak musely být zabalené v mokrém hadru, aby se udržovala stále stejná vlhkost. Ze zaznamenaných energií pro jednotlivá zkušební tělesa byla podle matematického vyjádření rovnice popsané níže vypočítána přerážecí práce v $J \times cm^{-2}$.

$$A_w = \frac{W}{b \times h} [J \times cm^{-2}]$$

b, h – Průřezové rozměry zkušebního tělesa [mm]

W – práce pro přeražení zkušebního tělesa [J]

Výsledky se zaokrouhlovaly podle normy na 1 [J.cm⁻²]



Obrázek 23 Charpyho kladivo (vlastní tvorba)

7.5 Zkouška statickým ohybem

Norma pro statickou zkoušku trojbodovým ohybem je EN 310 (1993). Probíhala na zkušebním zařízení TIRA test 2850 S E58. Stroj byl mechanicky nastaven na trojbodový ohyb s roztečí podpěr 240 mm. Rychlost posuvu horního příčnicku byla nastavena na rychlost 3 mm/min, aby nedošlo překročení vymezeného času zkoušky, který udává norma. Zkouška se ukončila při poklesu síly o 10 %. U máčených vzorků probíhal totožný postup, jako u předešlé zkoušky. Pro zjištění meze pevnosti v ohybu byl použit matematický vzorec:

$$MOR = \frac{3F_{max}l_0}{2bh^2} [MPa]$$

MOR – Zjištěná maximální mez pevnosti [MPa]

F_{max} – síla, která je potřebná pro zlomení testovaného vzorku [N]

h – výška tělesa [mm]

b – šířka tělesa [mm]

l – vzdálenost mezi nastavenými podpěrami [mm]

Další vyhodnocovanou charakteristikou byl modul pružnosti, který lze vypočítat ze síly a průhybu, viz matematický vzorec níže. Vyhodnocení probíhá přesně podle pokynů normy, která je totožná jako pro pevnost v ohybu a je to norma EN 310 (1993).

$$E = \frac{l_0^3(F_2 - F_1)}{4bh^3(y_2 - y_1)}$$

E – zjištěný modul pružnosti [MPa]

l_0 – rozpětí spodního suportu testovacího zařízení [mm]

b – šířka tělesa [mm]

h – výška tělesa [mm]

$F_2 - F_1$ – přírůst zatížení v lineární části používaného diagramu [N]

$y_2 - y_1$ – přírůstek průhybu [mm]

V poslední řadě se při statické ohybu vyhodnocovala i mez úměrnosti, která podléhá normě EN 310 (1993). Jedná se o hranici, kdy materiál přechází z elastické formy do plastické. To znamená, že deformace přesahující tuto hranici jsou již stálé a nevratné.

$$LOP = \frac{3F_E l_0}{2bh^2}$$

LOP – mez úměrnosti [MPa]

l_0 – rozpětí podpěr zařízení [mm]

F_E – síla na mezi úměrnosti [N]

b – šířka [mm]

h – tloušťka průřezových rozměrů testovaného zkušební tělesa [mm]



Obrázek 24 Zkouška pevnosti v ohybu na stroji TIR (vlastní tvorba)

7.6 Vyhodnocení dat ve statistice

Vyhodnocení probíhalo pomocí softwaru TIBCO a programu statistica 14. Před samotným testováním bylo ověřeno normálové rozložení dat, toto ověření normality dat je nezbytné při vyhodnocování pomocí testu MANOVA, která spadá do více faktorových analýz. Před statistickým vyhodnocením probíhalo vyhodnocení dat pomocí Grubbsova testu, za účelem vyřazení extrémních hodnot. Tyto extrémy se vylučují z horní hranice výsledků i ze spodní. Pro statistické vyhodnocení na základě P hodnot, byl použit Duncanův test. Tento test porovnává průměry jednotlivých zkušebních souborů a vyhodnocuje jejich statistickou významnost v porovnání s jinými zkušebními soubory na základě hladiny statistické významnosti.

Jednotlivé úrovně P hodnot, které se vyhodnocují podle sledovaných faktorů:

- $P = 0$ – nulová pravděpodobnost působícího faktoru
- $P = (0; 0,001)$ – statisticky velmi významný faktor
- $P = (0,001; 0,1)$ – středně významný faktor
- $P < 0,05$ – statisticky významný faktor
- $P < (0,01; 0,05)$ – statisticky velmi málo významný faktor
- $P = 0,05$ – faktor je na pomezí statistické významnosti
- $P > 0,05$ – statisticky nevýznamný fakt (Sikora 2021)

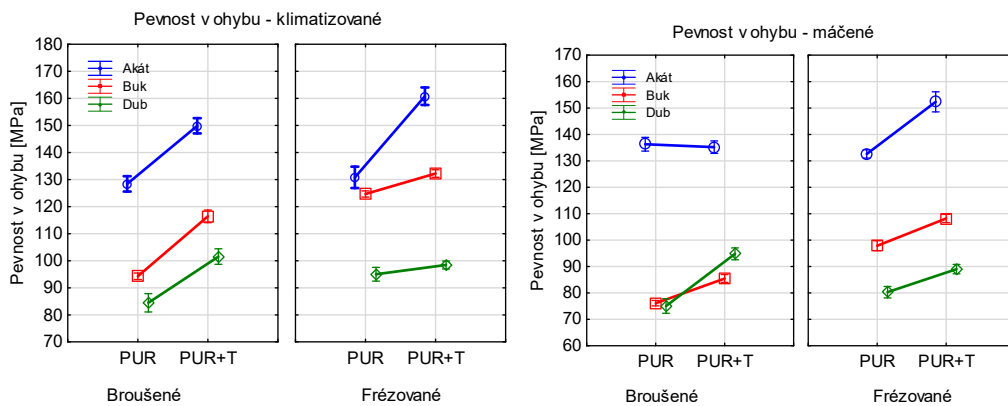
8 Výsledky a diskuse

Tato Kapitola se zaměřuje na představení souhrnných výsledků této práce za pomoci spojnicových grafů, které graficky zobrazují, jednotlivé výsledky, ve vztahu k sledovaným faktorům, kde se porovnávají jednotlivé faktory mezi sebou.

Na obrázku číslo 26 můžeme vidět výsledky pevností v ohybu zkušebních těles. Při pohledu na klimatizované zkušební tělesa je možné uvést, že nejvyšší hodnoty pevnosti v ohybu se modifikace termosety nejvíce projevila na zkušebních tělesech lepených z akátového dřeva, s frézovaným povrchem. Při porovnání s referenčním lepidlem byl nárůst o cca 23 %. Akát s broušeným povrchem nedosahoval takového zvýšení hodnot pevností v ohybu, při modifikaci adhezivního systému termosety, jako v případě frézovaného lepeného akátu, toto zvýšení bylo o cca 17 % proti referenci. Při vyhodnocení dubu a buku nezvyšovala modifikace termosety pevnost v ohybu, v takové míře jako u akátu. Statisticky významný rozdíl, na základě provedených Duncanových testů už byl pozorovatelný u referenčního lepení u bukového dřeva. U dubu byl také statisticky významný rozdíl, jen ne tak veliký, jak u dřeva buku. Na základě statistického vyhodnocení může říci, že vliv modifikace termosety měl statisticky významnější vliv u broušených povrchů dubu, tak i buku. U frézovaných povrchů dubu a buku se již nejednalo o statisticky významný rozdíl.

Odlišný trend se projevoval u zkušebních těles se zvýšenou vlhkostí. Nejvyšší hodnoty pevnosti v ohybu s modifikací termosety se nejvíce projevily taktéž na zkušebních tělesech lepených z akátového dřeva s frézovaným povrchem. Při porovnání v případě testování, při těchto podmínkách s referenčním lepidlem byl nárůst zhruba o 16 % oproti referenčnímu lepidlu. Lepení modifikovaným adhezivním systémem na broušených površích akátu bylo z hlediska statistického vyhodnocení nevýznamné v porovnání s referenčním zkušebním souborem. Taktéž jak u výsledků v předešlém grafu se u dubu a buku v takové míře nezvyšovala pevnost v ohybu, jako u těles s modifikací termosety u akátu. Stejný trend zvýšení probíhal u máčených frézovaných zkušebních těles dubu a buku po modifikaci adhezivního systému termosety. Dubová zkušební tělesa s broušeným povrchem po modifikaci adhezivního systému termosety, jako jediné měly pevnost v ohybu vyšší než vzorky za stejných podmínek u buku. Nárůst pevnosti v ohybu u broušených dubových zkušebních těles po modifikaci termosety oproti referenčnímu lepidlu byl zhruba o 27 %. Rozdíly ve výsledcích, které uvádím v této práci a které udává zmíněná literatura, může být zapříčiněno druhem vybraného lepidla.

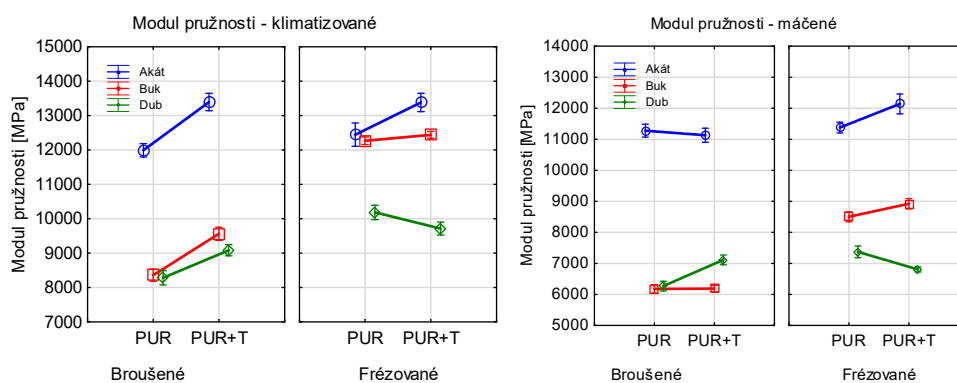
U akátu při opracování povrchu frézováním oproti opracování broušením, má za následek změny ve struktuře dřeva. Při broušení by mělo podle literatury (Beran 2014), (Barčík 2009) vznikat více mechanických kotev pro lepší přilnavost lepidla na lepený povrch a tím zkvalitnění lepeného spoje. V této práci nejlepší vlastnosti pro lepení vykazují opracování povrchu frézováním.



Obrázek 25 Analýza vlivu termosetů na pevnost v ohybu

Na obrázku číslo 27 můžeme vidět výsledky modulu pružnosti zkušebních těles. Podobně jako u předešlého obrázku můžeme uvést u klimatizovaných vzorků to, že nejvyšší hodnoty modulu pružnosti spolu s modifikací termosety se nejvíce projevíly na zkušebních tělesech lepených z akátového dřeva, jen s broušeným povrchem a ne frézovaným. Při porovnání s referenčním lepidlem byl nárůst o cca 11 %. Akát s frézovaným povrchem nedosahoval takového zvýšení hodnot modulu pružnosti, při modifikaci adhezivního systému termosety, jako v případě frézovaného lepeného akátu, toto zvýšení bylo jen o cca 8 % proti referenci. Při vyhodnocení zkušebních těles buku s frézovaným povrchem byl zaznamenán vysoký nárůst modulu pružnosti referenčního lepidla, oproti zkušebním tělesům buku s broušeným povrchem. Referenční frézované tělesa měly nárůst o 45 % oproti referenčním vzorkům s broušeným povrchem. U dubu se modul pružnosti nezvyšoval s modifikací termosety, v takové míře jako u akátu. Statisticky významný rozdíl je na základě provedených Duncanových testů. Byl již pozorovatelný u broušených zkušebních těles dubu s modifikací termosety. Na základě statistického vyhodnocení můžeme říci, že vliv modifikace termosety měl statisticky významnější vliv u broušených povrchů dubu i buku než u frézovaných zkušebních těles. U frézovaných povrchů dubu a buku se již nejednalo o statisticky významný rozdíl.

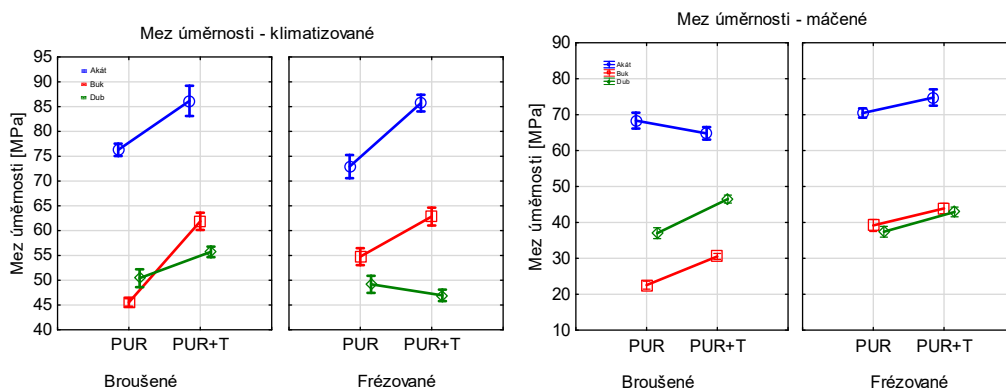
U vzorků se zvýšenou vlhkostí se nejvyšší hodnoty modulu pružnosti s modifikací termosety nejvíce projevily taktéž na zkušebních tělesech lepených z akátového dřeva s frézovaným povrchem, stejně jako u pevnosti v ohybu. Při porovnání v případě testování, při těchto podmínkách s referenčním lepidlem byl nárůst zhruba o 8 % oproti referenčnímu lepidlu. Lepení modifikovaným adhezivním systémem na broušených površích akátu bylo z hlediska statistického vyhodnocení nevýznamné v porovnání s referenčním zkušebním souborem. Výsledky modulu pružnosti u zkušebních těles se zvýšenou vlhkostí z dubu a buku klesaly oproti klimatizovaným zkušebním tělesům. Dubová zkušební tělesa s broušeným povrchem po modifikaci adhezivního systému termosety, měly trend zvyšování modulu pružnosti, a to o cca 7 %. Ostatní zkušební tělesa dubu a buku při stejných vlhkošních podmínkách a opracování povrchu broušením a hoblováním statisticky nevýznamné výsledky. Podle provedených Duncanových testů. Rozdíly ve výsledcích, které uvádím v této práci a které udává zmíněná literatura, může být zapříčiněno druhem vybraného lepidla. Na zkušebních tělesech při zvýšené vlhkosti z akátu při modifikování adhezivního systému termosety je zaznamenán nárůst modulu pružnosti stejně, jak je popsáno v literatuře (Gotro a Prime 2022), je to z důvodu toho, že přidané termosety zvyšují hydrofobnost lepeného spoje a tím se zvyšuje i jeho pevnost. Tyto změny hydrofobnosti jsou řešeny v článku (Sikora *et al.* 2023), kdy po přidání termosetů do adhezivního systému spoj dokáže lépe odolávat zvýšené vlhkosti.



Obrázek 26 Změna modulu pružnosti u klimatizovaných vzorků

Na obrázku číslo 28 můžeme vidět výsledky navýšení meze úměrnosti zkušebních těles. Podobně jak u předešlých dvou grafů můžeme uvést u klimatizovaných vzorků to, že nejvyšší hodnoty modulu pružnosti spolu s modifikací termosety se nejvíce projevíly na zkušebních tělesech lepených z akátového dřeva a při opracování povrchu frézováním a broušením vycházely skoro totožné hranice nejvyššího stupně meze úměrnosti. Při porovnání broušených zkušebních těles s referenčním lepidlem byl nárůst po modifikaci adhezního systému termosety o cca 12 % a u frézovaných zkušebních těles cca o 18 %. Při vyhodnocení zkušebních těles buku s broušeným povrchem byl zaznamenán vysoký nárůst meze úměrnosti po modifikaci termosety, oproti zkušebním tělesům buku s referenčním lepidlem. Nárůst meze úměrnosti po modifikaci termosety byl cca o 38 %. U frézovaných zkušebních tělesech buku po modifikaci termosety nebyl zaznamenán takový nárůst meze úměrnosti. U dubu se modul pružnosti nezvyšoval s modifikací termosety, v takové míře jako u akátu a buku. Na základě statistického vyhodnocení pomocí Duncanových testů můžeme říci, že vliv modifikace termosety neměl statisticky významný u broušených a frézovaných povrchů dubu.

U vzorků se zvýšenou vlhkostí se nejvyšší hodnoty meze úměrnosti se nejvíce projevíly také na zkušebních tělesech lepených z akátového dřeva. Statisticky významný rozdíl byl u zkušebních těles s modifikací adhezního systému termosety s frézovaným povrchem. Nárůst meze úměrnosti byl zhruba o 7 % oproti referenčnímu lepidlu. Při opracování povrchu broušením zkušební tělesa za stejných podmínek nevykazovaly statisticky významné výsledky. Výsledky meze úměrnosti u zkušebních těles se zvýšenou vlhkostí z dubu a buku se zvyšovaly oproti klimatizovaným zkušebním tělesům. Dubová zkušební tělesa s broušeným povrchem po modifikaci adhezního systému termosety, měly trend zvyšování meze úměrnosti, a to zhruba o 26 %. Podobný trend probíhal i u zkušebních těles buku, které měly stejné opracování a modifikaci. Zkušební tělesa buku a dubu při opracování povrchu frézováním a modifikací termosety vykazovaly statisticky významné výsledky, podle Duncanových testů. Jen trend zvyšování po modifikaci termosety nebyl tak prokazatelný, jak u broušených těles. Rozdíly ve výsledcích zaměřující se na vybraný druh dřeva akátu, které uvádím v této práci a které udává zmíněná literatura, může být zapříčiněno zvýšením vlhkostního stavu. Na zkušebních tělesech při zvýšené vlhkosti z akátu je pozorován pokles meze úměrnosti, tento pokles řeší literatura (Kuneš *et al.* 2019), kdy při zvyšování vlhkosti se narušuje mikroskopická struktura a vlastnosti se snižují. Po modifikaci adhezního systému termosety se problém na nějaký čas zpomaluje, podle výzkumu z (Sikora *et al.* 2023).

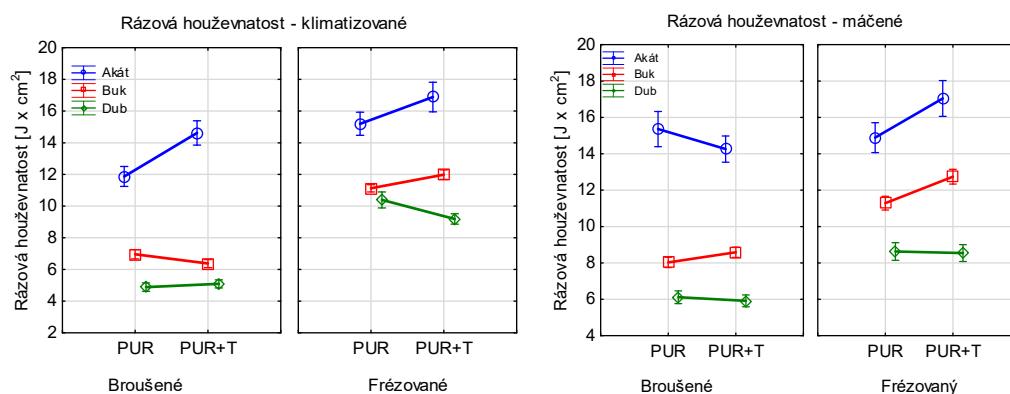


Obrázek 27 Analýza vlivu termosetů na mez úměrnosti

Na obrázku číslo 29 můžeme vidět výsledky zvýšení rázové houževnatosti zkušebních těles. Při pohledu na klimatizované zkušební tělesa je možné uvést, že nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti se modifikace termosety nejvíce projevila jako u statické zkoušky ohybem na zkušebních tělesech, lepených z akátového dřeva, s frézovaným povrchem. Při porovnání s referenčním lepidlem byl nárůst o zhruba 13 %. Akát s broušeným povrchem a referenčním lepidlem nedosahoval takových hodnot rázové houževnatosti jak u frézovaného povrchu, ale při modifikaci adhezivního systému termosety, u broušeného povrchu byl nárůst o cca 21 % proti referenci. Při vyhodnocení dubu nezvyšovala modifikace termosety rázovou houževnatost. Podle Duncanových testů zkušební tělesa dubu vykazovala statisticky nevýznamné rozdíly. Statisticky významný rozdíl na základě provedených Duncanových testů byl pozorovatelný u modifikace adhezivního systému termosety u bukových hoblovaných zkušebních těles. Oproti referenčnímu lepení byl nárůst cca o 9 %. Na základě statistického vyhodnocení může říci, že vliv modifikace termosety měl statisticky významnější vliv u frézovaných povrchů akátu a buku.

Odlíšný trend se projevoval u zkušebních těles se zvýšenou vlhkostí. Nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti s modifikací termosety se nejvíce projevíly taktéž na zkušebních tělesech lepených z akátového dřeva s frézovaným povrchem. Při porovnání, při těchto podmínkách s referenčním lepidlem byl nárůst cca o 23 % oproti referenčnímu lepidlu. Lepení modifikovaným adhezivním systémem na broušených površích všech dřevin bylo z hlediska statistického vyhodnocení nevýznamné v porovnání s referenčním zkušebním souborem, na základě Duncanových testů. U zkušebních těles buku při opracování povrchu frézováním a modifikace termosety byl nárůst rázové houževnatosti cca o 13 % oproti referenčnímu lepení. Tento trend zvyšování u buku byl pouze s touto

modifikací. Modifikace termosety a frézovaný povrch u zkušebních těles dubu byl statisticky nevýznamný po provedení Duncanových testů. Rozdíly ve výsledcích, které uvádím v této práci a které udává zmíněná literatura, může být zapříčiněno zvýšením vlhkosti a tím navýšením rázové houževnatosti pro dané zkušební tělesa. Nejvíce se tento fakt projevil u dřevin akátu a buku. Literatura (Požgaj *et al.* 1993) říká, že při zvýšení vlhkosti se dřevo stává více odolné proti dynamickému zatížení. V této práci můžeme tento fakt potvrdit. Dále to může být zapříčiněno přidáním termosetů do adhezivního systému, kdy referenční lepidlo nemá takovou odolnost proti vlhkosti z literatury (Beran 2014). Po přidání termosetů se adhezivní systém stává více hydrofobní a napomáhá zvyšování rázové houževnatosti, jak je řešeno v článku (Sikora *et al.* 2023).

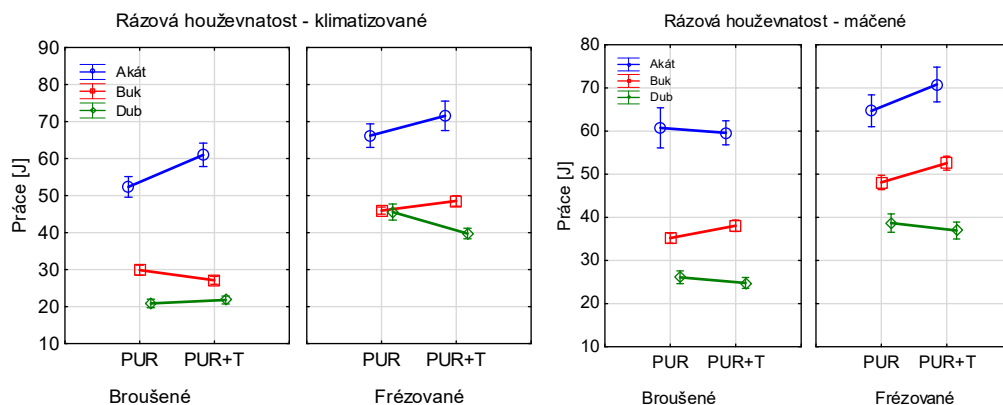


Obrázek 28 Analýza vlivu termosetů na rázovou houževnatost

Na obrázku číslo 30 můžeme vidět výsledky práce při průběhu zkoušky rázové houževnatosti na zkušebních tělesech. Při pohledu na klimatizované zkušební tělesa je možné uvést, že nejvyšší hodnoty práce při rázové houževnatosti s modifikací termosety nejvíce projevila, stejně jako u rázové houževnatosti na zkušebních tělesech, lepených z akátového dřeva, s frézovaným povrchem. Při porovnání s referenčním lepidlem byl nárůst o zhruba 11 %. Akát s broušeným povrchem a referenčním lepidlem nedosahoval takových hodnot práce rázové houževnatosti jak u frézovaného povrchu, ale při modifikaci adhezivního systému termosety, u broušeného povrchu byl nárůst cca o 17 % proti referenci. Při vyhodnocení dubu nezvyšovala modifikace termosety práci pro rázovou houževnatost. Podle Duncanových testů zkušební tělesa dubu vykazovala statisticky nevýznamné rozdíly. Ani u zkušebních těles buku obou druhů opracování povrchu a modifikace termosety nebyl zaznamenán nárůst práce pro rázovou

houževnatost. Tyto výsledky byly podle Duncanových testů vyhodnocené jako statisticky nevýznamné. Na základě statistického vyhodnocení může říci, že vliv modifikace termosety a opracování povrchu broušením a frézováním měl statisticky nejvýznamnější vliv dřeva akátu.

Nejvyšší hodnoty zkušebních těles se zvýšenou vlhkostí práce pro rázovou houževnatost s modifikací termosety se nejvíce projevíly taktéž na zkušebních tělesech lepených z akátového dřeva s frézovaným povrchem. Při porovnání, při těchto podmínkách s referenčním lepidlem byl nárůst cca o 9 % oproti referenčnímu lepidlu. Lepení modifikovaným adhezivním systémem na broušeném povrchu akátu byl z hlediska statistického vyhodnocení nevýznamný, v porovnání s referenčním zkušebním souborem, na základě Duncanových testů. U zkušebních těles buku při opracování povrchu broušením a frézováním probíhá podobný trend zvyšování při modifikaci termosety. U obou typů opracování jde o zvýšení práce cca o 5 %. Modifikace termosety dubových zkušebních těles s frézovaným a broušeným povrchem byl statisticky nevýznamný po provedení Duncanových testů. Nejedná se o žádný nárůst práce rázové houževnatosti po modifikaci termosety. Rozdíly ve výsledcích, které uvádím v tomto grafu a které udává zmíněná literatura, jsou stejné jako u předešlého grafu. Je to zapříčiněno zvýšením vlhkosti a tím navýšením práce rázové houževnatosti. Pojednává o tom i stejná literatura (Požgaj *et al.* 1993) která byla zmíněná v předešlém grafu. Jedná se o zvýšení práce pro rázovou houževnatost při zvýšení vlhkosti. V článku od (Sikora *et al.* 2023) bylo ještě také zmíněno zvýšení hydrofobnosti po přidáním termosetů a tím zvýšení práce pro rázovou houževnatost. Výsledky z tohoto grafu potvrdily výsledky z již zmíněné literatury.



Obrázek 29 Analýza vlivu termosetů na rázovou houževnatost

9 Závěr

Hlavní přínos této diplomové práce je zkoumání vlastností lepených komponentů, využívající nestandardní listnatou dřevinu. V rámci této práce bylo zkoumáno vrstvené dřevo akátu, buku a dubu, při modifikaci adhezního systému termosety. Důvodem zájmu o lepení těchto zvolených dřevin pro konstrukční účely, je důsledek vzrůstu jejich nevyužitého potenciálu. V rámci práce, byla řešena problematika využití specifických modifikovaných adhezivních systémů a různých druhů opracování povrchu pro vrstvené dřevo, ve vztahu ke statickému a dynamickému namáhání ohybem. Pro tuto práci byly zvoleny různé druhy zkoušek, a to pevnost v ohybu, statický modul pružnosti, mez úměrnosti a rázová houževnatost.

Po zpracování výsledků dynamického ohybu můžeme říct, že modifikace adhezivního systému termosety se nejlépe projevila u dřeva akátu, a u zkušebních těles které mají povrch opracovaný frézováním a jsou klimatizované. Naopak u máčených zkušebních těles dubu vyšly výsledky negativně. Stupeň opracování máčených zkušebních těles dubu neměl žádný vliv a byl zaznamenán pokles pevnosti.

Výsledky statického ohybu po modifikaci termosety vycházely nejvíce pozitivně také u dřeva akátu, kdy po přidání termosetů do adhezního systému byl na první pohled znatelný nárůst pevnosti v ohybu. U klimatizovaných zkušebních těles stupeň opracování povrchu vycházel nejlépe pro frézované zkušební tělesa. Nejméně pozitivně vycházely máčená zkušební tělesa dubu, taktéž jako u dynamického ohybu. U stupně opracování se lépe jevíly frézovaná zkušební tělesa. Ve srovnání výsledků podle zkoušek, lépe vycházel statický ohyb, kdy modifikace adhezního systému termosety se projevila pozitivně ve větší míře. U máčených zkušebních těles při modifikaci adhezního systému termosety se přepokládala větší odolnost proti vlhkosti a zvýšení pevnosti adhezního systému. Toto očekávání vycházelo z provedené FTIR analýzy, která poukazovala na zvýšenou hydrofobnost modifikovaného adhezivního systému.

Z dosažených výsledků vyplývá, že pro konstrukční účely z těchto dřevin má největší potenciál využití dřeva akátu a buku. Vybrané druhy dřeva po všech zkouškách vykázaly pozitivní hodnoty. V praxi má tento výzkum nejrozsáhlejší využití na konstrukční účely. Výroba nosných prvků, které mají vysokou odolnost proti zatížení. Dále se mohou používat na místech, kde se mění vlhkost.

10 Seznam použité literatury

1. Adámek J. Studijní opora pro komb. st. Modul BI-M04 Keramika, dřevo, kovy a sklo. Brno, 2004. CERM
2. Babiak, M., Gaff, M., Sikora, A., a Hýsek, Š. (2018). “Modulus of elasticity in three- and four-point bending of wood”, *Composite Structures*, 204(15), 454-465. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.113
3. Baier, J., Týn, Z. Ochrana dřeva. 2.vyd. Praha: Grada, 2001, 93 s. ISBN 80-247–0050-6.
4. Balas O. Diagnostické metody pro hodnocení stavu dřevěné konstrukce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2013.
5. Baraks. A., Nikiforov. N., 1969. Glubokaiapropitka drevesiny putem primeneniia naklov, 2.ed. Moskva.
6. Barčík, Š. Technika pre výrobu nábytku. Technická univerzita vo Zvolene – Drevárska fakulta, 2009, ISBN 978-80-228-2055-4, 262 s.
7. Barnett, R., Jeronimidis, G. Wood quality and its biological basis. Boca Raton, FL: Published in the USA/Canada by CRC Press, 2003. Biological sciences series (Oxford, England). ISBN 1-84127-319-8
8. Beran, R. Základy teorie lepení [online]. Brno: Lear, a.s., 2014 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie_lepeni%20_%20LEAR.pdf
9. Biszczanik, A., Talaška, K., a Wilczyński, D. (2022). Analysis of the adhesive spread and the thickness of the adhesive bonded joint depending on the compressive force applied to bonded materials with different surface structure, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 114. ISSN 0143-7496
10. Bodig, J., a Jayne, B. A. (1982). “Mechanics of Wood and Wood Composites”, Van Nostran-Reinhold CO, Inc., New York, pp. 712. ISBN: 0-89464-777-6
11. Boerjan, W., R, J. and Baucher, M. (2003) Lignin biosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 54:519–46.
12. Boublík, V. Lepidla a jejich příprava. Vydání druhé, nezměněné. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 192 s
13. BSH – lepené lamelové dřevo. Palis.cz. [Online] [Citace: 08. 10 2018.] <https://www.palis.cz/dalsi-produkty/dreveny-sortiment/lepene-profily/bsh---lepenelamelove-drevo/>.
14. Bugg, T. D., Ahmad, M., Hardiman, E. M. and Rahmanpour, R. (2011) Pathways for degradation of lignin in bacteria and fungi. *Natural Product Reports*, 28(12): 1883-1896.
15. Celý O. Dřevo jako výukový materiál. Masarykova univerzita, fakulta pedagogická, 2009.
16. Cierjacks a., Kowarik i., Joshi j., Hempel s., Ristow m., Lippe m. Von der, weber e. 2013. Biological flora of the British Isles: Robinia pseudoacacia. *Journal of Ecology*, 101 (6): 1623–1640. doi:10.1111/1365-2745.12162.

-
17. ČSN EN ISO 7438. Kovové materiály – Zkouška ohybem. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005. 12 s. Třídící znak 420401.
 18. Čunderlík, I. Štruktúra dreva. Rec. Jozef Kúdela, Dana Račková. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. 133 s. ISBN 978-80-228-2061-5.
 19. Daibau casopis. *Lepené / vrstvené dřevo; použití ve stavebnictví* [online]. Praha, 2023, [cit.2023-03-19].
https://www.daibau.cz/clanek/622/lepene_vrstvene_drevo_pouziti_ve_stavebnictvi
 20. Dřevo a materiály na jeho bázi ve stavebnictví. Msdk.cz. [Online] [Citace: 08. 3. 2023.] <http://www.msdk.cz/files/clanek-drevo-a-materialy-na-jeho-bazi.pdf>.
 21. Duan, Y., A. Saigal A. R. Greif. 2003. Impact Behavior and Modeling of Engineering Polymers – polymer engineering and science, january 2003, Vol. 43, No. 1
 22. Ebringerová, A., Hromádková, Z. and Heinze, T. (2005) Hemicellulose. In T. Heinze, (eds)., Polysaccharides I: Structure, Characterization and Use. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 1–67.
 23. Fér F. 1994. Lesnická dendrologie. 2. část – listnaté stromy. Praha, Vysoká škola zemědělská; Písek, Matice lesnická Písek: ISBN 80-213-0169-4, 162 s.
 24. Frese, H., a Blaß. (2006). “Characteristic bending strenght of beech glulam”, Material and Structures, 40(1), 3-13. DOI: 10.1617/s11527-006-9117-9
 25. Gabriel, Ingo. Dřevěné fasády: materiály, návrhy, realizace., str. 92-99, Praha: Grada Publishing a.s., 2011. ISBN 978-80-247-3819-2.
 26. Gandelová, L., Šlezingerová, J. Stavba dřeva. 1 vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2002, 187 s. ISBN 80-7157-636-0
 27. Gírio, F. M., Fonseca, C., Carvalheiro, F., Duarte, L. C., Marques, S. and Bogel-Lukasik, R. (2010) Hemicelluloses for fuel ethanol: a review. Bioresource Technology, 101(13): 4775-4800.
 28. Glulam comes in a range of appearances. [online]. 28.6.2006 [cit. 2012-10-18]. <http://www.apawood.org/>
 29. Haigler, C. H., Weimer P. J. (1990) Biosynthesis and biodegradation of cellulose. CRC Press, Boca Raton, 704 s.
 30. Havelka Š. Lepení sendvičových střešních panelů při výrobě autobusů. Univerzita Pardubice, fakulta dopravní Jana Pernera, 2011.
 31. Havránek T. Vizualizace normálového a tečného napětí u lepených spojů. Mendelova univerzita v Brně, fakulta Agronomická, 2017.
 32. Hendriks, A. T. W. M. and Zeeman, G., (2009) Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology, 100(1): 10–18
 33. Hess D. Vliv mikrovlnné předúpravy dřeva a modifikace impregnační metody na impregnovatelnost smrkového dřeva a jeho vybrané mechanické vlastnosti, Mendelova univerzita v Brně, fakulta Lesnická a dřevařská, 2017.
 34. Hlásková, L. Základní pojmy a prvky procesu řezání [online]. 1. Brno: LDF MENDELU, 2018 [cit. 2021-7-21]. Dostupné z: <https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory>
-

-
35. Horáček, P.; Šlezingerová, J.; Gandelová, L. Nauka o dřevě. první vydání. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně: MZLU v Brně, 1998.
 36. Holčák, M. Analýza množství extraktivních látek a barvy dřeva dubu zimního. Brno, 2017. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně – fakulta lesnická a dřevařská.
 37. Hrabák R., Poruba M., (2015), Les, Aventinum s. r. o., 312 s, ISBN 978-80–7442-050-4,
 38. https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/inovace/Stavba_dreva/postery/SDR-jm-ak.pdf
 39. https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/inovace/Stavba_dreva/postery/SDR-bk-ol.pdf
 40. Chovanec, D. Náuka o dreve I. Zvolen: Vysoká škola lesnícka a drevárska vo Zvolene, 1977.
 41. ISO 179:2000 Plastics – Determination of Charpy impact properties.
 42. Jankovský, M., Lachman, J., Staszková, L. Chemie dřeva, první vydání 1999, Praha: AF a LF ČZU v Praze, 1999. 212 s. ISBN 80-213-0559-2
 43. Jeffrey G, R. Bruce Prime, Characterization of Thermosetting Resins and Polymers , Characterization and Failure Analysis of Plastics , 10.31399/asm.hb.v11B.9781627083959 , (1-22) , (2022) .
 44. Kohout, J; Tobek, A; Müller P. Tesařství. Praha: Grada Publishing, s.r.o., 1996. 256 s.
 45. Konstrukční řezivo: Glulam. [online]. [cit. 2012-10-18]. Dostupné z: <http://www.drevo.wz.cz/>
<http://www.drevo.wz.cz/index.php?a=glulam&m1=2&m2=3&lang=cz>
 46. Kovaříková, J., Lepené dřevo: vynikající nosný materiál. [online]. 5.3.2006 [cit. 2012-10-18]. Dostupné z: <http://www.stavimedum.cz>
 47. Kršňák J. Přesné strojní obrábění dřeva. České vysoké učení technické v Praze, fakulta Strojní 2021.
 48. Křivánková, S. Diagnostické metody pro ověření míry poškození a materiálových charakteristik dřevěných prvků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2011.
 49. Křížek V. Technologie lepení ve strojírenství. České vysoké učení technické v Praze, fakulta Strojní, 2022.
 50. Kuklík, P. Dřevěné konstrukce. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 80-867-6972-0.
 51. Kuneš, I, M. Baláš, J. Galo, M. Šulitka a Ch. Suraweera. Trnovník Akát (Robinia Pseudoacacia) A Jeho Role Ve Středoevropském A Českém Prostoru [Online]. Praha, 2019 [Cit. 2023-03-12]. Dostupné Z: <https://www.researchgate.net/publication/341831671>
 52. Kunz, J. Základy lomové mechaniky. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994, 172 s. ISBN 80-01-01215-8.
 53. Langmaier, F. Adhese a adhesiva. 1. vyd. Zlín: FT VUT, 1999. 106 s. ISBN 8021413735.
-

-
54. Louda P., Odehnalová D.: Vlastnosti kovů a jejich zkoušení. Studijní podklady k předmětu nauka o materiálu I. 2023 Liberec: KMT TU v Liberci. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM1/NOM%20I.htm
 55. Lynd, L. R., Weimer, P. J., Van Zyl, W. H. and Pretorius, I. S. (2002) Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 66(3): 506-577.
 56. Mathews, S.L., Pawlak, J. and Grunden, A.M. (2015) Bacterial biodegradation and bioconversion of industrial lignocellulosic streams. *Applied microbiology and 62 biotechnology*, 99(7): 2939–2954.
 57. Melka P. Statistické zhodnocení vlivu parametrů měření rázové houževnatosti polymerů. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická, 2021.
 58. Mihulja, G., Bogner, A., Župčić, I. (2009): Gluing strength of wood measured with nonstandard pressure-shear method, Univerzity of Zagreb, Faculty of forestry, Croatia.
 59. Michalisko, J. Houževnatost kovových materiálů a její zkoušení Brno, 2010.
 60. Nascimento, M. S. et. al. Phenolic Extractives and Natural Resistance of Wood. *Biodegradation-Life of science*, 2013. ISBN 978-953-51-1154-2
 61. Osten, M. Práce s lepidly a tmely. Vydání třetí, upravené. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1986. 288 s.
 62. Pařil, P. Wood impregnation. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně, 2016. 131 s
 63. Pecina, J., Pecina, P.: Materiály a technologie dřeva. Pdf MU. 2007
 64. Pizzi, A. (1989). “Wood Adhesives: Chemistry and Technology”, Marcel Dekker Inc., New York, ISBN 0-8247-8052-3.
 65. Pöhlandt, K. Materials Testing for the Metal Forming Industry. Berlin: Springer-Verlag, 1989. s. 226. ISBN 3-540-50651-9.
 66. Pokorný, J. Lepení a tmelení v dílně i domácnosti: [dřevo, kovy, plasty, sklo, další materiály a výrobky]. Praha: Grada, 2000. 104 s. ISBN 80-7169-857-1.
 67. Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., a Babiak, M. (1993). “Štruktúra a Vlastnosti Dřeva [Structure and Properties of Wood]”, Příroda a. s., Bratislava, Slovakia, pp. 486. ISBN: 80-07-00960-4
 68. Rowell, R., M., et. al. Handbook of wood chemistry and wood composites. druhé vydání 2013, Boca Raton: CRC Press, 2013. 703 s. ISBN 9781439853801
 69. Sandberg, D., Kuzman, M. K., a Gaff, M. (2018). “Kompozitní materiály na bázi dřeva: Dřevo jako kompozitní a konstrukční materiál”, Prague, Czech University of Life Sciences Prague (CULS), Faculty of Forestry and Wood Science, pp. 185. ISBN: 978-80-213-2869-3
 70. Sedileková P. Technológia spracovania dreva. Technická univerzita vo Zvoleně, fakulta Dřevařská, 2011.
 71. Sedliačik, J. (2003). “Procesy technológie lepenia”, Vydavateľstvo TU vo Zvolene, ISBN 80-228-1151-3
 72. Shigley, J. E., Charles R. Mischke, R. G. Budynas a M. Vlk. Konstruování strojních součástí. Brno: VUTUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0
-

-
73. Sikora A. Základní mechanické charakteristiky kompozitních materiálů na bázi dřeva a nedřevních komponentů. Česká zemědělská univerzita, fakulta Lesnická a dřevařská, 2021.
 74. Skalická A; Větvička V; Zelený V. Botanický slovník rodových jmen cévnatých rostlin. 1 vydání, Praha: Aventinum, 2012. 280 stran. ISBN 978-80-7442-031-3.
 75. Slavík B. Květena České republiky 4. 3 vydání, Praha: Academia, 1995. 340 stran. ISBN 80-200-0384-3.
 76. Slezáková S. Technologie broušení dřeva, stroje a nástroje. Mendelova univerzita v Brně, fakulta Lesnická a dřevařská, 2016.
 77. Swallowe, G. M. 1999. Mechanical Properties and Testing of Polymers – Factors Affecting Impact Strength. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. s. 127-128. ISBN 978-94-015-9231-4
 78. Trávník, A., Svoboda, J. Technologické procesy výroby nábytku 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2007, 223 s. ISBN 978-80-7375-056-5
 79. Uhlíř, A. Technologie II. Praha 2003, ISBN 80-7333-008-3, 190 s.
 80. Václavík, M. Predikce teplotní závislosti lomové houževnatosti. Brno, 2015.
 81. Válek, V. Chrást, V. Technologie lepení kovů v opravárenství. Disertační práce. MZLU v Brně, 2006. 99 s
 82. Vasiliev, V. V., a Morozov, E. V. (2018). “Advanced Mechanics of Composite Materials and Structures”, 4th Ed., Elsevier, 75-189. ISBN: 9780081022092
 83. Veselý J. Vliv stavu povrchu na únavovou a statickou pevnost lepeného spoje. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2013.
 84. Vieira, F. a kol. Lignin jako obnovitelný stavební blok pro udržitelné polyuretany. In *Materiály* [online]. 2022. Sv. 15, č. 17, s. 6182. Dostupné na internetu: <<http://dx.doi.org/10.3390/ma15176182>>.
 85. Ženatý P. Posouzení kvality lepení kombinovaných masivních materiálů na bázi dřeva. Mendelova univerzita v Brně, fakulta Lesnická a dřevařská, 2016.

Přílohy

Příloha 1 Duncanův test pevnosti v ohybu [MPa] (klimatizované)

A	Sand	PUR		0,000	0,509	0,000	0,000	0,001	0,305	0,326	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed			003	728	004	004	483	763	532	005	003	004	004
A	Sand	PUR	0,000		0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	003		011	835	001	004	004	010	001	004	001	005
A	Mille	PUR	0,509	0,000		0,000	0,000	0,000	0,112	0,697	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		728	011		003	005	164	042	353	001	004	004	004
A	Mille	PUR	0,000	0,002	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	004	835	003		001	004	004	011	002	005	001	001
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,007	0,068	0,838	0,287
K	ed		004	001	005	001		004	004	001	413	742	761	552
B	Sand	PUR	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000		0,023	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	483	004	164	004	004		935	040	004	056	003	012
B	Mille	PUR	0,305	0,000	0,112	0,000	0,000	0,023		0,057	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		763	004	042	004	004	935		281	004	011	004	003
B	Mille	PUR	0,326	0,000	0,697	0,000	0,000	0,000	0,057		0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	532	010	353	011	001	040	281		001	004	005	004
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000		0,000	0,005	0,000
B	ed		005	001	001	002	413	004	004	001		011	533	270
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,068	0,000	0,000	0,000	0,000		0,091	0,393
B	ed	+T	003	004	004	005	742	056	011	004	011		542	613
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,838	0,000	0,000	0,000	0,005	0,091		0,351
B	d		004	001	004	001	761	003	004	005	533	542		565
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,287	0,000	0,000	0,000	0,000	0,393	0,351	
B	d	+T	004	005	004	001	552	012	003	004	270	613	565	

Příloha 2 Duncanův test FP [N] (klimatizované)

A	Sand	PUR		0,000	0,000	0,000	0,000	0,542	0,708	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed			004	543	004	007	883	426	422	004	333	004	009
A	Sand	PUR	0,000		0,052	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	004		408	009	001	004	004	195	001	004	001	005
A	Mille	PUR	0,000	0,052		0,000	0,000	0,003	0,000	0,551	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		543	408		011	005	560	152	046	001	004	001	004
A	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	004	009	011		001	004	004	003	002	005	001	001
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,267	0,440	0,831
K	ed		007	001	005	001		004	016	004	170	585	559	613
B	Sand	PUR	0,542	0,000	0,003	0,000	0,000		0,358	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	883	004	560	004	004		112	309	005	035	004	005
B	Mille	PUR	0,708	0,000	0,000	0,000	0,000	0,358		0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		426	004	152	004	016	112		225	004	915	005	036
B	Mille	PUR	0,003	0,015	0,551	0,000	0,000	0,015	0,001		0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	422	195	046	003	004	309	225		001	004	005	004
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,001	0,000
B	ed		004	001	001	002	170	005	004	001		005	969	089
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,267	0,000	0,000	0,000	0,000		0,073	0,332
B	ed	+T	333	004	004	005	585	035	915	004	005		911	079
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,440	0,000	0,000	0,000	0,001	0,073		0,357
B	d		004	001	001	001	559	004	005	005	969	911		390
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,831	0,000	0,000	0,000	0,000	0,332	0,357	
B	d	+T	009	005	004	001	613	005	036	004	089	079	390	

Příloha 3 Duncanův test FE [N] (klimatizované)

A	Sand	PUR		0,000	0,140	0,000	0,000	0,012	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed			058	033	003	005	449	004	236	004	003	004	001
A	Sand	PUR	0,000		0,007	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	058		463	896	001	003	004	004	005	004	001	001
A	Mille	PUR	0,140	0,007		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		033	463		011	001	112	004	005	004	004	005	001
A	Mille	PUR	0,000	0,017	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	003	896	011		001	004	005	004	001	004	001	002
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,248	0,000	0,467	0,000	0,575	0,934
K	ed		005	001	001	001		004	077	004	856	710	210	357
B	Sand	PUR	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,403	0,000	0,005	0,000	0,000
K	ed	+T	449	003	112	004	004		003	639	004	382	004	005
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,248	0,000		0,000	0,614	0,019	0,501	0,231
K	d		004	004	004	005	077	003		027	461	804	104	409
B	Mille	PUR	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,403	0,000		0,000	0,039	0,000	0,000
K	d	+T	236	004	005	004	004	639	027		004	824	005	004
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,467	0,000	0,614	0,000		0,006	0,828	0,441
B	ed		004	005	004	001	856	004	461	004		409	080	150
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,019	0,039	0,006		0,004	0,000
B	ed	+T	003	004	004	004	710	382	804	824	409		090	607
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,575	0,000	0,501	0,000	0,828	0,004		0,548
B	d		004	001	005	001	210	004	104	005	080	090		841
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,934	0,000	0,231	0,000	0,441	0,000	0,548	
B	d	+T	001	001	001	002	357	005	409	004	150	607	841	

Příloha 4 Duncanův test YP [mm] (klimatizované)

A	Sand	PUR		0,014	0,648	0,001	0,003	0,063	0,000	0,001	0,044	0,694	0,833	0,011
K	ed			111	961	191	433	839	481	363	856	205	370	732
A	Sand	PUR	0,014		0,036	0,426	0,608	0,503	0,313	0,446	0,000	0,005	0,021	0,912
K	ed	+T	111		010	307	539	864	567	499	009	041	434	609
A	Mille	PUR	0,648	0,036		0,005	0,011	0,124	0,002	0,005	0,018	0,429	0,780	0,032
K	d		961	010		108	903	997	388	564	115	573	927	792
A	Mille	PUR	0,001	0,426	0,005		0,734	0,171	0,791	0,949	0,000	0,000	0,002	0,471
K	d	+T	191	307	108		294	768	865	055	002	288	275	648
B	Sand	PUR	0,003	0,608	0,011	0,734		0,272	0,574	0,763	0,000	0,000	0,005	0,660
K	ed		433	539	903	294		798	516	752	002	972	964	158
B	Sand	PUR	0,063	0,503	0,124	0,171	0,272		0,114	0,181	0,000	0,028	0,086	0,467
K	ed	+T	839	864	997	768	798		069	138	105	990	497	508
B	Mille	PUR	0,000	0,313	0,002	0,791	0,574	0,114		0,760	0,000	0,000	0,000	0,351
K	d		481	567	388	865	516	069		183	002	105	979	345
B	Mille	PUR	0,001	0,446	0,005	0,949	0,763	0,181	0,760		0,000	0,000	0,002	0,489
K	d	+T	363	499	564	055	752	138	183		001	339	545	613
D	Sand	PUR	0,044	0,000	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,085	0,032	0,000
B	ed		856	009	115	002	002	105	002	001		924	116	008
D	Sand	PUR	0,694	0,005	0,429	0,000	0,000	0,028	0,000	0,000	0,085		0,573	0,003
B	ed	+T	205	041	573	288	972	990	105	339	924		587	993
D	Mille	PUR	0,833	0,021	0,780	0,002	0,005	0,086	0,000	0,002	0,032	0,573		0,018
B	d		370	434	927	275	964	497	979	545	116	587		530
D	Mille	PUR	0,011	0,912	0,032	0,471	0,660	0,467	0,351	0,489	0,000	0,003	0,018	
B	d	+T	732	609	792	648	158	508	345	613	008	993	530	

Příloha 5 Duncanův test YE [mm] (klimatizované)

A	Sand	PUR		0,990	0,007	0,428	0,000	0,075	0,000	0,000	0,015	0,014	0,000	0,000
K	ed			687	518	393	005	419	002	001	206	023	001	001
A	Sand	PUR	0,990		0,006	0,403	0,000	0,067	0,000	0,000	0,013	0,012	0,000	0,000
K	ed	+T	687		979	131	005	037	001	001	935	426	005	001
A	Mille	PUR	0,007	0,006		0,054	0,018	0,347	0,000	0,000	0,777	0,782	0,000	0,000
K	d		518	979		881	906	552	004	355	220	225	628	029
A	Mille	PUR	0,428	0,403	0,054		0,000	0,272	0,000	0,000	0,089	0,080	0,000	0,000
K	d	+T	393	131	881		024	880	001	005	689	698	004	001
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,018	0,000		0,001	0,002	0,189	0,011	0,013	0,240	0,059
K	ed		005	005	906	024		559	072	886	668	791	243	023
B	Sand	PUR	0,075	0,067	0,347	0,272	0,001		0,000	0,000	0,476	0,453	0,000	0,000
K	ed	+T	419	037	552	880	559		001	010	222	750	018	005
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000		0,069	0,000	0,000	0,049	0,210
K	d		002	001	004	001	072	001		354	004	005	557	315
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,189	0,000	0,069		0,000	0,000	0,825	0,506
K	d	+T	001	001	355	005	886	010	354		139	154	734	613
D	Sand	PUR	0,015	0,013	0,777	0,089	0,011	0,476	0,000	0,000		0,988	0,000	0,000
B	ed		206	935	220	689	668	222	004	139		886	279	012
D	Sand	PUR	0,014	0,012	0,782	0,080	0,013	0,453	0,000	0,000	0,988		0,000	0,000
B	ed	+T	023	426	225	698	791	750	005	154	886		319	012
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,240	0,000	0,049	0,825	0,000	0,000		0,408
B	d		001	005	628	004	243	018	557	734	279	319		579
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,059	0,000	0,210	0,506	0,000	0,000	0,408	
B	d	+T	001	001	029	001	023	005	315	613	012	012	579	

Příloha 6 Duncanův test pevnosti v ohybu [MPa] (máčené)

A	Sand	PUR		0,729	0,268	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed			447	809	009	001	005	004	003	001	004	001	004
A	Sand	PUR	0,729		0,404	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	447		439	011	001	004	003	011	001	004	005	004
A	Mille	PUR	0,268	0,404		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		809	439		003	005	004	011	009	001	003	004	004
A	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	009	011	003		001	001	004	004	002	004	001	005
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000		0,003	0,000	0,000	0,737	0,000	0,181	0,000
K	ed		001	001	005	001		887	004	004	740	004	866	074
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003		0,000	0,000	0,001	0,003	0,097	0,257
K	ed	+T	005	004	004	001	887		151	004	616	998	129	874
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,328	0,000	0,006
K	d		004	003	011	004	004	151		960	004	239	004	456
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	003	011	009	004	004	004	960		005	037	004	003
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,737	0,001	0,000	0,000		0,000	0,115	0,000
B	ed		001	001	001	002	740	616	004	005		004	027	024
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,328	0,000	0,000		0,000	0,063
B	ed	+T	004	004	003	004	004	998	239	037	004		009	766
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,181	0,097	0,000	0,000	0,115	0,000		0,007
B	d		001	005	004	001	866	129	004	004	027	009		316
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,257	0,006	0,000	0,000	0,063	0,007	
B	d	+T	004	004	004	005	074	874	456	003	024	766	316	

Příloha 7 Duncanův test LOP [MPa] (máčené)

A	Sand	PUR		0,106	0,336	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed			733	970	883	001	001	004	003	005	011	004	004
A	Sand	PUR	0,106		0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	733		706	014	001	005	004	011	004	009	004	003
A	Mille	PUR	0,336	0,013		0,049	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		970	706		786	001	001	004	004	001	003	005	004
A	Mille	PUR	0,004	0,000	0,049		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	883	014	786		002	001	005	004	001	004	001	004
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed		001	001	001	002		285	004	004	011	005	003	004
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,003	0,000	0,002	0,000
K	ed	+T	001	005	001	001	285		177	004	214	004	485	004
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,040	0,362	0,001	0,429	0,087
K	d		004	004	004	005	004	177		956	034	530	258	990
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,040		0,003	0,231	0,005	0,657
K	d	+T	003	011	004	004	004	004	956		869	877	807	821
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,362	0,003		0,000	0,853	0,012
B	ed		005	004	001	001	011	214	034	869		048	975	463
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,231	0,000		0,000	0,122
B	ed	+T	011	009	003	004	005	004	530	877	048		088	203
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,429	0,005	0,853	0,000		0,016
B	d		004	004	005	001	003	485	258	807	975	088		922
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,087	0,657	0,012	0,122	0,016	
B	d	+T	004	003	004	004	004	004	990	821	463	203	922	

Příloha 8 Duncanův test MOE [MPa] (máčené)

A	Sand	PUR		0,568	0,696	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed			054	020	251	001	001	003	011	005	004	004	004
A	Sand	PUR	0,568		0,368	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	054		494	191	001	005	011	009	004	004	003	004
A	Mille	PUR	0,696	0,368		0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		020	494		282	001	001	004	003	001	004	004	005
A	Mille	PUR	0,001	0,000	0,003		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	251	191	282		002	001	004	004	001	005	004	001
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000		0,971	0,000	0,000	0,743	0,000	0,000	0,024
K	ed		001	001	001	002		594	004	005	813	696	015	487
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,971		0,000	0,000	0,752	0,000	0,000	0,022
K	ed	+T	001	005	001	001	594		004	004	518	652	015	258
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,101	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		003	011	004	004	004	004		883	004	011	021	003
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,101		0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	011	009	003	004	005	004	883		004	003	011	004
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,743	0,752	0,000	0,000		0,001	0,000	0,037
B	ed		005	004	001	001	813	518	004	004		571	041	692
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001		0,318	0,234
B	ed	+T	004	004	004	005	696	652	011	003	571		724	965
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,318		0,037
B	d		004	003	004	004	015	015	021	011	041	724		599
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024	0,022	0,000	0,000	0,037	0,234	0,037	
B	d	+T	004	004	005	001	487	258	003	004	692	965	599	

Příloha 9 Duncanův test FP [N] (máčené)

A	Sand	PUR		0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed			325	042	003	005	004	011	055	001	003	004	004
A	Sand	PUR	0,019		0,056	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	325		989	011	001	004	003	011	001	004	005	004
A	Mille	PUR	0,000	0,056		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		042	989		026	001	005	004	003	001	004	001	004
A	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	003	011	026		001	001	004	004	002	004	001	005
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000		0,033	0,000	0,000	0,047	0,000	0,305	0,001
K	ed		005	001	001	001		940	005	004	331	315	678	033
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,033		0,007	0,000	0,000	0,132	0,229	0,219
K	ed	+T	004	004	005	001	940		815	004	052	752	158	249
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007		0,003	0,000	0,212	0,000	0,128
K	d		011	003	004	004	005	815		867	004	384	129	208
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003			0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	055	011	003	004	004	867			005	061	004	015
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,047	0,000	0,000	0,000		0,000	0,003	0,000
B	ed		001	001	001	002	331	052	004	005		004	721	004
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,132	0,212	0,000	0,000		0,008	0,714
B	ed	+T	003	004	004	004	315	752	384	061	004		914	237
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,305	0,229	0,000	0,000	0,003	0,008		0,020
B	d		004	005	001	001	678	158	129	004	721	914		168
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,219	0,128	0,000	0,000	0,714	0,020	
B	d	+T	004	004	004	005	033	249	208	015	004	237	168	

Příloha 10 Duncanův test FE [N] (máčené)

A	Sand	PUR		0,621	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed			028	012	003	001	005	004	003	004	009	004	011
A	Sand	PUR	0,621		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	028		016	011	001	001	004	004	005	011	004	003
A	Mille	PUR	0,000	0,000		0,502	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		012	016		424	001	001	005	004	001	003	004	004
A	Mille	PUR	0,000	0,000	0,502		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	003	011	424		002	001	001	004	001	004	005	004
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed		001	001	001	002		700	003	004	011	005	004	004
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,018	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	005	001	001	001	700		925	004	798	004	811	004
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,063	0,286	0,004	0,915	0,024
K	d		004	004	005	001	003	925		041	349	583	665	144
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,063			0,004	0,298	0,063
K	d	+T	003	004	004	004	004	004	041			420	490	642
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,018	0,286	0,004		0,000	0,271	0,001
B	ed		004	005	001	001	011	798	349	420		103	922	064
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,298	0,000		0,005	0,524
B	ed	+T	009	011	003	004	005	004	583	490	103		372	864
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,915	0,063	0,271	0,005		0,026
B	d		004	004	004	005	004	811	665	642	922	372		307
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,024	0,635	0,001	0,524	0,026	
B	d	+T	011	003	004	004	004	004	144	437	064	864	307	

Příloha 11 Duncanův test YP [mm] (máčené)

Sand	PUR		0,405 945	0,003 039	0,382 166	0,006 164	0,056 216	0,424 734	0,426 219	0,005 950	0,048 934	0,001 685	0,414 231
Sand	PUR +T	0,405 945		0,000 146	0,108 403	0,052 038	0,247 783	0,998 733	0,925 456	0,000 371	0,006 417	0,000 066	0,964 090
Mille	PUR	0,003 039	0,000 146		0,031 901	0,000 001	0,000 002	0,000 163	0,000 186	0,790 307	0,292 115	0,828 218	0,000 149
Mille	PUR +T	0,382 166	0,108 403	0,031 901		0,000 311	0,006 366	0,117 817	0,115 090	0,050 690	0,230 499	0,021 124	0,115 340
Sand	PUR	0,006 164	0,052 038	0,000 001	0,000 311		0,376 431	0,046 492	0,046 195	0,000 001	0,000 002	0,000 002	0,044 050
Sand	PUR +T	0,056 216	0,247 783	0,000 002	0,006 366	0,376 431		0,229 413	0,227 215	0,000 003	0,000 085	0,000 002	0,217 322
Mille	PUR	0,424 734	0,998 733	0,000 163	0,117 817	0,046 492	0,229 413		0,929 450	0,000 423	0,007 296	0,000 073	0,962 673
Mille	PUR +T	0,426 219	0,925 456	0,000 186	0,115 090	0,046 195	0,227 215	0,929 450		0,000 455	0,007 205	0,000 087	0,899 357
Sand	PUR	0,005 950	0,000 371	0,790 307	0,050 690	0,000 001	0,000 003	0,000 423	0,000 455		0,390 576	0,652 712	0,000 396
Sand	PUR +T	0,048 934	0,006 417	0,292 115	0,230 499	0,000 002	0,000 085	0,007 296	0,007 205	0,390 576		0,226 025	0,007 071
Mille	PUR	0,001 685	0,000 066	0,828 218	0,021 124	0,000 002	0,000 002	0,000 073	0,000 087	0,652 712	0,226 025		0,000 066
Mille	PUR +T	0,414 231	0,964 090	0,000 149	0,115 340	0,044 050	0,217 322	0,962 673	0,899 357	0,000 396	0,007 071	0,000 066	

Příloha 12 Duncanův test YE [mm] (máčené)

A	Sand	PUR		0,181 775	0,609 979	0,637 814	0,000 001	0,000 001	0,000 001	0,000 005	0,075 291	0,731 886	0,000 008	0,546 845
A	Sand	PUR +T	0,181 775		0,364 768	0,347 799	0,000 004	0,000 005	0,000 004	0,000 021	0,605 914	0,105 637	0,001 151	0,399 647
A	Mille	PUR	0,609 979	0,364 768		0,939 029	0,000 001	0,000 004	0,000 005	0,000 004	0,178 984	0,425 240	0,000 041	0,899 117
A	Mille	PUR +T	0,637 814	0,347 799	0,939 029		0,000 001	0,000 005	0,000 001	0,000 004	0,168 644	0,447 475	0,000 034	0,849 950
B	Sand	PUR	0,000 001	0,000 004	0,000 001	0,000 001		0,000 040	0,000 090	0,000 004	0,000 004	0,000 002	0,000 004	0,000 005
B	Sand	PUR +T	0,000 001	0,000 005	0,000 004	0,000 005	0,000 040		0,747 940	0,494 678	0,000 011	0,000 001	0,096 906	0,000 004
B	Mille	PUR	0,000 001	0,000 004	0,000 005	0,000 001	0,000 090	0,747 940		0,347 433	0,000 006	0,000 001	0,056 570	0,000 004
B	Mille	PUR +T	0,000 005	0,000 021	0,000 004	0,000 004	0,000 004	0,494 678	0,347 433		0,000 142	0,000 001	0,282 955	0,000 005
D	Sand	PUR	0,075 291	0,605 914	0,178 984	0,168 644	0,000 004	0,000 011	0,000 006	0,000 142		0,038 365	0,004 546	0,201 927
D	Sand	PUR +T	0,731 886	0,105 637	0,425 240	0,447 475	0,000 002	0,000 001	0,000 001	0,000 001	0,038 365		0,000 005	0,375 416
D	Mille	PUR	0,000 008	0,001 151	0,000 041	0,000 034	0,000 004	0,096 906	0,056 570	0,282 955	0,004 546	0,000 005		0,000 055
D	Mille	PUR +T	0,546 845	0,399 647	0,899 117	0,849 950	0,000 005	0,000 004	0,000 004	0,000 005	0,201 927	0,375 416	0,000 055	

Příloha 13 Duncanův test W (klimatizovaný)

A	Sand	PUR		0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,052	0,225	0,000	0,000	0,046	0,000
K	ed			851	025	003	004	004	809	854	001	005	251	144
A	Sand	PUR	0,005		0,097	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	851		468	120	004	005	006	115	001	001	006	004
A	Mille	PUR	0,000	0,097		0,088	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		025	468		173	005	001	004	003	001	001	004	004
A	Mille	PUR	0,000	0,001	0,088		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	003	120	173		001	001	004	004	002	001	004	005
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000		0,380	0,000	0,000	0,007	0,013	0,000	0,001
K	ed		004	004	005	001		786	003	004	211	869	012	608
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,380		0,000	0,000	0,058	0,090	0,000	0,000
K	ed	+T	004	005	001	001	786		004	004	811	544	003	090
B	Mille	PUR	0,052	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,407	0,000	0,000	0,898	0,060
K	d		809	006	004	004	003	004		306	004	004	566	930
B	Mille	PUR	0,225	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,407		0,000	0,000	0,371	0,008
K	d	+T	854	115	003	004	004	004	306		005	004	255	722
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,058	0,000	0,000		0,764	0,000	0,000
B	ed		001	001	001	002	211	811	004	005		625	004	004
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,090	0,000	0,000	0,764		0,000	0,000
B	ed	+T	005	001	001	001	869	544	004	004	625		004	003
D	Mille	PUR	0,046	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,898	0,371	0,000	0,000		0,064
B	d		251	006	004	004	012	003	566	255	004	004		526
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,060	0,008	0,000	0,000	0,064	
B	d	+T	144	004	004	005	608	090	930	722	004	003	526	

Příloha 14 Duncanův test IBS (klimatizovaný)

A	Sand	PUR		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,305	0,878	0,000	0,000	0,054	0,000
K	ed			252	013	004	004	004	018	383	005	004	140	457
A	Sand	PUR	0,000		0,429	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	252		837	739	004	005	006	311	001	001	004	004
A	Mille	PUR	0,000	0,429		0,020	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		013	837		774	005	001	004	026	001	001	004	004
A	Mille	PUR	0,000	0,002	0,020		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	004	739	774		001	001	004	003	002	001	004	005
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000		0,420	0,000	0,000	0,007	0,014	0,000	0,002
K	ed		004	004	005	001		401	003	004	682	056	014	300
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,420		0,000	0,000	0,052	0,078	0,000	0,000
K	ed	+T	004	005	001	001	401		004	004	587	672	003	178
B	Mille	PUR	0,305	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,269	0,000	0,000	0,315	0,011
K	d		018	006	004	004	003	004		156	004	004	830	043
B	Mille	PUR	0,878	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,269		0,000	0,000	0,044	0,000
K	d	+T	383	311	026	003	004	004	156		001	005	723	307
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,052	0,000	0,000		0,777	0,000	0,000
B	ed		005	001	001	002	682	587	004	001		052	004	004
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,078	0,000	0,000	0,777		0,000	0,000
B	ed	+T	004	001	001	001	056	672	004	005	052		004	003
D	Mille	PUR	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,315	0,044	0,000	0,000		0,099
B	d		140	004	004	004	014	003	830	723	004	004		624
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,099	
B	d	+T	457	004	004	005	300	178	043	307	004	003	624	

Příloha 15 Duncanův test W (Máčené)

A	Sand	PUR		0,752	0,279	0,008	0,000	0,000	0,000	0,032	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed			763	258	180	005	004	997	367	001	001	004	004
A	Sand	PUR	0,752		0,189	0,003	0,000	0,000	0,002	0,053	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	763		104	875	004	004	331	468	005	001	003	004
A	Mille	PUR	0,279	0,189		0,094	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		258	104		749	001	004	017	621	001	001	004	005
A	Mille	PUR	0,008	0,003	0,094		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	180	875	749		001	005	004	006	001	002	004	001
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000		0,466	0,000	0,000	0,012	0,006	0,392	0,631
K	ed		005	004	001	001		076	945	010	688	125	054	682
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,466		0,008	0,000	0,001	0,000	0,862	0,763
K	ed	+T	004	004	004	005	076		180	146	958	664	095	184
B	Mille	PUR	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,008		0,222	0,000	0,000	0,009	0,004
K	d		997	331	017	004	945	180		865	004	004	915	049
B	Mille	PUR	0,032	0,053	0,001	0,000	0,000	0,000	0,222		0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	367	468	621	006	010	146	865		004	005	221	050
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,001	0,000	0,000		0,721	0,001	0,004
B	ed		001	005	001	001	688	958	004	004		778	290	170
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,721		0,000	0,001
B	ed	+T	001	001	001	002	125	664	004	005	778		398	621
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,392	0,862	0,009	0,000	0,001	0,000		0,658
B	d		004	003	004	004	054	095	915	221	290	398		047
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,631	0,763	0,004	0,000	0,004	0,001	0,658	
B	d	+T	004	004	005	001	682	184	049	050	170	621	047	

Příloha 16 Duncanův test IBS (Máčené)

A	Sand	PUR		0,219	0,576	0,046	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed			933	493	152	001	004	007	428	001	001	004	005
A	Sand	PUR	0,219		0,454	0,001	0,000	0,000	0,000	0,071	0,000	0,000	0,000	0,000
K	ed	+T	933		466	783	004	004	617	975	005	001	003	004
A	Mille	PUR	0,576	0,454		0,014	0,000	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d		493	466		517	005	004	039	730	001	001	004	004
A	Mille	PUR	0,046	0,001	0,014		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	152	783	517		001	005	004	005	001	002	004	001
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000		0,537	0,000	0,000	0,023	0,016	0,524	0,543
K	ed		001	004	005	001		754	272	004	091	505	377	255
B	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,537		0,001	0,000	0,005	0,003	0,959	0,957
K	ed	+T	004	004	004	005	754		980	004	931	367	062	968
B	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001		0,084	0,000	0,000	0,001	0,002
K	d		007	617	039	004	272	980		036	004	004	653	113
B	Mille	PUR	0,003	0,071	0,014	0,000	0,000	0,000	0,084		0,000	0,000	0,000	0,000
K	d	+T	428	975	730	005	004	004	036		004	005	012	006
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,023	0,005	0,000	0,000		0,815	0,006	0,005
B	ed		001	005	001	001	091	931	004	004		219	004	565
D	Sand	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,003	0,000	0,000	0,815		0,003	0,003
B	ed	+T	001	001	001	002	505	367	004	005	219		285	341
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,524	0,959	0,001	0,000	0,006	0,003		0,922
B	d		004	003	004	004	377	062	653	012	004	285		882
D	Mille	PUR	0,000	0,000	0,000	0,000	0,543	0,957	0,002	0,000	0,005	0,003	0,922	
B	d	+T	005	004	004	001	255	968	113	006	565	341	882	