

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta lesnická a dřevařská**



**Fakulta lesnická  
a dřevařská**

**Diplomová práce**

**2024**

**Bc. Vostřák Radek**

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra lesnické a dřevařské ekonomiky



**Fakulta lesnická  
a dřevařská**

**Mechanické vlastnosti vrstvených materiálů na bázi  
kombinace měkkého a tvrdého dřeva**

Diplomová práce

Autor: Bc. Radek Vostřák

Vedoucí práce: Ing. Adam Sikora Ph.D.

2024

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Radek Vostřák

Dřevařské inženýrství

Název práce

**Mechanické vlastnosti vrstvených materiálů na bázi kombinace měkkého a tvrdého dřeva**

Název anglicky

**Mechanical properties of laminated materials based on a combination of soft and hard wood**

### Cíle práce

Cílem práce je analýza vlivu kombinace měkkých a tvrdých druhů dřeva ve skladbě specifického vrstveného materiálu a jejich dopad na výsledné ohybové vlastnosti. Z tvrdých dřevin bude v rámci samotného experimentálního měření použít Akát z měkkých Olše, Bříza a Douglaska. Vzájemné spojení jednotlivých vrstev bude zabezpečeno pomocí PUR a PVAc adheziv. Na základě statistického vyhodnocení budou stanoveny významnosti jednotlivých sledovaných faktorů.

### Metodika

Metodika:

1. Literární rozbor problematiky tvorby vrstveného dřeva, skladby vrstveného dřeva a jejich dopadů na mechanické vlastnosti.
2. Navržení metodiky experimentálního měření.
3. Experimentální zjištění vlivu vybraných faktorů na sledované ohybové charakteristiky.
4. Statistické vyhodnocení.
5. Členění práce – úvod, cíl práce, literární rozbor, výsledky, diskuse, závěr, použitá literatura a souhrn.

Harmonogram řešení práce:

1. Koncepční řešení práce (odevzdání do 1.10. 2023).
2. Analýza problematiky s důrazem na téma práce (odevzdání do 1.12. 2023).
3. Praktická část práce (odevzdání do 1.2. 2024).
4. Zpracování výsledků (odevzdání do 15.2. 2024).
5. Závěr (odevzdání do 1.3. 2024).

**Doporučený rozsah práce**

60 stran

**Klíčová slova**

Vrstvené dřevo; Mechanické vlastnosti; Ohybové namáhání

**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.
- 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 .
- Bucur, V. (2014). „Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites,” Springer, pp. 401. ISBN: 9400789726 .
- Frese, H., a Blaß. (2006). „Characteristic bending strenght of beech glulam,” *Material and Structures*, 40(1). DOI: 10.1617/s11527-006-9117-9.
- Pizzi, A. (1989). „Wood Adhesives: Chemistry and Technology,” Marcel Dekker Inc., New York, ISBN 0-8247-8052-3.
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., a Babiak, M. (1993). „Štruktúra a Vlastnosti Dřeva,” *Príroda a. s.*, Bratislava, Slovakia. pp. 486.
- 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**

2023/24 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. Adam Sikora, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 9. 5. 2023

**doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 28. 7. 2023

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 13. 03. 2024



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Mechanické vlastnosti vrstvených materiálů na bázi kombinace měkkého a tvrdého 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 10. 4. 2024

.....

Bc. Radek Vostřák

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Adamu Sikorovi, Ph.D. za jeho trpělivost, pomoc a odborné rady při vedení mé práce.

Také bych chtěl poděkovat celé mé rodině i kamarádům, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá mechanickými vlastnostmi lepeného lamelového dřeva, jehož skladba je tvořena kombinací vybraných druhů dřev. V rámci práce je také řešena problematika aplikace různých typů adheziv. Konkrétně se jedná o polyuretanové (PUR) a polyvinylacetátové (PVAc) lepidlo. Práce je rozdělena do dvou částí. V první části je proveden teoretický rozbor, na základě kterého byla řešena praktická část práce, která využívá teoretické poznatky spojené s řešenou problematikou. V diplomové práci byl řešen čtyřbodový ohyb lepeného lamelového dřeva a na základě zjištěných výsledků byly formulovány závěry a přínosy práce. Výsledkem práce bylo zhodnocení, zda jsou jednotlivé druhy použitého dřeva vhodné pro výrobu lepeného lamelové dřeva. Kromě kombinací jednotlivých skladeb vrstveného materiálu byla také řešena skladba skládající se pouze z referenčního akátového dřeva. Z výsledků vyplývá, že lze dosáhnout lepších ohybových vlastností lepeného lamelového dřeva určitými kombinacemi jejich skladby, obzvláště kombinace akátového a březového dřeva se jevila pozitivně. Další pozitivní variantou je akátové dřevo kombinované s douglaskou, kdy dosažené vlastnosti byly podobné, jaké měly celoakátové zkušební soubory, ale s nižší hmotností testovaného prvku. Z výsledků dále vyplývá, že polyvinylacetátové (PVAc) lepidlo nedosahuje stejných výsledků jako daleko vhodnější polyuretanové (PUR) lepidlo.

## **Klíčová slova**

vrstvené lamelové dřevo, mechanické vlastnosti, čtyřbodový ohyb, modul pružnosti, pevnost v ohybu, akát, břiza, olše, douglaska

## **Abstract**

The thesis deals with the mechanical properties of glued laminated timber, the composition of which consists of a combination of selected wood species. The work also deals with the application of different types of adhesives. In particular, polyurethane (PUR) and polyvinyl acetate (PVAc) adhesives are used. The thesis is divided into two parts. In the first part, the theoretical analysis is developed, on the basis of which the practical part of the thesis was solved, which uses the theoretical knowledge related to the problem addressed. In the thesis, the four-point bending of glued laminated timber was solved and based on the results obtained, the conclusions and contributions of the thesis were formulated. As a result of the thesis, it was evaluated whether the different types of wood used are suitable for the production of glued laminated timber. In addition to the combinations of the different compositions of laminated material, a composition consisting only of reference acacia wood was also addressed. The results show that better bending properties of glued laminated timber can be achieved by certain combinations of their composition, especially the combination of acacia and birch wood appeared to be positive. Another positive variant is acacia wood combined with Douglas fir, where the properties obtained were similar to those of the all-acacia test sets, but with a lower weight of the tested element. The results further indicate that polyvinyl acetate (PVAc) adhesive does not achieve the same results as the far more suitable PUR adhesive.

## **Key words**

glued laminated timber, mechanical properties, four-point bending, modulus of elasticity; flexural strength, acacia, birch, alder, douglas-fir

# Obsah

|   |    |
|---|----|
| Seznam použitých zkratk a symbolů .....                             | 11 |
| Úvod .....  | 13 |
| Cíle práce.....   | 15 |
| 1. Rozbor problematiky .....  | 16 |
| 1.1 Lepené lamelové dřevo .....                                     | 16 |
| 1.2 Trnovník akát .....   | 19 |
| 1.3 Bříza bělokorá .....  | 20 |
| 1.4 Olše lepkavá .....  | 21 |
| 1.5 Douglaska tisolistá .....                                       | 21 |
| 1.6 Proces lepení a faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje..... | 22 |
| 1.6.1 Struktura a pórovitost dřeva .....                            | 22 |
| 1.6.2 Chemické složení dřeva .....                                  | 23 |
| 1.6.3 Chemické účinky lepidla na dřevo .....                        | 24 |
| 1.6.4 Chemické účinky dřeva na lepené spoje .....                   | 25 |
| 1.6.5 Vlhkost podkladu .....  | 25 |
| 1.6.6 Kvalita opracování povrchu .....                              | 26 |
| 1.6.7 Nános lepidla.....  | 26 |
| 1.6.8 Parametry vztažené k lepidlu .....                            | 27 |
| 1.6.9 Lisovací parametry .....                                      | 28 |
| 1.7 Teorie tvorby lepeného spoje .....                              | 29 |
| 1.7.1 Koheze.....   | 30 |
| 1.7.2 Smáčivost .....   | 31 |
| 1.7.3 Polarita .....  | 31 |
| 1.7.4 Mezimolekulární síly.....                                     | 32 |
| 1.8 Reologie lepidel.....   | 32 |
| 1.9 Použitá lepidla .....   | 34 |

|   |    |
|---|----|
| 1.10 Ohybové vlastnosti .....                 | 35 |
| 2. Metodika.....                              | 41 |
| 3. Výsledky a diskuse.....                    | 49 |
| 4. Závěr.....                                 | 60 |
| 5. Seznam literatury a použitých zdrojů ..... | 61 |
| 6. Seznam obrázků, tabulek a grafů .....      | 66 |
| 7. Seznam příloh.....                         | 67 |
| 8. Přílohy .....                              | 68 |

## Seznam použitých zkratek a symbolů

|                   |   |
|-------------------|---|
| AK                | Akát  |
| ČSN EN            | Česká státní norma harmonizovaná s evropskými normami |
| BSH               | Lepené lamelové hranoly                               |
| BR                | Bříza   |
| b                 | Šířka vzorku  |
| cm                | Centimetr   |
| DG                | Douglaska   |
| D3 a D4           | Označení vodotěsnosti lepidla                         |
| g                 | Gramy   |
| Glulam            | Lepené lamelové desky                                 |
| h                 | Tloušťka vzorku                                       |
| kg/m <sup>3</sup> | kilogram na metr krychlový                            |
| L/l               | Délka   |
| LOP               | Limit of proportionality / mez úměrnosti              |
| m                 | Metry   |
| m <sup>2</sup>    | Metry čtvereční                                       |
| m <sup>3</sup>    | Metry krychlové                                       |
| max.              | Maximální   |
| min.              | Minimální   |
| mm                | Milimetry   |
| MOE               | Modulus of elasticity / modul pružnosti               |
| MOR               | Modulus of Rupture / ohybová pevnost                  |
| MPa               | Megapascal  |

|             |   |
|-------------|---|
| $M_{0,max}$ | Maximální ohybový moment                |
| N           | Newton                                  |
| N·m         | Newton na metr                          |
| ot/min      | Otáčky za minutu                        |
| OL          | Olše                                    |
| P           | Plocha lisovaných dílců v etáži         |
| $P_c$       | Celková síla, kterou působí písty       |
| $P_s$       | Měrný tlak na lisovací plochu           |
| PUR         | Polyuretanové lepidlo                   |
| PVAc        | Polyvinylacetátové lepidlo              |
| $R_{min}$   | Minimální poloměr                       |
| rad         | Radiální směr                           |
| tg          | Tangenciální směr                       |
| $t_k$       | Čas vytvrzení lepicí směsi              |
| $t_p$       | Čas potřebný k prohřátí lisované vrstvy |
| t           | Tun                                     |
| tvz.        | Takzvané                                |
| viz.        | videre licet / je dovoleno vidět        |
| W/m·K       | Watt na metr a kelvin                   |
| $W_0$       | Modul průřezu                           |
| %           | Procenta                                |
| $\sigma$    | Sigma                                   |
| °C          | Stupně Celsia                           |
| $\lambda$   | Součinitel tepelné vodivosti            |



## Úvod

Lepení jako takové je starý proces, který využívali již Egypťané. Tato technika se postupně vyvíjela, zejména díky pokrokům v oblasti chemie. Největší posun přinesla nejspíše průmyslová revoluce a samozřejmě dnešní doba. Od prvního procesu lepení uběhla dlouhá doba a vývoj v oblasti lepení tak zaznamenal značné pokroky. S využitím nových technologií se začaly vyvíjet nové druhy lepidel, díky kterým jsme schopni lepit věci u kterých si to člověk v minulosti nedokázal představit. Mezi zástupce tohoto lepení můžeme zařadit například lepení nosných vazníků střech, stropů nebo jiných konstrukcí (Briš *et al.* 2017).

Problematika kombinování různých druhů dřeva ve vrstvených materiálech i přes tyto pokroky představuje značnou výzvu. Dřeva s různými povrchovými charakteristikami vyžadují pečlivý výběr a aplikaci lepidel, aby bylo dosaženo optimálního spojení. Moderní lepidla musí být formulována tak, aby reagovala s různými povrchovými chemiemi a zajišťovala silnou a trvalou vazbu mezi vrstvami. Tento proces často zahrnuje předběžné úpravy povrchu, jako je broušení nebo aplikace základních vrstev, které zlepšují kompatibilitu mezi dřevem a lepidlem. Pokroky v oblasti lepení tak umožňují inovace ve výrobě dřevěných konstrukcí, od otevírání nových možností v designu a architektuře až po zlepšování vlastností a trvanlivosti výrobků. Význam lepení se tak neustále rozšiřuje a stává se nezbytným prvkem pro dosažení nových úrovní kvality a funkčnosti ve výrobě a použití dřevěných materiálů (Bucur 2014; Roffael 2016).

V dnešní době, kdy se klade velký důraz na ekologickou stránku projektů, dostává dřevo a výrobky z něj ještě větší prostor, než tomu bylo v minulé době. Jelikož je dřevo obnovitelný materiál, Evropská unie s ním počítá ve svém nejmambicióznějším projektu The European Green Deal neboli Zelená dohoda pro Evropu. Zde hraje poměrně zásadní roli v konstrukčních materiálech. Dřevo váže CO<sub>2</sub> nejen při svém růstu, ale také i po svém zpracování do výrobku, je dřevo schopno vázat volný CO<sub>2</sub>. Navíc jsou dřevěné prvky po konci svého života tzv. upcyklovány a dají se tedy použít i pro jiný účel (Evropská unie 2024).

Za těchto okolností je tedy jasné, že konstrukční prvky ze dřeva budou stále více prosazovány a bylo by vhodné se s touto problematikou vypořádat co nejdříve. V dnešní době samozřejmě využíváme lepeného lamelového dřeva pro konstrukční účely. Ovšem naprostá většina těchto konstrukcí je lepena ze smrkových lamel. Jak nám ukázala kůrovcová kalamita například z let 2003-2010 nebo aktuálnější kalamita, která probíhala od roku 2015 v podstatě do současnosti, nemůžeme se spoléhat na české monokultury smrkových porostů. Dříve se smrk

vysazoval na 60 % zalesňovaného území. Dnes má smrk zastoupení pouze na 30 % zalesňovaného území. Každý rok se vysadí více listnatých dřevin. Dbá se na to, aby opět nevznikaly monokultury jako byly doposud se smrkem. To znamená, že dřeviny, které byly několik let upozaděvány jsou v dnešní době opět hromadně vysazovány a my se musíme připravit na jejich zpracovávání a výrobu vhodných materiálu z nich. Mezi tyto dřeviny bychom mohli zařadit břizu, douglasku nebo olši (Böhm a Bomba 2012; Nagler 2019; Ministerstvo zemědělství 2023).

Než vyrostou první dřeviny do požadovaných objemů, uplyne dlouhá doba. Ovšem již nyní bychom se měli zaměřit na možnosti využití jednotlivých dřevin a zkoumat jejich možný potenciál pro použití v konstrukčních prvcích.

## **Cíle práce**

Cílem této práce je podrobně analyzovat a porovnat vhodnost různých druhů dřeva a specifických lepidel pro výrobu lepeného lamelového dřeva s ohledem vlivu skladby na mechanické vlastnosti výsledného materiálu. Práce klade důraz nejen na výběr konkrétního druhu dřeva, ale také na význam a dopad různých adheziv na finální vlastnosti lamelového dřeva. Cílem je analyzovat, jak kombinace vybraných dřevin a použitých lepidel ovlivňuje celkovou strukturu a mechanickou odolnost materiálu, a to zejména jeho kontextu v praxi.

## 1. Rozbor problematiky

V této kapitole jsou rozebrány znalosti získané studiem odborné literatury a jiných zdrojů.

### 1.1 Lepené lamelové dřevo

Komerčně je lepené lamelové dřevo označováno BSH nebo Glulam. Označení vyplývá z německého Brettschichtholz tedy lepené lamelové hranoly nebo z anglického glue laminated timber neboli lepené lamelové desky.

Lepení pro spojování dřevěných konstrukcí bylo známo několik století před tím, než na počátku 20. století, německý tesař Otto Hetzer získal jako první patent na zakřivené lepené prvky složené z více lamel. Tento průlom v technologii dřevěných nosníků zapříčinil, že se mohly vyrábět konstrukce, které byly delší a měly větší průřez. Do severní Ameriky tato technologie dorazila s několika ročním zpožděním, konkrétně v roce 1934. Zde tuto technologii proslavil Max Hanisch st. (Lehman 2018).

Další velký posun pro lepené lamelové dřevěné (BSH) konstrukce nastal se zavedením voděodolného fenol-resorcinového lepidla. Použitím tohoto lepidla se konstrukce mohly umísťovat i do exteriéru bez strachu o degradaci použitého lepidla. Zároveň během druhé světové války se používání těchto konstrukcí značně rozšířilo z důvodu nedostatku oceli ve stavebnictví. Veškerá ocel v této době mířila na válečné účely (Rhude 1996).

Jednou z nejzásadnějších výhod tohoto materiálu je možnost vyrábět velké rozmezí dimenzí jak na délku, tak na výšku. Zároveň se z toho materiálu dají také vytvářet různé tvary. Za pomoci lepení jednotlivých lamel můžeme využít i rozdílné dřeviny o různých pevnostech, kvůli lepším mechanickým vlastnostem nebo kvůli snížení hmotnosti výsledných nosníků. Hmotnost těchto prvků se pohybuje mezi 400–1000 kg/m<sup>3</sup>. Nesmí se zapomínat na větší odolnost vůči trhlinám, větší tvarovou stálost a celkovou stabilitu prvků než obyčejné řezané dřevo. Mají také vyšší vlhkostní odolnost než konstrukce z oceli (Böhm a Bomba 2012).

Při výrobě tohoto materiálu je potřeba většího množství dřeva, což je dáno vysokými nároky na kvalitu dřevěných lamel, které se poté lepí k sobě. Z tohoto důvodu se při výrobě tohoto materiálu musí brát v potaz udržitelný způsob zpracování a obnovování lesních porostů. Cena výsledného produktu také roste s výše zmíněnou požadovanou kvalitou řeziva z důvodu menší výtěžnosti. Také při používání lepených spojů roste výsledná cena produktu.

V následující tabulce můžeme porovnat další dřevěné materiály, které se mohou používat na výrobu nosníků. V této tabulce jsou uvedeny charakteristické hodnoty (výpočtové), konkrétně spodní 5% kvantil. Tato hodnota zajišťuje, že minimálně 95 % hodnot u jednotlivých vlastností budou vyšší než uvedená hodnota.

Tabulka 1: Srovnání mechanických vlastností materiálů (zdroj: Mudra 2011)

| Vlastnosti                           | Lepené nosníky -<br>Glulam GL 24h | LVL - Microllam<br>1.9E | LVL - Kerto-S | LVL - Kerto-Q | PSL - Parallam 2.0E | LSL - TimberStrand<br>1.5E |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------------|----------------------------|
| <b>Pevnost v ohybu (MPa)</b>         | 24                                | 21                      | 17-20         | 18            | 16,8                | 13,1                       |
| <b>Modul pružnosti v ohybu (MPa)</b> | 11 600                            | 14 500                  | 13 000        | 10 000        | 12 750              | 10 300                     |
| <b>Hustota (kg/m<sup>3</sup>)</b>    | 380                               | 720                     | 480           | 480           | 710                 | 668                        |

## Výroba BSH

Pro výrobu BSH se využívají dřevěné deskové lamely, které musí být vysušeny na předepsanou vlhkost. Tato vlhkost bývá mezi 8-15 %. Do konců těchto lamel se vyfrézují zubové spoje a za pomoci lepidla se dvě lamely vždy spojí k sobě. Na spoj působí tlak po předem předepsanou dobu. Záleží vždy na postupu výrobce, obvykle 2-3 vteřiny. Na takto spojené lamely se nechá zaschnout lepidlo přibližně 8 hodin bez žádného opracování. Po uplynutí této doby se lamela ohobluje ze spodní a horní strany (strany na lepení), kvůli vyrovnaní nerovností při použití zubového spoje. Na tyto strany se nanese lepidlo. V této chvíli lamely nesmí mít větší vlhkost nežli 15 %. Slepěný celek se umístí do lisu, kde je dle vlastností použitého lepidla nechán, aby lepidlo vytvrdlo. Jedná se o proces v řádu hodin přibližně 5-6. Posledním krokem po vyndání celku z lisu je finální povrchová úprava a egalizace na požadované rozměry (Reisner a Böhm 2010; Böhm a Bomba 2012).

Velkou výhodou této technologie není jen to, že jsme díky ní schopni překlenout velké rozpory budov, ale její přednost je jednoznačně v možnosti vytvářet zakřivené prvky. Tyto prvky mohou dosahovat výška až 2,5 m. Nejčastěji jsou ve tvaru obdélníku, mohou se ovšem použít i v průřezu T, I nebo například kruhu. Glulam je také oblíbený i pro svou skvělou požární bezpečnost. Jednotlivé lamely odhořívají pomaleji a konstrukce tedy svou pevnost ztrácí dostatečně pomalu pro případnou evakuaci osob uvnitř hořící budovy. Nejčastěji se tento prvek využívá při stavbě stadionů, sportovních hal, výstavních pavilonů, hřebčínů a dalších. Díky

svému dobrému poměru hmotnosti a pevnosti, je využíván u staveb, kde hraje svou roli i přeprava z fabriky na místo výstavby. Pokud by nám vlastnosti samotného dřeva nestačily a potřebovali bychom prvek, který bude mít lepší únosnost nebo ohybovou tuhost, můžeme mezi jednotlivé lamely použít vyztužovací pásy s vlákny s vyšší pevností. V České republice se vyrábějí prvky, které mají rozměry 35 m x 2 m x 0,24 m. Za určitých okolností jsou firmy schopny vyrobit prvky s délkou až 50 m. U těchto prvků však bývá komplikovaná přeprava a v našich podmínkách se s těmito rozměry příliš nesetkáme. Pokud bychom i přesto potřebovali prvek větší, řeší se to spojením více prvků do jednoho. Maximální poloměr zakřivení u těchto prvků je udáván  $R_{\min} = 1,5$  m při maximální výšce průřezu 2,5 m (Kuklík 2005; Reisner a Böhm 2010; Böhm a Bomba 2012; Processing - Wood 2020).

BSH je nejvíce namáháno na ohyb. Nosník z BSH, pokud je zatížený, má tendenci se vracet do původního stavu. Toto namáhání nejčastěji nosník nevydrží v nejslabším místě, a to je většinou spoj, popřípadě vada dřeva jako je suk. Pro zajištění co nejkvalitnějšího nosníku, musíme dbát na kontrolu při výrobě. Vše začíná u výběru vysokojakostního dřeva a kontrolu provedení zubového spoje. Kvalitní prvek musí mít všechny operace na vysoké úrovni, jelikož každý výrobek je tak kvalitní jako jeho nejslabší prvek (Kuklík 2005).

Z důvodu sesychání jednotlivých dřevěných lamel, musíme dodržovat určité konstrukční úpravy těchto lepených prvků. Pokud bychom měli prvek širší než 200 mm musí být lamely opatřeny drážkami. Popřípadě musíme použít dvě lamely vedle sebe. Využitím lepení jednotlivých lamel a rozdělením nebo vyselektováním suků vzniká téměř homogenní materiál. Používáním lamel s různou pevností můžeme také ovlivňovat celkovou pevnost materiálu. Například u ohýbaných prvků využijeme pevnější prvky do krajů a prvky s menší pevností můžeme použít do středu. Popřípadě můžeme využít již zmíněné vysoko pevnostní vlákna (Shukla a Kamdem 2008; Reisner a Böhm 2010; Macháček 2016).

## 1.2 Trnovník akát

Latinský název: *Robinia pseudoacacia L.*

Hustota: 760 kg/m<sup>3</sup>

Mez pevnosti dřeva v ohybu: 102 MPa

Modul pružnosti dřeva: 11 000 MPa

Akát patří mezi listnaté dřeviny s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva. Akát je jádrová dřevina a běl s jádrem jsou od sebe velice dobře rozeznatelné. Šířka běle je pouze několik centimetrů, můžeme ji tedy označit za úzkou. Barva běle je žlutobílá. Oproti tomu jádro je žluté až zelenohnědé. Na příčném řezu můžeme pozorovat vpichy po makrocévách, jež se objevují v jarním dřevě. V letním dřevě můžeme nacházet charakteristické tečkování. Rozřezáním makrocév vznikají v příčném řezu rýžky. Na radiální řezu můžeme pozorovat úzké dřevěné paprsky v podobě drobných zrcátek. Textura dřeva se využívá jako dekorativní prvek (Gryc *et al.* 2010; Zeidler a Borůvka 2016).

Mezi největší přednosti akátu patří jeho tvrdost, pevnost, ohybnost a houževnatost. Jeho nevýhoda je hlavně v jeho točitém uspořádání dřevních vláken a jeho hustota z pohledu hmotnosti. Pokud chceme akátové dřevo sušit, musí proces sušení probíhat pomalu, aby nedocházelo ke vzniku výsušných trhlin. Jeho dřevo se dobře opracovává a povrchově upravuje. Jádro akátu patří do kategorie velmi trvanlivé a je také odolné proti dřevokaznému hmyzu, houbám a povětrnostním podmínkám (Gryc *et al.* 2010).

Při mikroskopickém popisu dřeva akátu se zaměřujeme hlavně na cévy, vlákna, parenchym a ray buňky. Cévy jsou hlavním prvkem vodivého systému dřeva. Akát má cévy velké a jsou tedy dobře viditelné pod mikroskopem. U Akátu jsou cévy rozmístěny v řadách a jedná se tedy o kruhovitě pórovitou dřevinu. Cévy letního dřeva mohou být ve shlucích nebo jednotlivě. Cévy mají jednoduchou perforaci a letní dřevo obsahuje cévy se spirálními ztluštěninami. Vlákna představují podpůrnou strukturu dřeva. Vlákna jsou tenká a dlouhá a mají velký obsah ligninu tedy zajišťují jeho pevnost a tuhost. To činí akát vhodným konstrukčním materiálem i pro lepenou technologii. Často se vyskytuje tenkostěnný thyl. Dřevěné paprsky jsou homogenní a 1 až 5 vrstvé. Axiální parenchym je paratracheální, vazicentrický až vazicetrický křídlovitý. Dřevo akátu obsahuje mnoho extraktivních látek. Můžeme mezi ně zařadit flavonoidy, třísloviny, isoflavony, terpenoidy a esenciální olej, v omezené míře také alkaloidy

a fytosteroly. Konkrétní složení je celulóza 40-50 %, hemicelulóza 15-22%, Lignin 25-30 % a 2-4 % extraktivních látek (Molnár a Bariska 2002; Zeidler a Borůvka 2016).

### 1.3 Bříza bělokorá

Latinský název: *Betula pendula*

Hustota: 673 kg/m<sup>3</sup>

Mez pevnosti dřeva v ohybu: 132 MPa

Modul pružnosti dřeva: 14 000 MPa

Bříza je roztroušeně pórovitá, listnatá dřevina. Póry nemůžeme pozorovat pouhým okem. Jedná se o bělovou dřevinu, tudíž nevytváří jádro. U břízy ovšem může dojít k vytvoření tzv. nepravého jádra. Tento jev nastává, pokud je dřevina vystavena nepříznivým vlivům prostředí. Nepravé jádro ovlivňuje možnosti využití dřeva a tím snižuje jeho hodnotu. Barva se pohybuje mezi bílou s jemně žlutavým nádechem. Na radiálním řezu můžeme pouhým okem pozorovat dřeňové paprsky a tmavé dřeňové skvrny. Kresba dřeva je jednoduchá a tedy nevýrazná. Můžeme se setkat s druhy bříz, které mají svou kresbu dekorativní. Mezi tyto druhy bříz můžeme zařadit karelskou (finskou) břízu. Dřevo břízy je bráno za polotvrdé, má dobré mechanické vlastnosti a její využití je široké (Reisner a Zeidler 2010; Zeidler a Borůvka 2016).

Bříza je listnatá dřevina roztroušeně pórovitá. Cévy mohou být uspořádány buď jednotlivě nebo jsou v krátkých radiální řadách dvě až čtyři buňky. Můžeme pozorovat drobné ztenčeniny v místě styku cév a dřeňových paprsků. Dřevo má žebříčkovitou perforaci cév. Dřeňové paprsky se vyskytují jak homogenní, tak heterogenní a jsou jedno až čtyřvrstevné. Axiální parenchym je apotracheální a rozptýlený. Díky své relativně jednoduché a homogenní struktuře a dobré opracovatelnosti je březové dřevo přizpůsobeno pro vytvoření pevných spojů. Bříza je specifická obsahem betulinu, bílého voskovitého terpenu, který dodává kůře břízy charakteristickou bílou barvu (Reisner a Zeidler 2010; Zeidler a Borůvka 2016).



## 1.4 Olše lepkavá

Latinský název: *Alnus glutinosa*

Hustota: 523 kg/m<sup>3</sup>

Mez pevnosti dřeva v ohybu: 91 MPa

Modul pružnosti dřeva: 9 500 MPa

Jedná se o listnatou dřeviny roztroušeně pórovitou. Pouhým okem nejsou cévy patrné a jsou rozmístěny po celé průřezu. Jsou uspořádány jednotlivě nebo ve skupinách. Dřevo má narůžovělou až světle oranžovou barvu bez rozlišitelného jádra. Může se ovšem vyskytovat jádro nepravé. Dřeň má trojúhelníkový tvar. Dřeňové paprsky jsou na všech řezech dobře viditelné. Dřeňové skvrny se vyskytují často a mají tmavě hnědou barvu. Jedná se o měkké a lehké dřevo (Zeidler a Borůvka 2016).

Roztroušeně pórovitá, listnatá dřevina. Dřevo má cévy uspořádány v krátkých radiální řadách. Cévy mají žebříčkovité perforace. Můžeme pozorovat jednovrstevné, sdružené dřeňové paprsky. Převážně jsou dřeňové paprsky homogenní. Axiální parenchym je apotracheální a rozptýlený (Zeidler a Borůvka 2016).

## 1.5 Douglaska tisolistá

Latinský název: *Pseudotsuga menziesii*

Hustota: 502 kg/m<sup>3</sup>

Mez pevnosti dřeva v ohybu: 102 MPa

Modul pružnosti dřeva: 12 500 MPa

Douglaska je dřevina spadající pod čeleď borovicovité (Pinaceae), zároveň má však blízko i k rodům *Larix* a *Pinus*. Douglaska se nejčastěji využívá na stavební a konstrukční účely. Dřevo je kvalitní a obsahuje pryskyřici. Pryskyřičné kanálky jsou dobře patrné pouze na podélném řezu. Přejít mezi letním a jarním dřevem je náhlý. Využití najde také pryskyřice, která se dříve používala místo spojovacího materiálu a jako tmel. Běl má pouze okolo 5 cm

a jádro je nažloutlé s červeným jemným žilkováním nebo hrubými vlákny. Celkově je dřevo měkké a lehké (Větvička 1999; Musil a Hamerník 2007; Zeidler a Borůvka 2016).

Jehličnatá dřevina s pryskyřičnými kanálky, které mají tlustostěnný epitel. Velmi ojedinělý nebo chybějící podélný dřevní parenchym. Epitelové buňky jsou tlustostěnné, malé. Tracheidy jsou se spirálními ztluštěninami a příčné tracheidy jsou bez ztluštěnin. Dřeňové paprsky jsou heterocelulární. V křížovém poli je piceoidní typ ztenčenin, který zhoršuje imregnovatelnost dřeva (Zeidler a Borůvka 2016).

## **1.6 Proces lepení a faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje**

Z výše uvedeného důvodu tedy rozumíme, že při procesu lepení probíhá spojování dvou různých ploch za pomoci použitého lepidla. Toto lepidlo se při procesu nachází v kapalném stavu a postupně dochází k jeho vytvrzování. V tomto procesu se snažíme dosáhnout dokonalého přilnutí povrchu a zajistit co možná nejlepší lepený spoj. V lepení se aplikuje mnoho procesů, například: fyzikální síly, mezimolekulární síly nebo chemické vazby. Za působení těchto procesů jsme nejen schopni spojit dva stejné povrchy k sobě (dřevo/dřevo), ale také povrchy z různých materiálů (dřevo/kov) nebo různých dřevin (akát/bříza). Pevnost původního materiálu by měla být menší než pevnost lepené spáry. Pevnost lepeného spoje ovlivňují různé faktory, které jsou uvedeny v kapitolách 1.6.1 – 1.6.6 (Uhlíř 1997; Kytka 2019).

Mezi kapalným a pevným povrchem je lepší přilnavost nežli mezi dvěma pevnými povrchy. Proto využíváme lepidla (adheziva) ke spojování dvou povrchů. Lepidlo je látka, pomocí které dosáhneme přilnutí pevných látek a zajistíme jejich trvalé a pevné spojení. Proces lepení zahrnuje širokou škálu technologických a fyzikálně mechanických procesů, které vedou k vytvoření lepeného spoje. Fyzikálně chemické vlastnosti lepidel a lepených materiálů zásadně ovlivňují tyto procesy. Mezi nejvýznamnější procesy patří adheze, koheze, smáčivost, čistota povrchu, povrchové napětí roztoků a jejich viskozita (Sedliačik 1992; Kytka 2019).

### **1.6.1 Struktura a pórovitost dřeva**

Na vlastnosti lepeného spoje má vliv hustota dřeva. Hustší dřevo má pevnější lepený spoj nežli dřevo měkčí. Dřeviny jako například akát, dub, ořech, jasan, jsou tvrdé, kruhovitě pórovité dřeviny s velkými póry, do kterých může lepidlo snáze zatéci a vytvořit zde mechanické zámky,

kteří zajišťují dobrý a pevný spoj. Zároveň si musíme dávat pozor na odtok viskózního lepidla z místa spoje. To by pak vedlo k efektu tzv. chudého spoje. Dřeviny, které jsou roztroušeně pórovité nemají tak jasně oddělenou strukturu jako ty kruhovitě pórovité. Z tohoto důvodu je výsledná lepená plocha homogennější (Gandelová *et al.* 2008).

Na lepení dřeva mají vliv také extraktivní látky, které jsou chemickou součástí každé dřeviny v jiném poměru. Sem můžeme zařadit pryskyřice, třísloviny nebo gumové látky. Pokud je spoj správně proveden, mělo by vždy dojít k porušení materiálu mimo lepený spoj. Při lisování musíme brát v potaz hustotu jednotlivých dřevin. Při lepení měkkého dřeva se lisovací tlak pohybuje mezi 0,1 až 0,5 MPa a u dřeva tvrdého se lisovací tlak pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,8 MPa (Gandelová *et al.* 2008).

### **1.6.2 Chemické složení dřeva**

Dřevo obsahuje mnoho složek. Největší zastoupení v tomto složení má celulóza, hemicelulóza a lignin. Při lepení dřeva je důležitý polární charakter celulózy a hemicelulózy. Hydroxylové skupiny těchto polysacharidů udávají dřevu polární charakter. Tento charakter se uplatňuje při lepení polárními lepidly, a to za pomoci adhezivních sil. Extraktivní látky mají také velký vliv na lepení. Obsah pryskyřice, tříslovin, vosků, gumové látky a podobných látek zhoršuje smáčivost povrchu, což ovlivňuje výslednou kvalitu spoje (Friess *et al.* 2010).

#### **Celulóza**

Celulóza vzniká z glukózy, která je produkována listy. Celulóza má ve dřevě největší zastoupení a to přibližně 50 % celé dřevní hmoty. Násobná řetězová struktura způsobuje vláknitost celulózy to dodává dřevu dobré pevnostní charakteristiky ve směru vláken. Celulóza má dobrou chemickou odolnost a její štěpení probíhá pouze pomocí některých kyselin (Adamíček 2020).

#### **Hemicelulóza**

Hemicelulóza opět vzniká podobně jako celulóza z různých druhů cukru. Je také vláknitě struktury ovšem vlákna hemicelulózy jsou kratší. Z důvodu kratších vláken, mají vlákna nižší odolnost vůči chemikáliím a také nižší pevnost. Ke štěpení tedy nemusíme využívat pouze

kyseliny, ale může využít různé druhy zásad. Ze tří základních složek dřeva je hemicelulóza zastoupena nejméně, tedy přibližně 22–28 %. Hemicelulózy jsou ve dřevě spjaty s celulózou, kterou obalují (Adamíček 2020).

## **Lignin**

Lignin je ve dřevě obsahován přibližně ve 26–35 % dřevní hmoty. Jedná se tedy o druhou nejčastěji zastoupenou látku ve dřevní hmotě. Tato látka je amorfni, chová se jako termoplast a můžeme ji označit za přírodní tmel. Lignin vyplňuje prázdné prostory mezi celulózou a hemicelulózou. Čím více ligninu dřevo obsahuje, tím je dřevo tvárnější. Tohoto faktu, společně se zvýšenou teplotou, se nejčastěji využívá při ohýbání dřeva. Lignin není příliš chemicky odolný (Adamíček 2020).

## **Ostatní látky**

Do této skupiny můžeme zařadit pryskyřice, třísloviny a některé alkaloidy. Zmíněné látky se již nepodílí na stavbě dřevní hmoty. Jejich vliv na vlastnosti dřevní hmoty je tedy nulový oproti výše zmíněným látkám. Za pomoci těchto látek získává dřevo například odolnost vůči houbám, plísním nebo hmyzu. Tyto látky mohou zároveň negativně ovlivňovat zpracování dřeva. Například velká pryskyřičná hnízda se musí před zpracováním mechanicky nebo vymýváním vyčistit (Adamíček 2020).

### **1.6.3 Chemické účinky lepidla na dřevo**

Lepidlo by nemělo poškozovat materiál kolem místa lepení. Tento problém nastává, pokud používáme příliš kyselé lepidlo. Mezi tato lepidla jsou řazena například lepidla fenolická. Toto lepidlo způsobuje narušení dřeva v okolí lepeného spoje a výsledkem je následná snížená pevnost spoje. K nechtěnému zbarvení dřeva může dojít, pokud použijeme alkalická lepidla. Třísloviny a jiné látky obsažené ve dřevě reagují s těmito lepidly a způsobují zbarvení dřeva. Roztoky železitých solí také dřevo zbarvují, a to do tmavě modrých nebo fialových odstínů (Muzikář 2008; Bucur 2014).

#### 1.6.4 Chemické účinky dřeva na lepené spoje

Při lepení dřeva listnáčů hraje roli obsah extraktivních látek ve dřevě, konkrétně kyselost dřeva a jeho polarita. Během lepení se mohou některé extraktivní látky na molekulární úrovni přesouvat do adheziva a negativně ovlivnit chemické reakce při vytvrzování lepidel. Některé extraktivní látky rozpustitelné v alkoholu mohou urychlit vytvrzovací čas lepidla. Oproti tomu některé extraktivní látky rozpustitelné ve vodě mohou u některých lepidel tento čas prodloužit. Svou roli v tom právě hraje hodnota pH. Polarita extraktivních látek rovněž může způsobovat problémy s lepením, například pokud ovlivňuje smáčivost povrchu. To může vést k horší adhezi lepidla. Některé extraktivní látky mohou značně snížit schopnost lepidla vytvářet síťové struktury, což má za následek nižší kvalitu lepeného spoje (Eisner *et al.* 1966; Bodig a Jayne 1993; Roffael 2016).

#### 1.6.5 Vlhkost podkladu

Dřevo je hygroskopická látka a je tedy schopna přijímat vzdušnou vlhkost. Obsah vody vázané ve dřevě je dán teplotou prostředí a relativní vzdušnou vlhkostí. Takto označujeme rovnovážnou vlhkost, se kterou se setkáváme ve zpracovatelském prostředí. Může se vyskytovat ještě pojem relativní vlhkost, ta se využívá v obchodu se dřevem. Voda vázaná může dosáhnout pouze určité hranice, a to mez nasycení buněčné stěny neboli mez hygroskopicity. Mez hygroskopicity má každá dřevina rozdílnou. Za průměrnou hodnotu je považována hodnota 30 %. Určité druhy lepidel ve formě vodních roztoků vytvrdnou pomocí unikající vody do dřeva nebo okolního prostředí. Pokud by lepený podklad obsahoval nadměrnou vlhkost, mohl by proces vytvrzování být zpomalen nebo dokonce být úplně znemožněn (Sedliačik 1992; Trávník 2005; Bucur 2014).

Pokud chceme lepit dva povrchy k sobě, měli bychom se snažit připravit co nejlepší podmínky pro lepení. Jedním z faktorů, které můžeme ovlivnit je vlhkost podkladu. Lepený povrch by měl mít ideálně  $8 \pm 2$  % vlhkost, maximálně však 12 %. Když dojde k překročení této hodnoty, hrozí, že se do povrchu vsákne pouze malá část rozpouštědla. To pak zapříčiní pomalejší nebo dokonce úplné zastavení fáze vytvrzování a přebytečná voda se nestihne odpařit. Tehdy proces vytvrzování bude rychlejší než proces oddifundování vody a ta může zůstat uvnitř lepidla (Sedliačik 1992).

Oproti tomu nízká vlhkost tuto difundaci urychluje a rozpouštědlo zateče do materiálu příliš rychle a dochází k předčasnému vytvrzení. Díky této změně konzistence se sníží smáčivost

a tím vytvoření nerovnoměrného filmu. Takovýto spoj již není dostatečně kvalitní (Trávník 2005).

### **1.6.6 Kvalita opracování povrchu**

Kvalita lepeného spoje je výrazně ovlivněna charakteristikami povrchu. To představuje jeden z klíčových faktorů při lepení jakéhokoli materiálu obzvláště, pokud se bavíme o dřevěném povrchu, je třeba tento fakt připravit co nejpečlivěji, jelikož na tento parametr máme vliv. Úkolem přípravy povrchu je zajistit, aby disponoval adekvátními vlastnostmi pro spojení s lepidlem, což vede k vytvoření spoje s požadovanými vlastnostmi. Díky pórům a nerovnostem dřeva se lepidlo v nevytvrzeném stavu zachytí a postupně dojde k vytvrzení. Po vytvrzení se vytvoří mechanické spojovací můstky. Pokud povrch egalizujeme, musíme si dávat pozor nejen na samotnou kvalitu egalizace, ale i následného dokonalého očištění povrchu od prachu ale i mastnoty. Zvolené předúpravy povrchu zajišťují, že nejslabší článek spoje se stane buďto lepidlo anebo základní materiál. Nesmí nastat případ, kdy k porušení nastane na rozhraní adheziva a adherentu. Nejlepší kvality povrchu dosáhneme pomocí broušení (Trávník 2005; Ebnesajjad a Ebnesajjad 2014).

Výběr metody úpravy povrchu se odvíjí od použité technologie lepení. Každá technologie stanovuje určité požadavky na stav a čistotu povrchu. Při procesu čištění se můžeme setkat s nečistotami interního nebo externího původu. Externí látky zahrnují mastné látky, mezi které můžeme zařadit konzervační prostředky, zbytky brusných a leštících past a anorganické látky jako například prach z ovzduší a jiné, které jsou k povrchu přichyceny adhezními silami. Mezi interní nečistoty můžeme zařadit okuje, oxidy kovů, které vznikají při tepelném opracování povrchu nebo rez. Rez vzniká působením atmosférické vlhkosti nebo elektrochemickými ději (Kreibich a Hoch 1991; Kytka 2019).

### **1.6.7 Nános lepidla**

Pro nanášení lepidla na lepený povrch můžeme zvolit několik různých technologií. Všichni se ale snaží, aby nanášená vrstva lepidla byla co možná nejmenší. Zprv platí čím menší vrstva lepidla, tím je pevnost spoje větší a také se snažíme lepidlem co nejvíce šetřit. Zároveň si ale musíme dávat pozor, aby naší snahou nanést co nejmenší vrstvu nevzniknul tzv. chudý spoj (Trávník 2005).

## **Ruční nanášení**

Při manuálním nanášení viskózních lepidel existuje široké spektrum nástrojů a technik, které umožňují efektivní a rovnoměrné rozprostření lepicího média na dané povrchy. Sem můžeme zařadit stěrky různých typů. Od stěrek s rovným ostřím, pro hladké nanášení po stěrky se speciálními zářezy, pro různé vrstvy lepidel. Také můžeme využít celé řady štětců, ručních válečků nebo aplikátorů (Muzikář 2008).

## **Průmyslové nanášení**

V průmyslovém odvětví se využívají různé druhy nanášeček lepidel. Jejich konstrukce je často válcová nebo s rotujícím kartáčem. Jejich největší předností je rovnoměrný nános lepidla, a to z jedné nebo obou stran dle konstrukce nanášečky. Při používání průmyslových nanášeček musíme používat nízko viskózní lepidlo (Brockmann 2009).

### **1.6.8 Parametry vztažené k lepidlu**

Při výběru adhesiva musíme brát v potaz jakému namáhání bude vystaveno a zvolit takové, které bude dostatečně pevné a odolné vůči tomuto namáhání. Bude-li spoj namáhán na dynamické namáhání, musíme zvolit taková adhesiva, která budou dostatečně pružná a podobně. Také se musíme vyvarovat, až zbytečné tvrdosti vytvrzeného lepidla, které by mělo za následek příliš vysoké otupování nástrojů, které se používají k oprávnění lepeného materiálu. Také musíme použít takové lepidlo, které nebude reagovat s konečnou povrchovou úpravou. Můžeme použít taková lepidla, která po vytvrzení zprůsvitní a barva lepeného spoje nerozlišitelná od samotné barvy lepeného materiálu (Dolejš a Kadleček 1984; Osten 1986).

Výběr adhesiva také ovlivňuje jeho využití v hromadné výrobě. Dbáme na jednoduchou přípravu adhesiva k lepení a jeho případnou dlouhou použitelnost. Na tento faktor se zaměřujeme hlavně při používání dvousložkových lepidel, kdy tvrdidlo za pomoci chemické reakce způsobuje vytvrzení adhesiva. Pokud využíváme dvousložková adhesiva, musíme dodržovat technické předpisy pro postup přípravy a poměry mezi tvrdidlem nejčastěji mezi 1-4 % a filmotvorné složky (Dolejš a Kadleček 1984; Osten 1986).

Viskozita adhesiva hraje klíčovou roli a je faktorem, který se nemůže přehlížet. Příliš viskózní adhesivum nedostatečně proniká do lepeného povrchu, což vede k nedostatečné adhezi a spoj nemá požadovanou pevnost. Také se takové adhesivum špatně roztírá. Pokud ale zvolíme

lepidlo, které má příliš nízkou viskozitu, lepidlo zateče do příliš hluboko lepeného povrchu a vznikne slabý film lepidla a spoj opět nedosáhne požadované pevnosti. Pro dosažení potřebné viskozity můžeme adhesivum zředit anebo naopak zhustit. Ignorováním tohoto aspektu bychom mohli negativně ovlivnit lepené spoje z důvodu vzniku vad (Osten 1986; Bucur 2014).

### 1.6.9 Lisovací parametry

Důležité je dodržovat stejnou tloušťku dílců, v případě nedodržení této zásady, by mohlo docházet k nerovnoměrnému rozložení tlaku. To by mohlo mít za následek různá negativa a zhoršení kvality spoje. Pomocí vytvářeného tlaku se rozprostírá přebytek lepidla po celém lepeném povrchu, lepidlo lépe proniká do pórů dřeviny a vytváří se rovnoměrná vrstva lepidla. Lisovací tlak je předepsán pro každou dřevinu, druh lepidla, kvalitu opracování povrchu a teplotu (Trávník a Svoboda 2007).

Hodnotu měrného tlaku můžeme určit pomocí vzorce 1:

$$P_s = P_c / P \quad (1)$$

Kde:

$P_s$  – měrný tlak na lisovací plochu [MPa]

$P_c$  – celková síla, kterou působí písty [N]

$P$  – plocha lisovaných dílců v etáži [m<sup>2</sup>]

Pokud zvýšíme teplotu prostředí při lisování, klesne potřebný čas o sekundy nebo dokonce až o minuty. Máme tři hlavní oblasti teplot v lepení:

- za studena – teplota 15 až 30 °C
- za tepla – 30 až 100 °C
- za zvýšené teploty – nad 100 °C

Můžeme se setkat také s více druhy ohřevu. Často se využívá k ohřevu technologie vysokofrekvenční, konvekce nebo infračervené záření. Ovšem nejpoužívanější je kontaktní ohřev. Hlavně z důvodu minimálních ztrát a rychlosti ohřevu. Jsou lepidla, která vytvrzují rychleji za snížené teploty, např. tavná a glutinová lepidla (Trávník a Svoboda 2007).



Potřebný lisovací čas ( $t$ ) vypočteme dle vzorce 2, jako součet času potřebného k prohřátí lisované vrstvy ( $t_p$ ) a času na vytvrzení lepicí směsi ( $t_k$ ).

$$t = (t_p) + (t_k) \quad (2)$$

Jelikož má dřevo nízkou tepelnou vodivost pohybující se mezi ( $\lambda = 0,1$  až  $0,3 \text{ W/m}^*\text{K}$ ), je důležité brát v úvahu také tloušťku lepeného dílce (Trávník a Svoboda 2007).

## 1.7 Teorie tvorby lepeného spoje

Adheze je označována jako přilnavost lepidla k povrchu lepeného materiálu. Zároveň platí, že pokud je spoj málo pevný a lepidlo není schopno dostatečně přilnout k adherentu, hrozí riziko rozlepení spoje. Toto rozlepení hrozí na rozhraní lepidla a lepeného materiálu. V tomto případě by koheze a pevnost materiálu byla vyšší než přilnavost tedy adheze. Máme mnoho principů, které podkládají, jakým způsobem vznikají adhezní síly mezi lepidlem a lepeným povrchem. Níže jsou jednotlivé principy vypsány (Liptáková a Sedliačik 1989; Kytka 2019).

### Model mechanické vazby

Tento model se využívá při lepení porézních nebo členitých povrchů. Lepidlo v kapalném stavu se při lepení dostává do pórů nebo nerovností materiálu, kde po vytvrzení vytvoří mezi lepidlem a lepeným materiálem pevný zámeček. Model mechanické vazby lze uplatnit u materiálů mezi které patří například dřevo, keramika, papír nebo pěnové plasty. Zmíněný model nebereme v potaz, lepíme-li hladké nebo leštěné povrchy (Hrázský a Král 2005).

### Model chemické vazby

Model chemické vazby je uplatňován u materiálů, které mají povrch jak zcela hladký, tak povrch porézní. Metoda funguje jednak na principu slabých Van der Waalsových elektricky přitažlivých sil mezi danými molekulami lepidla a lepeným materiálem, hlavně na přímém chemickém působení lepidla na lepené povrchy. Pokud chceme, aby se oba povrchy dobře lepily, musíme si vybrat takové materiály, které mají reaktivní povrch, popřípadě musíme povrch chemicky upravit, aby se mohla vytvořit potřebná chemická reakce mezi povrchem materiálu a lepidlem. To probíhá za vzniku kovalentní vazby. Dobře se také lepí povrchy

přírodních polymerů, jakou je dřevo, celulóza nebo papír díky svým volným chemickým skupinám, mezi které patří oxy-, hydroxy-, amino – a další. Před procesem lepení bychom měli zvolit správný typ lepidla. Tato lepidla by měla obsahovat reaktivní skupiny jako epoxy-, hydroxy-, isokyanáto-, a další. Hlavně z důvodu reakce volných skupin lepidla s lepeným povrchem (Hrázský a Král 2005).

### **Elektrostatická teorie**

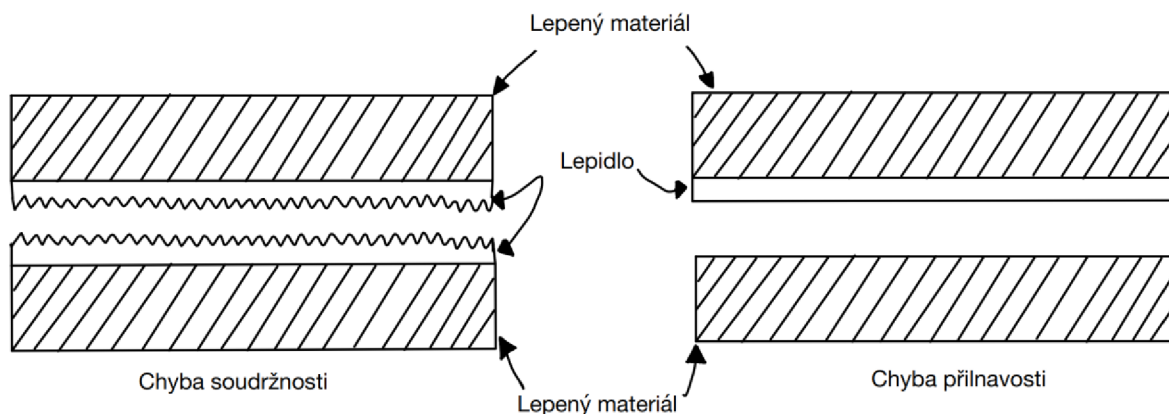
Podle této teorie vznikají při dotyku dvou rozdílných substancí dvě vrstvy. Tyto vrstvy se vzájemně přitahují na principu rozdílně nabitých stran. Elektrostatická teorie ovšem nebyla dokázána, jelikož při prováděném experimentu nebyla prokázána spojitost mezi pevností spoje a velikostí elektrostatického náboje (Hrázský a Král 2005).

### **Difúzní teorie**

Tato teorie předpokládá, že vzájemnou difúzí materiálu přes rozhraní vzniká pevnost spoje. Určité látky mohou mezi sebou difundovat. Následnou pevnost spoje ovlivňují podmínky difuze jako je teplota, čas, viskozita, relativní molekulová hmotnost aj. Teorie bohužel není schopna vysvětlit spojování materiálu, které vzájemně nedifundují i přesto se v praxi setkáváme s lepením těchto materiálů, například sklo-kov (Hrázský a Král 2005).

#### **1.7.1 Koheze**

Koheze je synonymem slova soudržnost často označováno jako vnitřní adheze. Tímto termínem můžeme označit vlastnost jakékoliv látky držet pohromadě. Tato soudržnost je dána působením kohezních sil, které vyplývají způsobením iontových, kovalentních nebo kovových jednoduchých vazeb. Vazby jsou navázány mezi atomy nebo jsou vazby zdvojeny mezi molekulami za pomoci polymerovaných molekul, které jsou vzájemně propojeny. Mohou nastat dva případy porušení lepeného materiálu. Porušení může nastat ve vrstvě lepidla, to znamená, že pevnost lepeného materiálu i adheze je větší než koheze. Druhý případ je, kdy přijde porušení spoje v materiálu. V tomto případě je koheze lepidla vyšší než koheze lepeného materiálu. V ideálním případě by mělo vždy docházet ke druhému případu. Při zkoušení by tedy mělo dojít k porušení ve zkoušeném lepeném materiálu a ne v lepené spáře (Pokorný 2000; Petrie 2013).



Obrázek 1: Chyba soudržnosti a přilnavosti (zdroj: upraveno z: Petrie 2013)

Součet koheze a adheze dává dohromady výslednou lepivost lepidla. Lepivost lepidla může záviset na mnoha okolnostech. Nejzásadnější je povrch lepeného materiálu, dále jeho povaha, pórovitost, struktura, doba klížení, teplota, vlhkost, použité rozpouštědlo nebo délka schnutí (Petrie 2013).

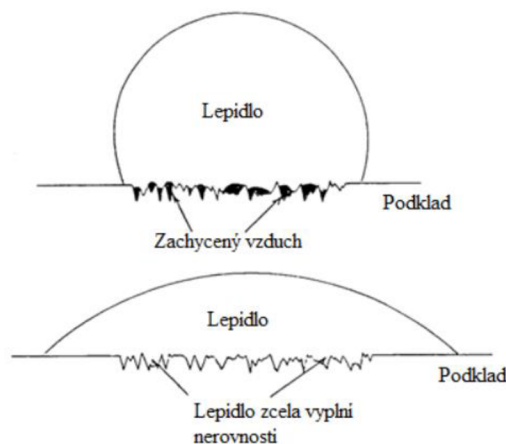
### 1.7.2 Smáčivost

Další velmi důležitým faktorem lepení je smáčivost lepeného povrchu kapalným lepidlem. Je to schopnost lepidla, kdy jednotlivé kapky lepidla se roztékají po povrchu lepeného materiálu. Jinak to lze také popsat jako velikost povrchového napětí mezi kapalinou a pevným tělesem. Tuto veličinu měříme pomocí okrajového úhlu. Tento úhel se vytvoří na hranici pevného tělesa a kapaliny. Podle tohoto úhlu můžeme poznat, zda je smáčivost dostatečná, či nikoliv. Čím je tento úhel menší, tím je daná smáčivost lepší. Tento faktor je hlavně důležitý z pohledu rovnoměrného pokrytí lepeného povrchu. Pokud bychom měli špatnou smáčivost, nevznikla by nám potřebná adhezní vazba mezi lepenými tělesy (Pánek 2015).

### 1.7.3 Polarita

Za pomoci polarity povrchu látek vzniká povrchová energie. Tuto veličinu lze vyjádřit jako povrchové napětí. Látky, které mají svůj povrch více polární mají také vyšší povrchové napětí. Tento jev můžeme pozorovat při styku kapky kapaliny s povrchem látky. Pokud je povrchové napětí kapaliny vyšší, tak se kapka bude na povrchu držet ve formě kuličky. V opačném případě, tedy pokud je povrchové napětí kapaliny menší, kapka se po povrchu rozlije a dojde

k takzvanému smočení. Z toho vyplývá, že bude-li lepený povrch nesmočený lepidlem, bude adheze slabá a spoj se rozpadne. Povrchové napětí se značí jednotkou  $N \cdot m$  (Petrie 2013).



Obrázek 2: Špatná a dobrá smáčlivost (zdroj: upraveno z: Petrie 2013)

#### 1.7.4 Mezimolekulární síly

Mezi lepidlem a lepenou plochou mohou vznikat dva druhy vazeb. První typ vazby je vazba mechanická, která vzniká u dřevin, která jsou porézní a hrubá (členitá). Lepidlo je při tomto procesu v kapalném stavu a zatéká do pórů na nerovném povrchu. Když dojde k vytvrzení lepidla, vznikne pevná vazba neboli zámek mezi lepeným materiálem a lepidlem. Při lepení hladkých nebo leštěných povrchů můžeme tuto vazbu zanedbat (Eisner *et al.* 1966; Bucur 2014).

Druhý typ vazby je vazba chemická. V tomto případě se uplatňuje při lepení hladkých nebo porézních povrchů. Tento způsob je závislý jednak na slabých Van der Waalsových elektrických přitažlivých silách mezi molekuly lepidla a lepeným materiálem. Nejdůležitější je však samotné přímé působení chemické vazby mezi lepidlem a lepeným povrchem (Hrázský a Král 2005).

### 1.8 Reologie lepidel

Reologie se zabývá deformací a tečením deformovaných těles v čase. Reologie spadá pod obor mechaniky. Tento obor zkoumá a modeluje vlastnosti látek a jejich následnou deformaci

v průběhu času a také to, jak se daná látka chová, ať už pevná látka či kapalinná, při vystavení vnějších sil (Rowell 2005).

### **Reologie před vytvrzením**

Při použití lepidla s nízkou viskozitou se lepidlo nanáší snadno. Nízkou viskozitou zajistíme i dokonalé smáčení povrchu. Viskozitu můžeme ovlivnit několika parametry. Může se ovlivnit koncentrace lepidla, a poté přímou a nepřímou závislostí. Mezi přímou závislost řadíme velikost makromolekul. Mezi nepřímou řadíme teplotu. Viskozitu musíme zároveň držet na takové úrovni, aby nevznikal tzv. chudý spoj. Při tomto jevu lepidlo vniká do pórů povrchu více než je vyžadováno (Rowell 2005).

### **Reologie při vytvrzování**

Při tvrdnutí lepidel dochází v lepeném spoji k nárůstu vnitřní soudržnosti molekul lepidla neboli koheze viz. kapitola 1.7.1. Také se v této fázi sleduje změna viskozity u termoaktivních lepidel, pokud se spoj provádí za zvýšené teploty (Rowell 2005).

### **Reologie po vytvrzení**

Při tuhnutí lepidel dochází ke jejich smršťování. Tento jev trvá i po jejich úplném ztuhnutí. Kvůli tomuto jevu může docházet k praskání lepidla v místech spoje a následnému oslabení celého spoje. Nejvíce náchylná na tento jev jsou močovinoformaldehydová lepidla. Termoplastická lepidla také mívají problém s tzv. studeným tokem. Tento jev způsobuje, že lepidlo není schopno odolávat dlouho trvajícím nebo trvalým zatížením. U PVAc lepidel jsme schopni tento problém vyřešit za pomoci použití kombinace s jinými lepidly. Mezi tyto lepidla můžeme zařadit melaminová nebo močovinoformaldehydová lepidla. Zároveň touto kombinací můžeme dosáhnout vyšší odolnosti vůči vodě a snížení křehkosti spoje (Rowell 2005).

## **Použitá lepidla**

### **Polyuretanová lepidla**

Podle použití polyuretanových lepidel dělíme tyto lepidla na jednosložkové a dvousložkové. Pokud chceme dosáhnout nízké viskozity lepidla, použijeme složky s nízkou molekulovou hodnotou nebo přidáme rozpouštědlo. Při ředění tohoto lepidla nesmíme používat alkoholy, protože reagují s izokyanáty za vzniku derivátů močoviny. Pokud využíváme jednosložkové lepidlo tohoto typu, stačí nám k jeho vytvrzení vzdušná vlhkost, popřípadě vlhkost dřeva. Izokyanátové skupiny reagují s vodou za vzniku aminů, které dále reagují opět s izokyanátovými skupinami a způsobují zesítnění. Pro vytvrzení dvousložkových lepidel, musíme smíchat obě složky lepidla dohromady. Abychom dosáhli kvalitního spoje, musíme dbát na kvalitní promíchání obou složek lepidla (Pizzi 1989; Rowell 2005).

Polyuretanová lepidla jsou vhodná, pokud lepený spoj bude určen do exteriéru. To je dáno hlavně z důvodu jeho velké odolnosti proti povětrnostním vlivům. Také má dobré vlastnosti při dynamickém namáhání, jeho smyková pevnost dosahuje hodnoty až 23 MPa. Mezi nevýhody tohoto lepidla můžeme zařadit vyšší cenu oproti například PVAc lepidlům nebo výskyt toxických látek, která obsahují rozpouštědla. Polyuretanová lepidla mají celou škálu využití, od lepení dřeva, kovů určité druhy plastů až po umělé kůže nebo kaučuk (Tesařová *et al.* 2014).

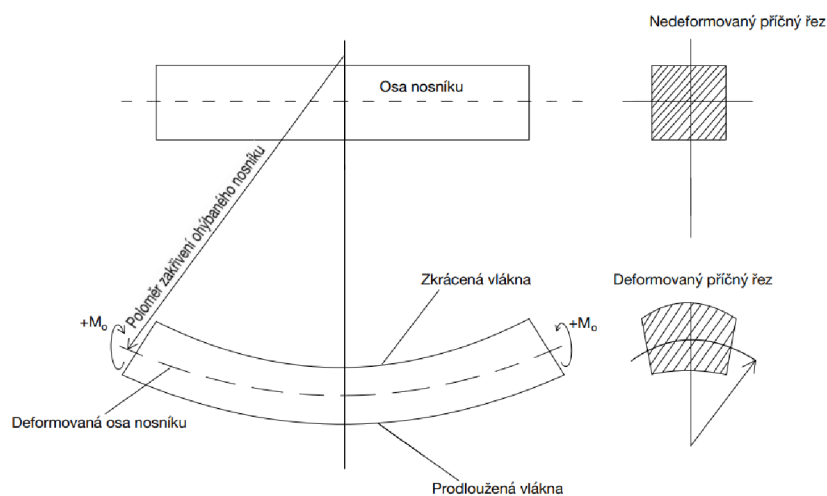
### **Polyvinylacetátová lepidla**

Polyvinylacetátová lepidla, charakteristická svým polárním charakterem, jsou díky své výborné přilnavosti k dřevu jedním z nejpoužívanějších typů lepidel v nábytkářském průmyslu. Jejich popularita spočívá v tvorbě pevných a pružných spojů, odolnosti proti mikroorganismům a nehořlavosti, což je činí ideální volbou pro širokou škálu aplikací, včetně kolíkových spojů, lepení spárovek, dýhování a montážního lepení. Ačkoli má toto lepidlo samo o sobě nízkou odolnost vůči vodě, tento nedostatek je možné překonat použitím různých tužidel. V nábytkářském průmyslu je vysoce ceněno zejména pro svou schopnost vytvářet bezbarvé spoje po vytvrnutí. Polyvinylacetátová lepidla jsou nejčastěji dostupná ve formě vodních disperzí, které se snadno ředí vodou, ale existují i varianty rozpustné v organických rozpouštědlech, což rozšiřuje jejich možnosti využití (Pizzi 1989; Tesařová *et al.* 2014).

## 1.10 Ohybové vlastnosti

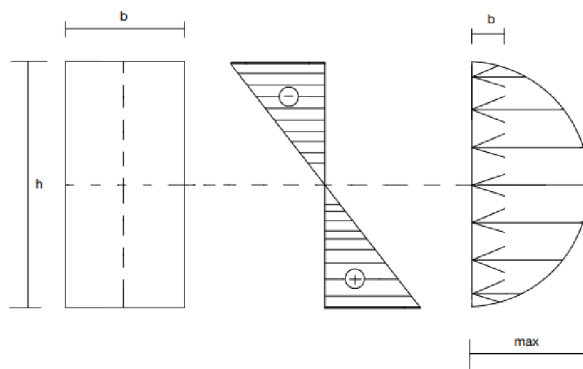
### Teorie ohybu

Ohybové zkoušky jsou prováděny za účelem zjištění konstrukčních informací o chování daného materiálu v ohybu. Ohyb je velmi časté namáhání konstrukčních prvků jako jsou nosníky, střešní konstrukce a další. Ohybová zkouška stanovuje modul pružnosti nebo ohybovou pevnost. Modul pružnosti z této zkoušky je přesnější, než ze zkoušek tlakových či tahových. Ve zkušební vzorku je napětí rozloženo následovně. Nulové namáhání je uprostřed v tzv. neutrální vrstvě a maximální namáhání je v krajních vrstvách jak můžeme vidět na obrázku (Babiak *et al.* 2018; Vasiliev a Morozov 2018).



Obrázek 3: Rozložení napětí (zdroj: upraveno z: Babiak *et al.* 2018)

Pokud v nosníku, který je namáhán na ohyb, způsobí ohybový moment deformaci a změnu tvaru, tak zde bude působit tlakové a tahové namáhání, ale také smykové napětí. Výsledná deformace je způsobena normálovým a smykovým napětím v průřezu nosníkem. Pokud má nosník průřez obdélníku, tak rozložení smykového napětí je parabolické a největší napětí tedy vzniká veprostřed nosníku dle obrázku 4. Smykové napětí můžeme z výpočtu vyřadit, pokud použijeme zkoušku čtyřbodovým ohybem (Babiak *et al.* 2018; Vasiliev a Morozov 2018).



Obrázek 4: Rozložení smykového napětí v nosníku (zdroj: upraveno z Babiak *et al.* 2018)

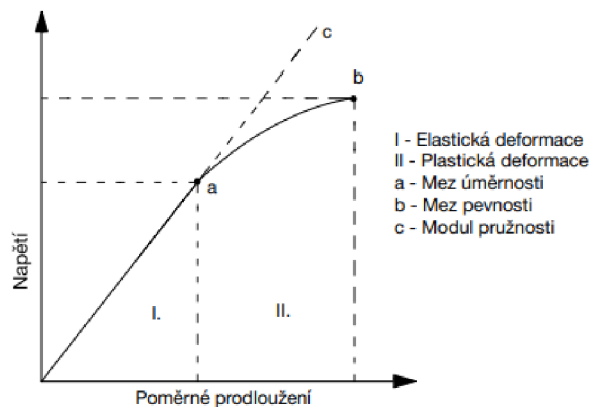
Dle obrázku 5 – diagramu napětí můžeme pozorovat dvě důležité části. Oblast elastických neboli dočasných deformací a oblast plastických neboli přetrvávajících deformací. Elastická deformace je diagramu napětí od počátku, až do meze úměrnosti. Do tohoto bodu se dostane po lineární křivce, která je vyjádřena pomocí Hookova zákona vzorec 3. Pokud nepřesáhneme mez úměrnosti, je materiál schopen se po zániku deformační síly vrátit do původního stavu díky rovnoměrnému rozložení tohoto napětí v materiálu. Přesazení meze úměrnosti se dostáváme do deformace plastické. V přetrvávající deformaci již není rozložení napětí rovnoměrné a tedy i přes zánik deformační síly se daný materiál není schopen vrátit do původního stavu (Požgaj *et al.* 1993; Frese a Blaß 2007).

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \text{ [MPa]} \quad (3)$$

Kde:  $\sigma$  je napětí v MPa

$\varepsilon$  je deformace

$E$  je modul pružnosti

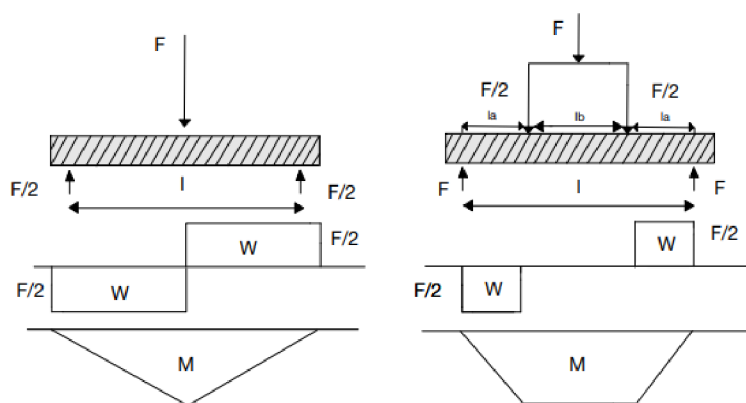


Obrázek 5: Diagram napětí (zdroj: upraveno z Požgaj *et al.* 1993)



Využití kombinace různých druhů dřeva v lepených lamelových nosnících je klíčové z důvodu specifických mechanických vlastností jednotlivého dřeva. Kombinaci různých typů dřeva můžeme využít předností a potlačit slabé stránky jednotlivých lepených lamel různého dřeva. Použitím tohoto kompozitu tak můžeme zvýšit pevnost a trvanlivost lepených lamelových nosníků oproti využití pouze jediné dřeviny. Tímto způsobem můžeme také efektivněji hospodařit s dostupnými zdroji (Kytka *et al.* 2024).

Zkouška má definovaná zkušební tělesa, která mají tvar trámce. Těleso se umístí na dvě podpěry, které jsou v předepsané vzdálenosti. Poté se zkouška dělí na dva druhy. Pokud síla působí v jednom bodě uprostřed mezi podpěrami, jedná se tzv. třibodový ohyb. Pokud sílu rozložíme na dvě stejně velké síly, které působí v určené vzdálenosti od podpěr, jedná se o ohyb čtyřbodový (ČSN EN 789 2005; Babiak *et al.* 2018; Kytka *et al.* 2024).



Obrázek 6: Schématické znázornění tří a čtyřbodového ohybu (zdroj: upraveno z Babiak *et al.* 2018)

### Třibodový ohyb

Z obrázku 6 můžeme vyčíst nejdůležitější informace týkající se této zkoušky. Třibodový ohyb je zkouška, kde je zkoušený vzorek položen na dva podpůrné válečky, aby zde docházelo k bodovému doteku. Zatěžovací váleček je veden přesně mezi oběma podpůrnými válečky. Na tento váleček působí zatěžovací síla  $F$ , která působí pouze v jednom bodě na zkoušený vzorek. Jak můžeme vidět dále na obrázku 6, důležité dvě veličiny jsou  $W_0$  (průřezový modul) a  $M_{o,max}$  (maximální ohybový moment). Z těchto veličin můžeme vypočítat  $\sigma_{fM}$  (pevnost v ohybu) dle vzorce 4 (Běhálek 2014).

$$\sigma_{fM} = \frac{M_{o,max}}{W_0} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

Maximální ohybový moment u tříbodového ohybu má tvar trojúhelníku, tedy maximální moment působí přímo pod bodem, na které působí síla  $F$ . K výpočtu této veličiny použijeme vzorec 5:

$$M_{o,max} = \frac{F_{max} \cdot L}{4} \text{ [N} \cdot \text{mm]} \quad (5)$$

Kde:  $F_{max}$  je maximální působící síla v daném bodě

$L$  je rozteč podpůrných válečků

Průřezový modul je rozdělen na dvě poloviny. Od podpůrného válečku až po zatěžovací váleček a je vypočten dle vzorce 6:

$$W_o = \frac{b \cdot h^2}{6} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (6)$$

Kde:  $b$  je šířka vzorku

$h$  je tloušťka vzorku

Pro pevnost v ohybu je tedy finální vyjádřený vztah rovnice 7:

$$\sigma_{fM} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot L}{b \cdot h^2} \text{ [MPa]} \quad (7)$$

Tříbodová ohybová zkouška je využívána častěji, hlavně z důvodu jednoduššího nastavení stroje a kratšího trvání zkoušky. To ovšem nese i své nedostatky a oproti čtyřbodovému ohybu poskytuje pouze omezený pohled na chování materiálu v průběhu ohybu (Běhálek 2014).

## Čtyřbodový ohyb

Stejně jako u tříbodového ohybu jsou i u této zkoušky dva podpůrné válečky. Rozdíl oproti tříbodové zkoušce je v působení sil. Zde dochází k působení ne jedné, ale hned dvou sil, která každá působí v jiném místě. Tyto síly jsou ovšem symetricky umístěny podél nosníku. To zajišťuje rovnoměrnější rozložení napětí na zkušební vzorku. Jak můžeme vidět na obrázku při použití čtyřbodového ohybu se nám z ohybového modelu stane lichoběžník. Oproti tříbodovému ohybu je tedy ohybový moment rozložen po větší ploše materiálu a získáváme přesnější data pro použití v praxi. Tato skutečnost také může způsobit, že naměřené hodnoty čtyřbodovým ohybem, nebudou dosahovat hodnot z měření tříbodovým ohybem. To vyplývá z Weibullovo statistiky, která říká, že čím větší je objem tím větší je pravděpodobnost výskytu praskliny nebo vady (Nagler 2019; Young 2023).

Ohybový moment u čtyřbodového ohybu můžeme vyjádřit ze vzorce 8:

$$M_{o,max} = F_{max} \cdot L_a \text{ [N} \cdot \text{mm]} \quad (8)$$

Zde se oproti tříbodovému mění rozteč podpůrných válečků  $L$  na rozteč mezi podpěrným a zatěžovacím válečkem  $L_a$ .

Průřezový modul se částečně změní. Jeho velikost bude stále stejná, ovšem jeho rozsah bude pouze od podpůrného válečku po váleček zatěžovací. Můžeme tedy stále použít vzoreček z tříbodového ohybu (Běhálek 2014).

Finální rovnice 9 se tedy bude měnit pouze v pár aspektech a bude vypadat následovně:

$$\sigma_{fM} = 6 \cdot \frac{F_{max} \cdot L_a}{b \cdot h^2} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

Pro výpočet modulu pružnosti u čtyřbodového ohybu použijeme vzorec 10 (Babiak at al. 2018):

$$MOE_{W4} = \frac{11 \cdot F \cdot l_0^3}{64 \cdot b \cdot h^3 \cdot Y_E} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

Kde: **MOE<sub>W4</sub>** je modul pružnosti v radiálním směru, v MPa

**l<sub>0</sub>** je rozpětí podpěr, v mm

**b** je šířka zkušebního tělesa, v mm

**h** je tloušťka zkušebního tělesa, v mm

**Y<sub>E</sub>** je průhyb při mezi úměrnosti, v mm

Mez úměrnosti u čtyřbodového ohybu se vypočte ze vzorce 11 (Babiak at al. 2018)

$$LOR_{W4} = \frac{3 \cdot F_E \cdot l_0}{4 \cdot b \cdot h^2} \text{ [MPa]} \quad (11)$$

Kde: **LOR<sub>W4</sub>** je mez úměrnosti, v MPa

**F<sub>E</sub>** je síla působící při mezi úměrnosti, v N

**l<sub>0</sub>** je rozpětí podpěr, v mm

**b** je šířka zkušebního tělesa, v mm

**h** je tloušťka zkušebního tělesa, v mm

## 2. Metodika

### Výběr dřeva

V této diplomové práci byly použity čtyři druhy dřeva. Jako základní bylo zvoleno dřevo akátu. Tato dřevina byla zvolena i přes to, že v České republice je považována za invazivní druh a její pěstování tedy není možné ve větší míře. I přes to si myslím, že by bylo možné pěstovat tuto invazivní dřevinu na našem území popřípadě využít silného dovozu tohoto dřeva ze zahraničí, zejména z Maďarska, a využívat jejího kvalitního dřeva na dřevěné konstrukce.

Dále bylo zvoleno dřevo břízy z důvodu výborných ohybových vlastností tohoto dřeva. Navíc je možné, že dojde k rozšíření pěstování tohoto dřeva díky jeho nedostatku při výrobě kvalitních překližek, kterých je momentálně z důvodu válečného konfliktu na Ukrajině nedostatek (Vostřák 2022). Česká republika by se tak mohla snažit o větší samostatnost v březové kulatině, což by pomohlo diverzifikovat zdroje dřeva a snížit závislost na dovozu z jiných zemí.

Olše má své místo hlavně okolo vodních ploch, ale je schopna se přizpůsobit i mokřejšímu prostředí v určitých lokalit lesa. Její pěstování je v těchto lokalitách často zvyšováno, hlavně z důvodu změny klimatu a tím častějším výskytem přívalových dešťů. Olším tyto přívalové deště nevadí a jsou schopny se přizpůsobit.

Douglaska má v České republice potenciál stát se jedním ze základních kamenů dřevozpracujícího průmyslu. Její velká produkce dřeva, která dosahuje až 1000 m<sup>3</sup>/ha, by mohla nahradit dosavadní produkci smrku, který dosahuje přibližně 400-500 m<sup>3</sup>/ha. Pěstování douglasky v České republice je teprve na začátku, nyní dosahuje cca 0,2 %, ale v budoucnu má potenciál dostat se až na 20 % a je tedy otázkou času, kdy nás čeká přechod na tuto dřevinu (Slodicak *et al.* 2015).

### Výběr adhesiv

K této diplomové práci byly vybrány dva druhy lepidel, každé na jiném základu, aby byl porovnán vliv použitého lepidla na ohybových vlastnostech daného lepeného lamelového dřeva. Byly vybrány PVAc a PUR lepidlo. Ze zástupců PVAc lepidel bylo vybráno lepidlo značky Rakoll GXL 3 a z PUR lepidel Kestopur 1010. Obě tato lepidla jsou odolná vůči vodě, ovšem každé spadá do jiné kategorie odolnosti dle normy ČSN EN 204 (668503). Lepidlo

GLX3 splňuje nároky skupiny D3, Kestopur o třídu vyšší D4. V tabulce 2 je porovnání těchto použitých lepidel.

Tabulka 2: Charakteristika použitých adheziv (zdroj: autor práce)

| Typ adheziva                                   | Kestopur | Rekoll    |
|--|----------|-----------|
| Druh lepidla                                   | PUR      | PVAc      |
| Komerční označení                              | 1010     | GLX 3     |
| Minimální pracovní teplota (°C)                | min. 15  | 18        |
| Otevřený čas (min)                             | max. 10  | 8–10      |
| Vlhkost dřeva (%)                              | 6–20     | 8-10      |
| Tlak lisování (Mpa)                            | 0,6 - 1  | 0,1 - 0,8 |
| Lisovací čas (min)                             | min. 30  | 10-15     |
| Spotřeba pro plošné lepení ( $\frac{g}{m^2}$ ) | 160–200  | 60–140    |

Hodnoty jsou převzaty z technických listů, které jsou přiloženy v přílohách.

### Výroba a příprava zkušebních těles

Rozměry zkušebních těles pro stanovení ohybových vlastností při čtyřbodovém ohybu udává norma. Délka lamel 300 mm, šířka 20 mm (tangenciální směr) a tloušťka jednotlivých lamel 5 mm (radiální směr). Vlhkost zkušebních vzorků byla 12 %. Vzorky byly klimatizovány při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 % po dobu 14 dní. Nános lepidla byl na jedné lamelě z lepeného souboru a také byl rovnoměrně rozprostřen po celé ploše lepené spáry tak, aby byly při lisování vytlačeny přebytky lepidla ven.

### Výroba lamel

Vzorky, ze kterých se jednotlivé lamely vyřezávaly byly vyrobeny v Laboratoři zpracování biomateriálů na Fakultě lesnické a dřevařské, České zemědělské univerzity v Praze.

Základní lamely byly vyřezány z fošen daných druhů dřev konkrétně Robinia pseudoacacia, Betula pendula, Alnus glutinosa a Pseudotsuga menziesii. Nejprve byly všechny lamely tloušťkově egalizovány na tloušťkovací fréze SCM s630 class. Fréza má 4 nože a otáčky frézy byly nastaveny na 4500 ot/min. K základnímu dělení byla použita kotoučová formátovací pila SCM si 400 Claas. Řezný kotouč měl průměr 400 mm a šířka zubu byla 3,2 mm. Otáčky byly nastaveny na 4000 ot/min. Řezná rychlost tedy byla 5024 m/min. Posuvná rychlost byla

určována ručně a pohybovala se přibližně okolo hodnoty 10 mm/s. Byly vymanipulovány lamely o rozměrech přibližně 1 000 x 50 x 5 mm (1 x tg x rad).

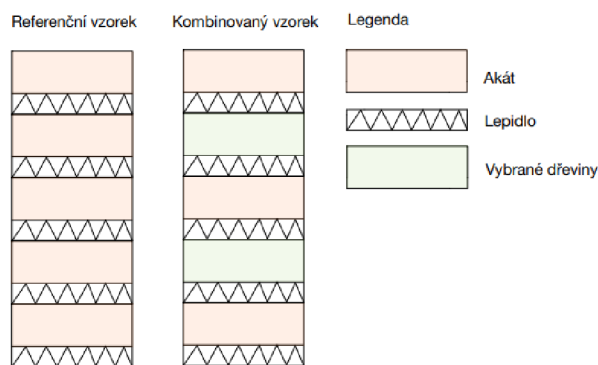
Po tomto procesu byly vyselektovány vady jako například trhliny a suky. Následně bylo provedeno jejich vymanipulování na výše zmíněné kotoučové pile za stejných řezných podmínek. Jelikož je dřevo heterogenní materiál a určité vady ke dřevu patří byly menší vady ponechány stejně jako by se tyto vady nechávaly v hromadné výrobě. Zároveň v tomto kroku byla pila nastavena na 310 mm, aby zde byla tolerance pro pozdější zarovnání, které bude následovat po slepení lamel do požadovaného bloku. Největší množství odpadu vznikalo při krácení akátu, kvůli jeho častým sukům, prasklinám nebo nedostatečné kvalitě finálních lamel. Naopak nejméně odpadu bylo vytvořeno při pořezu jehličnanu, tedy douglasky. Bříza s olší měly podobně vad, kde byly nejčastěji nacházeny vypadavé suky.



Obrázek 7: Vyselektování vad jednotlivých lamel (zdroj: autor práce)

### **Stanovení počtu vzorků**

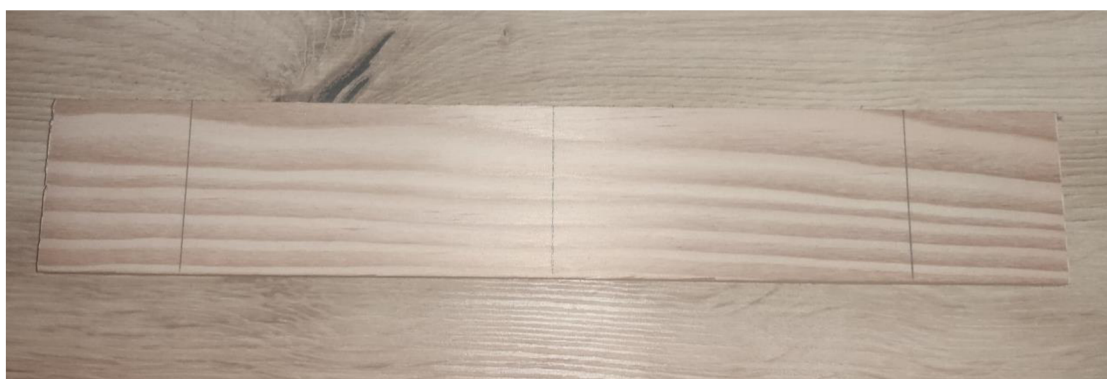
Jako testovací těleso bylo zvoleno lepené lamelové dřevo o pěti vrstvách, kde jednotlivé vrstvy nejsou otočeny o 90°. Pro zabezpečení statistické relevance bylo od každé varianty vyrobeno 20 zkušebních těles. Kromě referenční sady, která byla tvořena pouze akátem, byly řešeny sady, ve kterých byl akát kombinován s vybranými druhy dřevin. Pro lepší přehlednost byl vytvořen obrázek 8 se schématickým znázorněním vrstvení vzorků.



Obrázek 8: Schématické znázornění vrstvení vzorků (zdroj: autor)

### Měření rozměrů vzorků

Prvním krokem bylo umístění lamel do klimatizační komory typu Memmert HPP 750 (Memmert GmbH Německo). Teplota byla nastavena na  $20 \pm 2$  °C a relativní vlhkosti vzduchu  $65 \pm 5$  %. Průběžně bylo váženo náhodně zvolené zkušební těleso a byla zaznamenávána hodnota. Měření probíhalo do doby dosažení konstantní vlhkosti dřeva. Toto měření probíhalo 7 dní. Všechny vyřezané lamely musely být změřeny a zapsány do tabulky v programu Microsoft excel. Každá lamela byla měřena na třech místech dle obrázku 9. V těchto místech se měřila třikrát šířka a třikrát tloušťka. Délka byla u všech lamel 310 mm z důvodu následujícího lepení a možného posunutí. Dále se lamela zvažila a hodnota zapsala do tabulky. Pomocí vzorečků se vypočítala průměrná šířka, tloušťka, objem a hustota jednotlivých lamel.



Obrázek 9: Vyznačená místa měření šířky a tloušťky lamel (zdroj: autor práce)



## Lepení zkušebních těles

Poté co bylo určeno, kolik má být vyrobeno zkušebních těles, bylo zapotřebí je slepit. K tomuto účelu byla použita lepidla zmíněná v kapitole 1.9. Prvním krokem bylo lepení pomocí PVAc lepidla, z důvodu snazšího použití oproti PUR lepidlu. Před lepením proběhlo seznámení s použitým lepidlem a zjištění všech potřebných informací k zajištění správného použití daného lepidla dle tabulky 1.

Lepení opět probíhalo podle dřeva, nejprve tedy byly slepeny referenční vzorky. Poté probíhalo lepení kombinovaných vzorků. Zde bylo možné pozorovat rozdíly v nasákavosti jednotlivých dřevin, a tedy i různé spotřeby lepidla. Při lepení listnatého dřeva nebyl rozdíl téměř pozorovatelný. Oproti tomu jediný zastoupený jehličnan, tedy douglaska spotřebovala téměř o polovinu méně lepidla. Stejně jako u smrku je to dáno piceoidními zmenšeninami parenchymatických buněk v křížovém poli. Nanášení lepidla probíhalo na každou lamelu zvlášť a postupně byly vrstveny na sebe. Poté byly slepené tělíška umístěna pod hydraulický pákový lis a zde byly slisovány až do doby vytvrzení lepidla. Po vytvrzení lepidla byly vzorky vyndány, následně byly popsány a byly uklizeny se do krabice.



Obrázek 10: Lamela při nanášení PVAc lepidla (zdroj: autor práce)



Obrázek 11: Lamela po rozetření PVAc lepidla (zdroj: autor práce)

Lepení pomocí PUR lepidla bylo mnohem náročnější. Lepidlo mělo větší viskozitu, tedy bylo hůře roztíratelné. V rámci lepení pomocí PVAc a PUR lepidla byly použity odlišné postupy vrstvení z důvodu, rozdílného chování jednotlivých lepidel na lepeném povrchu. Pro zabezpečení adekvátního přitlaku byl použit ruční hydraulický lis. Vytvrzovací doba PUR lepidla byla delší, oproti použití PVAc lepidla.



Obrázek 12: Lisování při vytvrzování PUR lepidla (zdroj: autor práce)

### **Příprava zkušebních těles**

V této fázi práce měly slepené vzorky potřebný rozměr na délku  $310 \pm 1$  mm a tloušťku  $25 \pm 1$  mm. Vzorky měly šířku přibližně 50 mm z důvodu možného posunutí při lepení. Každý vzorek byl zkrácen na požadovaný rozměr  $300 \pm 1$  mm a poté rozříznut. Dělení bylo opět prováděno na kotoučové formátovací pile SCM si 400 Claas za stejných řezných podmínek. Z dosavadního jednoho vzorku vznikly dva, které měly již požadovanou šířku  $20 \pm 1$  mm.

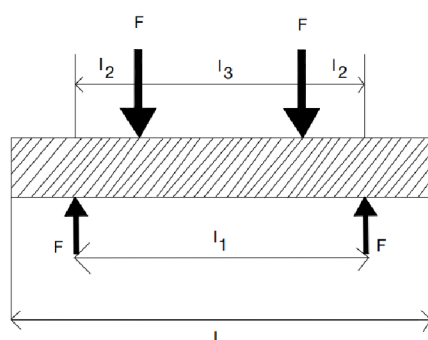
Každý vzorek byl označen a umístěn zpět do klimatizační komory typu Memmert HPP 750 (Memmert GmbH Německo) za stejných podmínek jako dříve jednotlivé lamely. Klimatizování probíhalo po dobu 14 dní. U každého vzorku opět proběhlo měření a vážení jednotlivých těles. Z těchto hodnot byly opět vypočteny veličiny jako průměrná šířka tloušťka, objem a hustota.



Obrázek 13: Porovnání lepených spár vlevo PVAc, vpravo PUR (zdroj: autor práce)

### Průběh zkoušek

Pro zkoušení mechanických vlastností lepených lamelových vzorků byla zvolena zkouška čtyřbodovým ohybem dle normy (ČSN EN 789 2005). Testovací zařízením byl zkušební stroj TIRA test 2850 S (TIRA GmbH Německo) s volitelným konstantním posuvem, který může být v rozsahu 0,01 – 500 mm/min.



Obrázek 14: Schéma jednotlivých vzdáleností u čtyřbodového ohybu (zdroj: autor)

Kde:  $L$  – délka zkušební vzorku, 300 mm.

$l_1$  – měřicí základna, 260 mm

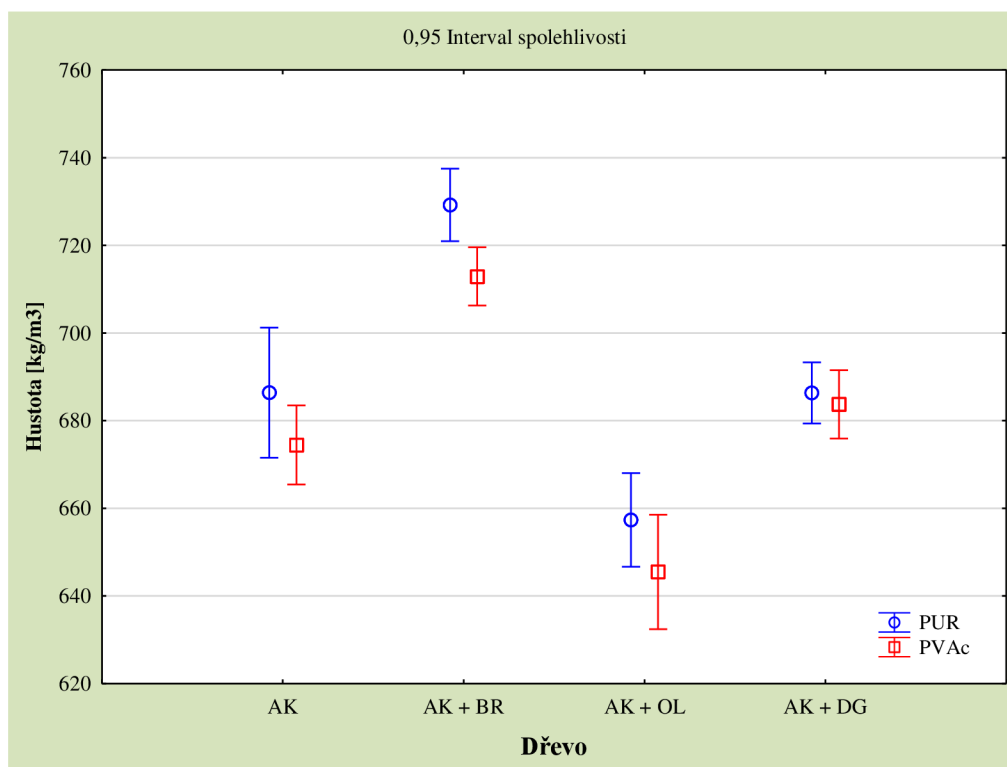
$l_2$  – vzdálenost mezi vnitřním zatěžovaným bodem a nejbližší podpěrou, 65 mm

$l_3$  – vzdálenost zatěžujících válečků, 130 mm

Vzorky byly vloženy do zkušebního stroje dle obrázku 14. Následně byly vzorky zatěžovány silou, dokud nedošlo k jejich porušení. Zkouška skončila při poklesu síly 10 %. Konstantní rychlost posuvu byla nastavena na 10 mm/min. a nesměla být překročena. K porušení vzorku mělo dojít mezi časovým limitem od 30 do 90 s (ČSN EN 789 2005). Po porušení vzorku bylo kontrolováno, zda došlo k porušení ve dřevě anebo v lepené spáře. V počítačovém softwaru k testovacímu zařízení TIRA test 2850 S byly zaznamenány hodnoty měření. Výsledkem zkoušky byly silově průhybové diagramy, na základě kterých byly vyhodnoceny sledované vlastnosti.

### 3. Výsledky a diskuse

V této kapitole jsou představeny všechny výsledky této práce. Výsledky jsou zobrazeny pomocí grafů, které byly zpracovány z naměřených hodnot a vypracovány v programu Statistica 14. Byla použita dvou faktorová analýza rozptylu ANOVA. Pro lepší přehlednost výsledků byla zpracována tabulka, která je součástí příloh 1. V tabulce jsou zaznamenány průměrné hodnoty měření, směrodatné odchylky a variační koeficienty.



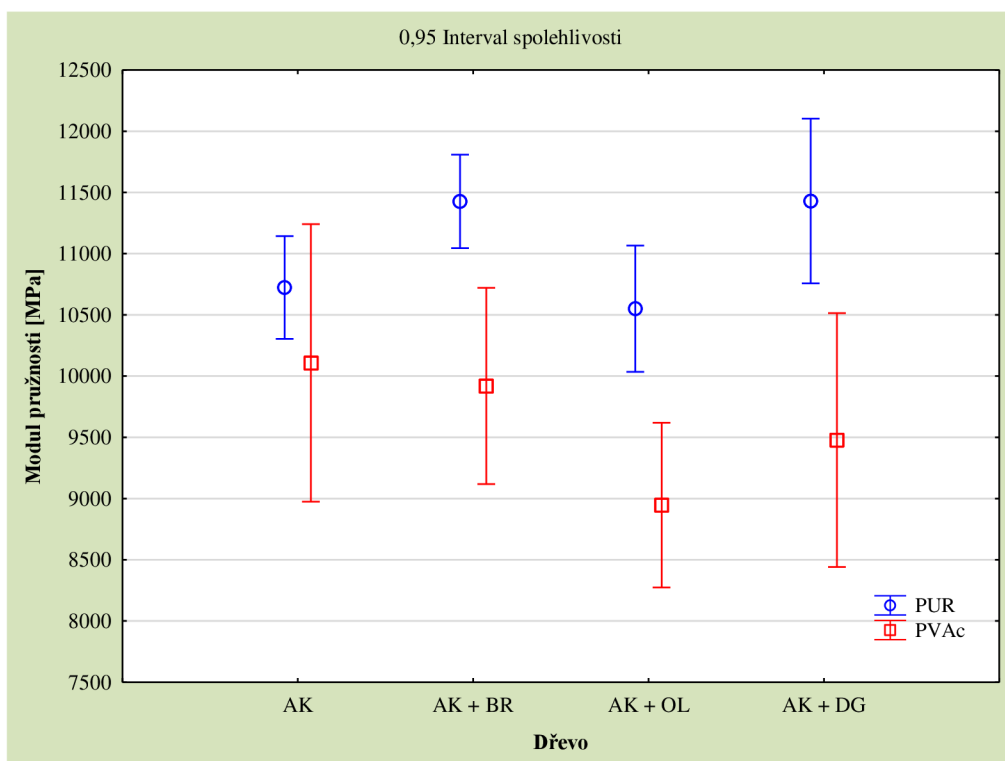
Graf 1: Hustota kombinovaných slepených vzorků (zdroj: autor)

### Modul pružnosti

Na grafu 2 jsou zobrazeny naměřené průměrné hodnoty modulu pružnosti. Veškerá naměřená data kombinovaných vzorků byla porovnávána s referenčními zkušebními tělesy. Cílem bylo zanalyzovat jak kombinace různých druhů dřeva ovlivní mechanické vlastnosti. Naměřené hodnoty referenčního měření se pohybují v rozsahu měření Molnár a Bariska (2002). V tomto konkrétním měření jsou ovšem velké rozptyly hodnot a lze tedy předpokládat velký počet vzorků z různých stanovišť. Rozsah modulu pružnosti je u těchto autorů od 9 000 až po 13 000 MPa. Pokud bychom brali průměrnou referenční hodnotu akátu při použití PUR lepidla, tak by se dalo říci, že bylo dosaženo zvýšení modulu pružnosti o 16,05 % oproti nejhoršímu

měření Molnár a Bariska (2002) a nebo pokles o 21,23 % oproti nejlepšímu. Popřípadě nárůst o 10,95 % a pokles o 28,61 % v případě referenčního měření akátu lepeného PVAc lepidlem. Pokud porovnáme výsledky s jinými autory, například Bijak a Lachowicz (2021), tak zde jsou již zaznamenány průměrné hodnoty a nedosahují tak velkého rozptylu. Výsledky autorů jsou zpracovány v tabulce, která je přiložena v příloze 3. Zde jsou rozdíly větší. Konkrétně při referenčním měření při lepení PVAc lepidlem klesla hodnota MOE oproti zmíněným autorům o 40,76 %. Při použití PUR lepidla pro lepení vzorku rozdíl mírně klesl, byl ovšem stále značný a to o 32,68 %. Kamperidou *et al.* (2016), kteří porovnávali akáty z různých stanovišť a zjistili zásadní rozdíly v závislosti na daném stanovišti. Dřevo akátu pěstované v Řecku nedosahovalo v jejich měření ani malou měrou vlastnostem dřeva pěstovaného v Maďarsku. Porovnáme-li jejich měření akátu z lokality Řecka, zjistíme podobnost s měřením v této diplomové práci. Při použití PUR lepidla u referenčního vzorku hodnota MOE klesla pouze o 2,36 %. Pokud budeme porovnávat PVAc lepidlo, tak zde hodnota klesla o 8,6 %. Vezmeme-li v potaz měření autorů dřeva z lokality Maďarska, tak je zde dosaženo markantních rozdílů. Konkrétně rozdíl mezi měřených referenčních vzorků lepených PUR lepidlem byl 69 %. U lepení PVAc lepidlem byl rozdíl dokonce 79,28 %. Pro další porovnání autoři, kteří měřili akát v Belgii Pollet *et al.* (2012), dosáhli hodnot, které také převyšují referenční měření. Konkrétní rozdíly jsou následné. U PUR lepidla klesla hodnota o 46,41 % a u PVAc lepidla klesla o 55,32 %. Aby bylo měření porovnáno také s místním měřením, byla vybrána práce Sikora *et al.* (2022), která se zabývala mechanickými vlastnosti akátu po termické modifikaci. Pro porovnání byly převzaty hodnoty z referenčního měření. Z měření vyplývá, že naměřené hodnoty opět klesly oproti zmíněným autorům. Hodnoty referenčního měření PUR lepidlem klesly o 23,74 %. Reference lepené PVAc měly hodnotu modulu pružnosti nižší o 31,27 %. Z porovnání měřených referenčních vzorků vyplývá, že dřevo použité na vzorky nedosahovalo kvality, které dosahovalo dřevo ostatních autorů. Toto tvrzení můžeme také podložit hustotou vzorků, která má vliv na mechanické vlastnosti dřeva. Hustota měřených vzorků nedosahovala hustoty, která je uváděna v odborné literatuře. Například Zeidler a Borůvka (2016) uvádějí hustotu dřeva akátu  $761 \text{ kg/m}^3$ . Z dat, které byly změřeny u jednotlivých lamel před lepením do testovacích těles vyplývá, že rozdíl mezi hustotou dřeva měřeného referenčního akátu a odbornou literaturou je pro vzorky měřené PVAc lepidlem hustota o 14,89 % nižší a pro lepení PUR lepidlem o 13,63 % také nižší. Při porovnání hustoty s jinými měření například Sikora *et al.* (2022), hustota klesne dokonce o 19,27 % u PVAc lepidla a o 17,96 % u PUR lepidla. S vysokou pravděpodobností předpokládáme i pokles mechanických ohybových vlastností v závislosti na snížené hustotě akátových vzorků. Tento předpoklad se také potvrdil při vyhodnocování

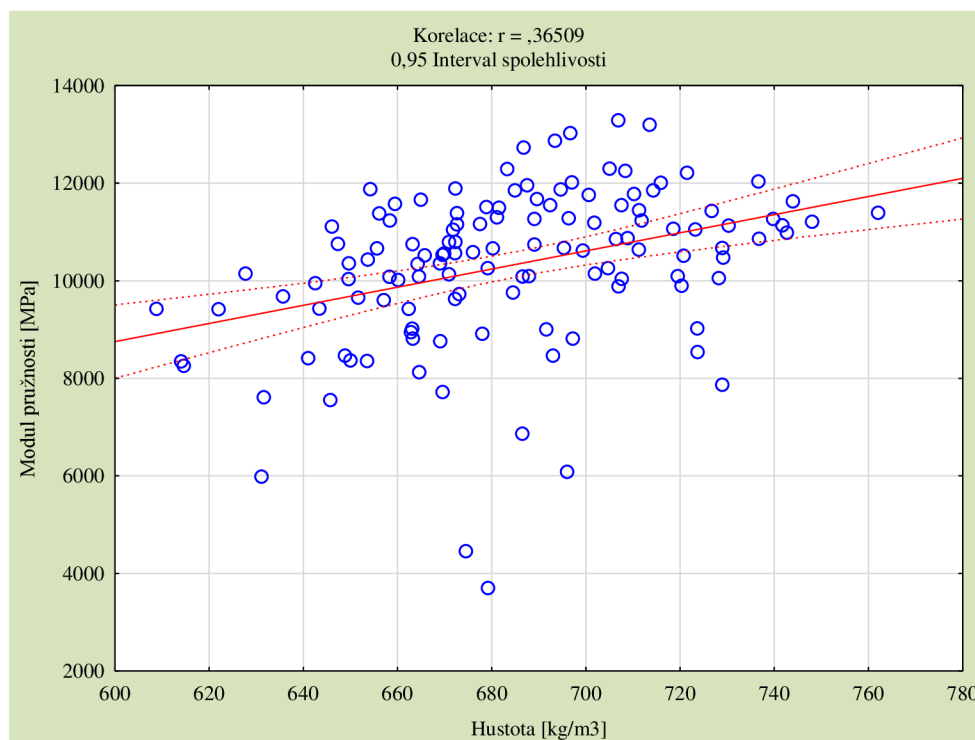
modulu pružnosti, kde tato hodnota byla nižší oproti ostatním autorům. Při porovnání referenčních vzorku a použití rozdílných lepidel, můžeme pozorovat nárůst hustoty u vzorků lepených PUR lepidlem o 1,73 %. Nárůst je způsoben dvěma možnými faktory. První možnost je, že tyto vzorky absorbovaly větší množství lepidla i z důvodu větší plošné spotřeby tohoto lepidla, dle tabulky 2. Druhá možnost je přirozená heterogenost dřeva. To můžeme podložit měřeními lamel před slepením dle tabulky v příloze 2 a lze tímto vysvětlit tento malý rozdíl v hustotě. Duncanův test zpracován v příloze 4, zobrazuje statisticky významné rozdíly vztahující se k referenčnímu měření akátu lepeným PUR lepidlem pouze u porovnání se vzorky akátu a olše, a akátu a douglasky lepenými PVAc lepidlem. U ostatních vzorků jsou již statisticky nevýznamné rozdíly. Referenční měření lepené PVAc lepidlem ukázalo statisticky významné rozdíly se vzorky akátu a břízy, a akátu a douglasky, lepenými PUR lepidlem, kde byly hodnoty vyšší. U vzorků akátu a olše, lepenými PVAc lepidlem byly hodnoty nižší. U ostatních vzorků můžeme pozorovat statisticky nevýznamné rozdíly. Pokud bychom porovnávali hodnoty referenčního měření v závislosti na použitém lepidle, vyšla by hodnota při použití PUR lepidla o 6,08 % vyšší oproti použití PVAc lepidla.



Graf 2: Hodnoty modulu pružnosti (zdroj: autor)



U kombinovaných vzorků se nejlépe jeví kombinace akátu a douglasky při použití PUR lepidla. U této kombinace rozdíl vzrostl oproti PUR referenci o 6,59 %. S nepatrným rozdílem následuje kombinace akátu a břízy a to konkrétně 3,92 MPa oproti kombinaci akátu a douglasky. Zde opět můžeme pozorovat mírný nárůst oproti referenčnímu měření a lze tedy říci, že při použití těchto kombinací se modul pružnosti lepeného lamelového dřeva mírně zvýší. Kombinace akátu a douglasky sice dosáhla vyšších průměrných hodnot, ovšem její výsledky nebyly tak stabilní. To můžeme pozorovat na směrodatné odchylce, která u těchto kombinací činila rozdíl 545,33 MPa. U kombinací akátu a břízy a akátu a douglasky lepených PUR lepidlem jsou statisticky nevýznamné rozdíly u všech vzorků lepených PUR lepidlem a statisticky významné rozdíly u všech vzorků lepených PVAc lepidlem. Akát v kombinaci s olší při použití PUR lepidla si již oproti referenčnímu měření pohoršil. Z referenčního měření PUR lepidlem se hodnoty kombinace akátu s olší, snížily o 1,61 %. Zde jsou podobně jako u referenčního měření statisticky významné rozdíly pouze u vzorků akátu a olše lepenými PVAc lepidlem. U tohoto vzorku také můžeme pozorovat hraniční hodnotu vzorků akátu a douglasky lepených PVAc lepidlem.



Graf 3: Korelace modulu pružnosti závislého na hustotě

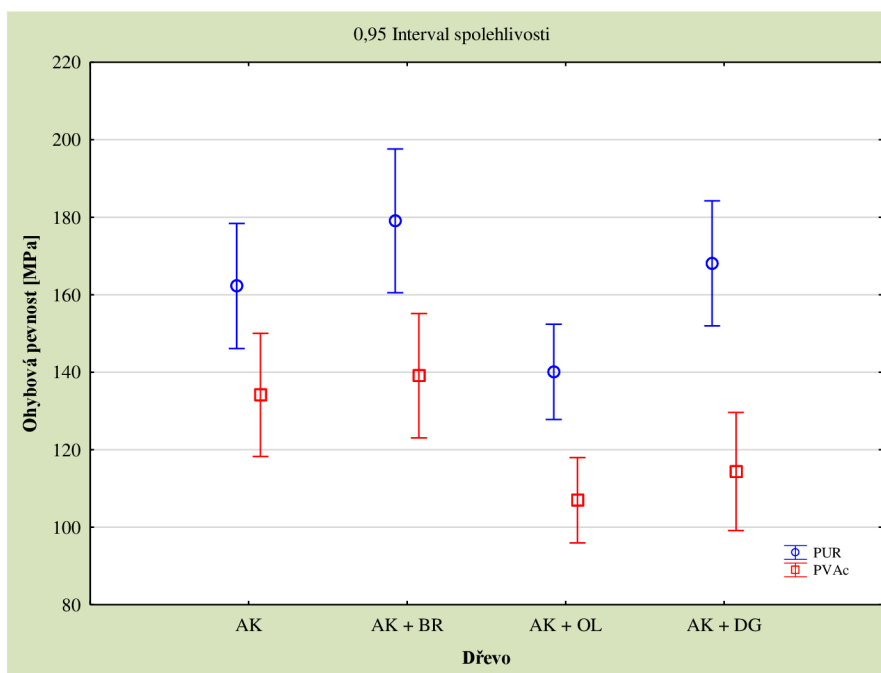
Nižších hodnot oproti referenčnímu měření dosáhly také všechny kombinace lepené PVAc lepidlem. Nejvyšší hodnotu z kombinovaných těles lepených PVAc lepidlem měla kombinace akátu a břízy. Zde hodnota MOE klesla o 1,86 % v porovnání s referenčním měřením lepeným PVAc lepidlem. Z grafu 3 je patrné, že statisticky významné rozdíly jsou



pouze u kombinací vzorků lepených PUR lepidlem, které dosahovaly lepšího modulu pružnosti než reference lepená PVAc lepidlem. Další kombinací vzorků byl akát a douglaska. U tohoto vzorku byl pokles daleko výraznější, a to konkrétně o 6,23 % oproti PVAc referenčnímu vzorku. Duncanův test zde dopadl stejně jako u vzorků akátu a břízy slepených PVAc lepidlem. Nejnižší modul pružnosti byl změřen u kombinace akátu a olše. U této kombinace byl pokles hodnoty dokonce již dvouciferný a to konkrétně 11,5 %. Tyto vzorky měly statisticky významný rozdíl nejen u všech vzorků lepených PUR lepidlem, ale také u referenčního měření PVAc lepidla. Na grafu 3 můžeme pozorovat korelaci modulu pružnosti závislého na hustotě. Modré body jsou naměřená data. Červená čárkovaná křivka znázorňuje interval spolehlivosti. Červená plná křivka představuje nejlepší fit dat. Korelační koeficient mezi těmito dvěma proměnnými je po zaokrouhlení roven hodnotě 0,37. Jedná se tedy o slabou pozitivní korelaci neboli s rostoucí hustotou se zvyšuje i modul pružnosti, ale vztah není velmi silný.

## Ohybová pevnost

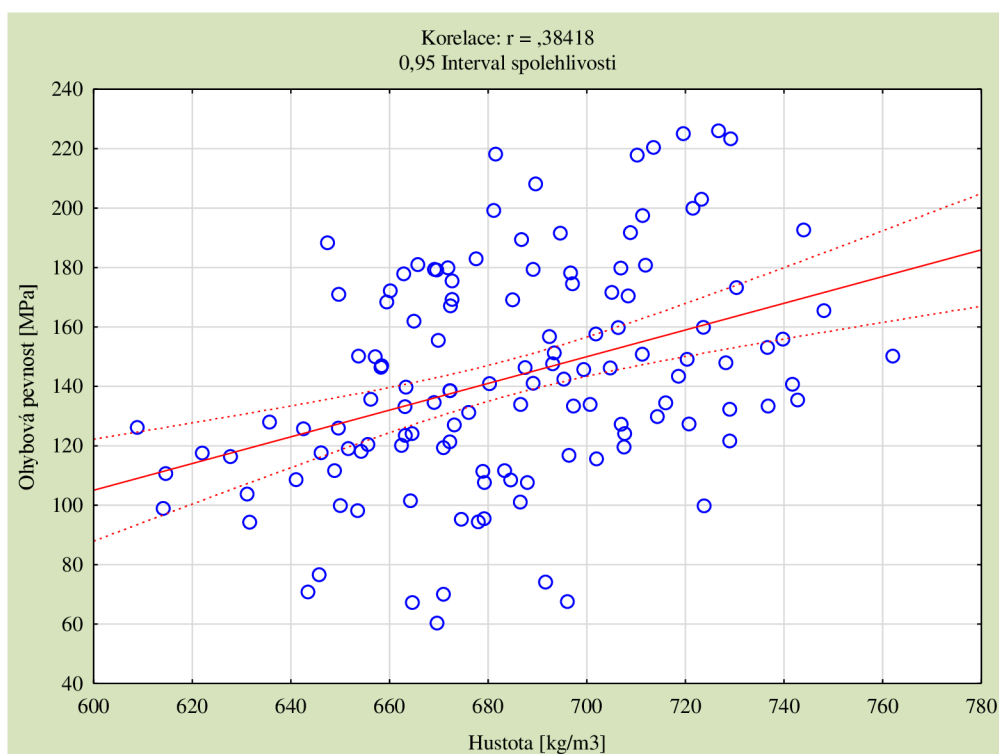
Na grafu 4 je možno vidět porovnání jednotlivých ohybových pevností podle vzorku. Z grafu vyplývá, že při použití PUR lepidla, bylo dosaženo vyšších hodnot než při použití PVAc lepidla. Pro porovnání budou opět použity hodnoty z tabulky v příloze 1, ze které se vycházelo i v předchozí kapitole. V příloze 4 jsou vyobrazeny tabulky pro hodnoty Duncanova testu.



Graf 4: Porovnávání ohybové pevnosti (zdroj: autor)

Pokud opět porovnáme výsledky s ostatními autory, zjistíme, že ohybová pevnost se již neliší tak markantním rozdílem, jako tomu bylo u modulu pružnosti. Bylo předpokládáno, že hodnota ohybové pevnosti se zvýší s použitou technologií lepeného lamelového dřeva. Při porovnání s autory Molnár a Bariska (2002) z měření vyplývá, že hodnota MOR v referenčním lepeném PUR lepidlem se zvýšila oproti nejhoršímu výsledku měření o 36,52 % a snížila se o 4,14 % oproti nejvyšší naměřené hodnotě. Porovnání s PVAc lepidlem jsou rozdíly opět znatelné. Největší snížení bylo o 25,97 % a oproti nejnižší hodnotě přišlo navýšení o 23,22 %. Kamperidou *et al.* (2016) měřili akáty ze dvou lokalit a zjistili značné rozdíly již u modulu pružnosti. Jejich měření má opět velmi rozdílné hodnoty i v mezi pevnosti. Referenční měření lepené PVAc lepidlem dosahuje o 18,74 % větší meze pevnosti oproti vzorkům měřeným z Řecka. PUR lepidlo dosáhne nárůstu dokonce o 32,83 %. Pokud budeme porovnávat výsledky s měřením dřeva akátu z oblasti Maďarska, tak výsledky obou referenčních měření jsou nižší. U PVAc lepidla konkrétně o 28,97 % a u PUR lepidla o 6,61 %. Obecně lze ale výsledky měření Kamperidou *et al.* (2016) z lokality Maďarska považovat za vysoké i oproti jiným autorům. Výsledky měření z lokality Řecka zase lze označit za podprůměrné oproti jiným autorům. Novější měření od autorů Bijak a Lachowicz (2021) je již mezi výsledky referenčních měření. Při použití PVAc lepidla byla naměřena hodnota o 15,91 % nižší. Měření referenčních vzorků slepených PUR lepidlem ukázalo nárůst meze pevnosti o 4,17 %. Autoři z Belgie Pollet *et al.* (2012) měli výsledky měření blíže k hodnotám vzorků, které byly slepeny pomocí PVAc lepidla. Konkrétně byla hodnota meze pevnosti slepených vzorků o 2,86 % nižší. Při použití PUR lepidla došlo k nárůstu meze pevnosti o 14,96 %. Pro poslední porovnání byly opět použity výsledky od autorů Sikora *et al.* (2022). Při porovnání referenčního měření vzorků slepených PVAc lepidlem došlo k poklesu meze pevnosti o 12,41 %. U vzorků slepených PUR lepidlem došlo k nárůstu meze pevnosti o 7,07 %. Pokud by tabulka v příloze 3 byla zobecněna a vzali bychom průměrnou hodnotu zmíněných autorů, bylo by dosaženo průměrné hodnoty 150,5 MPa. Tento výsledek by naznačoval, že i přes použití surovin nižší hustoty je možné zvýšit ohybovou pevnost o 7,8 % u vzorků lepených PUR lepidlem. Pouhým pohledem na graf 4 lze říci, že lepidlo PVAc opět nedosahuje hodnot, které bylo změřeno u vzorků slepených PUR lepidlem. Oproti průměrné hodnotě zmíněných autorů, klesla hodnota meze pevnosti při použití PVAc lepidla o 12,18 %. Pokles oproti referenčnímu vzorku, který byl lepený PUR lepidlem je tedy značný, a to konkrétně o 17,33 %. Duncanův test označil za statisticky významné rozdíly pro referenční vzorky lepené PUR lepidlem všechny vzorky slepeny PVAc lepidlem a také kombinaci akátu a olše lepeným PUR lepidlem. Hodnoty všech těchto vzorků byly příliš nízké. V porovnání s referenčními vzorky lepenými PVAc lepidlem můžeme

pozorovat statisticky významné rozdíly u kombinací referenčního akátu lepeného PUR lepidlem, akátu a břízy, akátu a douglasky lepených PUR lepidlem. Zde jsou změřené hodnoty vyšší a u akátu a olše lepených PVAc, kde je výsledná hodnota nižší. U kombinace akátu a douglasky by se dalo uvažovat o hranici významnosti, kdy je hodnota těsně nad touto hranicí.



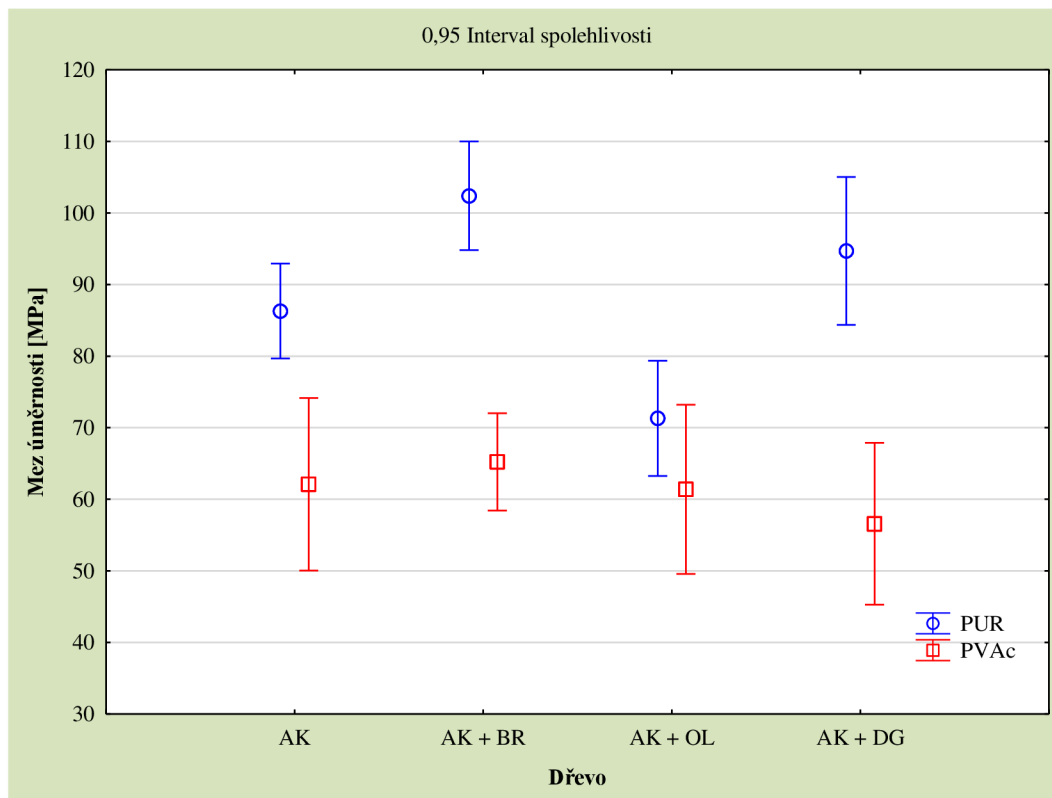
Graf 5: Korelace ohybové pevnosti závislé na hustotě (zdroj: autor)

U ohybové pevnosti měla nejlepší výsledky kombinace akátu s břízou lepených PUR lepidlem. Zde bylo dosaženo dalšího zlepšení ohybové pevnosti o 10,34 % ve srovnání s referenční hodnotou. Výsledky Duncanova testu ukázaly stejné statistické rozdíly jako pro vzorky reference. Malé zlepšení ohybové pevnosti přinesla také kombinace akátu s douglaskou, avšak zde byl nárůst pouze 3,58 % oproti referenci lepenou PUR lepidlem. Duncanův test dopadl opět stejně jako kombinace akátu a břízy. Oproti tomu daleko horších ohybových vlastností bylo dosaženo při kombinaci akátu a olše. Zde se hodnota propadla o 13,67 %. Duncanův test statisticky nevýznamné rozdíly označil pouze referenci akátu lepeného PVAc lepidlem a kombinaci akátu a břízy lepeného PVAc lepidlem. U vzorků lepených PVAc lepidlem je možno pozorovat nárůst hodnoty pevnosti v ohybu u kombinace akátu s břízou. Zde bylo dosaženo mírně vyšších čísel, konkrétně o 4,98 MPa. Pouhou aplikací jiného lepidla jsme ztratily 22,3 % pevnosti v ohybu oproti vzorku stejné kombinace lepeného jiným lepidlem. Statisticky nevýznamné rozdíly jsou u vzorků akátu a olše lepených PUR lepidlem a reference akátu lepenou PVAc lepidlem. U zbývajících vzorků jsou hodnoty buď vyšší než u ostatních

vzorků lepených PUR lepidlem nebo nižší při použití PVAc lepidla. Největší pokles nastal u lepení akátu a douglasky, kde pokles pevnosti představuje dokonce 31,95 % oproti použití PUR lepidla. Zde jsou statisticky významné rozdíly u všech vzorků lepených PUR lepidlem a vzorků akátu a břízy lepených PVAc lepidlem, kde byly naměřeny vyšší hodnoty. Poslední kombinací byla kombinace akátu a olše, kde stejně jako v případě PUR lepidla, bylo dosaženo nejnižší hodnoty. Konkrétně se jednalo o pokles 23,64 %. U těchto vzorků jsou statisticky nevýznamné rozdíly pouze u vzorků referenčního akátu a kombinace akátu a olše lepených PVAc lepidlem. Na grafu 5 lze pozorovat korelaci mezi ohybovou pevností a hustotou. Zde by se hodnota korelace dala opět označit za slabou.

### **Mez úměrnosti**

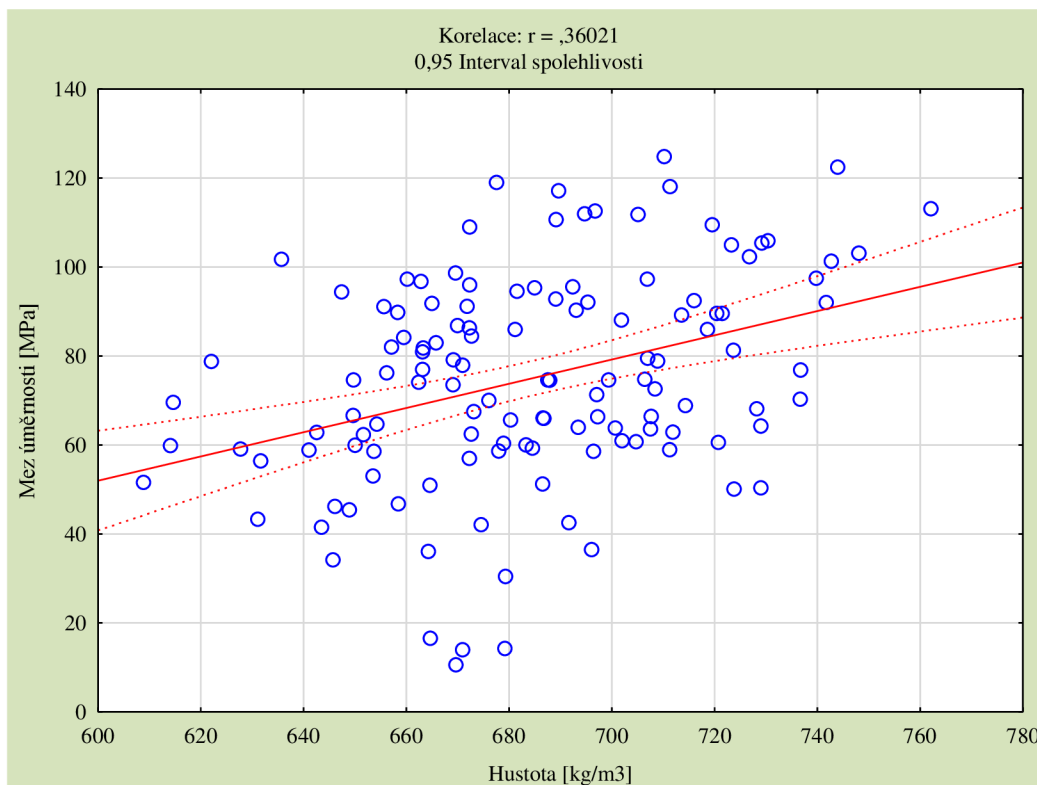
Trend z předchozích kapitol zůstává stejný i v mezi úměrnosti. Jedná se o očekávaný trend, který byl popsán v literární rešerši. Průměrné hodnoty referenčního měření jsou oproti měření Sikora *et al.* (2022) dokonce nižší a to o celých 23,53 %. Tento rozdíl odpovídá přibližné hodnotě rozdílu mezi modulem pružnosti těchto měření. Z hodnot je možno pozorovat menší vliv pevnosti v ohybu, než je vliv modulu pružnosti na mez úměrnosti. Také je nutno zohlednit nižší hustotu námi měřených vzorků, a to konkrétně o 15,16 %. V tabulce 3 v příloze 4, lze vidět, že významný statistický rozdíl referenčního vzorku akátu lepeného PUR lepidlem není pouze při porovnání se vzorkem kombinace akátu a douglasky lepených PUR lepidlem. Ostatní hodnoty rozdílů jsou již statisticky významné. Referenční vzorek akátu slepený PVAc lepidlem vykazoval o celých 41,75 % horší mez úměrnosti ve srovnání s měřením provedeným Sikora *et al.* (2022) a zároveň o 28,04 % poklesla hodnota ve srovnání s referenčním měřením vzorku lepeného PUR lepidlem. Duncanův test ukázal statisticky nevýznamné rozdíly pro všechny vzorky lepené PVAc lepidlem a vzorky s kombinací akátu a olše lepené PUR lepidlem, jak bylo zmíněno výše.



Graf 6: Hodnoty meze úměrnosti (zdroj: autor)

Nejlépe opět dopadla kombinace akátu a břízy lepená PUR lepidlem. V této kombinaci lze pozorovat nárůst meze úměrnosti o 18,68 %. Tento nárůst mohl být předpokládán již z nárůstu hodnot modulu pružnosti a pevnosti v ohybu. Dále lze pozorovat statisticky významné rozdíly pomocí Duncanova testu, který ukazuje, že rozdíl ve všech porovnáních kromě vzorků akátu a douglasky lepených PUR lepidlem. U kombinace akátu a douglasky došlo ke snížení meze úměrnosti ve srovnání s kombinací akátu a břízy. Hodnota oproti referenci stoupla o 9,74 %. U této kombinace již můžeme pozorovat statistickou významnost u dvou vzorků, a to konkrétně u referenčního akátu, a kombinace akátu a břízy lepených PUR lepidlem. Kombinace akátu a olše lepených PUR lepidlem opět dopadla hůře než referenční měření. Tento trend byl nastaven již u modulu pružnosti a pokračoval skrze všechny vyhodnocované veličiny. Konkrétně hodnota meze úměrnosti oproti referenčnímu měření klesla o 17,36 %. Duncanův test nyní nepřekvapivě zařadil statisticky významný rozdíl pro vzorky, které byly lepeny pomocí PUR lepidla a vzorky akátu a douglasky lepených PVAc lepidlem. Statisticky nevýznamné rozdíly jsou tedy pozorovány u ostatních vzorků, které byly lepeny PVAc lepidlem. Tento jev je způsoben celkově horšími vlastnostmi vzorků lepených PVAc lepidlem. Při používání PVAc lepidla se ovšem hodnoty kombinovaných vzorků dřevin relativně rovnaly a nevyskytly se tak výrazné rozdíly mezi jednotlivými kombinacemi. Při kombinování

jednotlivých dřevin měla opět nejlepší mez úměrnosti kombinace akátu a břízy. Zde došlo k nárůstu oproti referenci o pouhých 5,04 %. Duncanův test ukázal statisticky významné rozdíly se vzorky referenčního akátu a kombinací akátu a břízy a akátu a douglasky lepených PUR lepidlem. U ostatních vzorků byly statistické rozdíly nevýznamné. Použitím PVAc lepidla došlo ke snížení meze úměrnosti v kombinaci akátu a olše, která má pouze nepatrný rozdíl oproti referenčnímu měření při použití PVAc lepidla, a to konkrétně o 1,12 %. Tento výsledek je naprosté minimum ztráty meze úměrnosti oproti referenčnímu měření vezme-li v potaz nižší cenu olše a celkově nižší hustotu slepeného vzorku. V Duncanově testu lze opět pozorovat statisticky významné rozdíly u vzorků lepených PUR lepidel, s výjimkou vzorku kombinace akátu a olše lepených PUR lepidlem. Ty jsou stejně jako všechny ostatní vzorky slepeny PVAc lepidlem a spadají do kategorie statisticky nevýznamných rozdílů. Největší ztrátu meze úměrnosti zaznamenala kombinace akátu a douglasky. Tato kombinace oproti lepení PUR lepidlem ztratila 40,25 % hodnoty meze úměrnosti. Při porovnání s referenčním vzorkem lepeným PVAc lepidlem poklesla hodnota o 8,87 %. Duncanův test ukázal statisticky nevýznamné rozdíly u všech vzorků lepených PVAc lepidlem a významné statistické rozdíly u vzorků lepených PUR lepidlem. Korelaci dle grafu 7 opět lze označit za slabou a pozitivní.



Graf 7: Korelace meze úměrnosti závislé na hustotě (zdroj: autor)

Pokud bychom tedy měli z výsledků modulu pružnosti vyvodit závěr, dalo by se říci, že kombinace akátového dřeva a olše sníží hustotu lepeného lamelového dřeva, ale zároveň také sníží modul pružnosti. Kombinací akátu a douglasky dosahujeme přibližně stejné hustoty, avšak modul pružnosti se zvýší přibližně o 707 MPa. Jako další pozitivum této kombinace je možné brát také fakt, že akát je daleko dražší komodita oproti douglasce. Dřevo akátu může být až o 10 000 Kč dražší na jednom m<sup>3</sup> oproti dřevu douglasky Pila Sázava (2023). Tímto krokem by mohly být sníženy případné náklady na výrobky vyráběné touto kombinací dřeva. Největší nevýhodou a tím i velkou slabinou této kombinace je nestabilita výsledků, a tedy velká směrodatná odchylka. Poslední je kombinace akátu a břízy. Tato kombinace má největší hustotu a zároveň nejlepší poměr mezi průměrnou hodnotou měření modulu pružnosti a směrodatnou odchylkou. Zároveň je také dřevo břízy levnější oproti dřevu akátu a to přibližně o 2 000 Kč dražší na m<sup>3</sup> než dřevo douglasky (Nemeth *et al.* 2000; Molnár a Bariska 2002; Pollet *et al.* 2012; Kamperidou *et al.* 2016; Sikora *et al.* 2022).

Ze statistik ohybové pevnosti vyplývá, že použití pouze akátového dřeva nemusí znamenat nejlepší volbu. Při použití správné dřeviny jsme schopni ohybovou pevnost vylepšit, a to dokonce nejen za zvětšení celkové hustoty u kombinace akátu a břízy, ale také při zachování hustoty velmi podobné u kombinace akátu a douglasky. Nicméně, pokud zvolíme nevhodnou dřevinu, může to vést ke snížení výsledné pevnosti jak můžeme pozorovat u kombinace akátu a olše (Nemeth *et al.* 2000; Molnár a Bariska 2002; Pollet *et al.* 2012; Kamperidou *et al.* 2016; Sikora *et al.* 2022).

Z těchto výsledků, tedy lze jednoznačně říci, že lepené lamelové dřevo, které je lepeno pomocí PVAc lepidla nedosahuje hodnot modulu pružnosti, ohybové pevnosti a meze úměrnosti, které jsou dosaženy při lepení PUR lepidlem. Tuto teorii potvrzuje i výzkum Kamboj *et al.* (2020), který se zaměřuje na porovnání vhodnosti lepení pomocí PUR a PVAc lepidla.

#### 4. Závěr

V literární rešerši byla přiblížena problematika lepeného lamelového dřeva. Dále byly popsány všechny použité dřeviny v této práci. Byly analyzovány potřebné podmínky pro zajištění kvality lepeného spoje a s tím související teorie a podstata lepení. Jako poslední byla popsána kapitola o teorii ohybu dřeva. Z poznatků získaných při zpracování literární rešerše byl vypracován metodický postup pro stanovení mechanických vlastností lepeného lamelového dřeva v ohybu dle normy ČSN EN 789 v závislosti na použité kombinaci střídání měkkého a tvrdého dřeva a použitého lepidla.

V práci byly stanoveny mechanické vlastnosti lepeného lamelového dřeva při použití zkoušky pomocí čtyřbodového ohybu. Provedené testy měly za úkol zjistit možné využití různé kombinace střídání měkkého a tvrdého dřeva pro konstrukce lepeného lamelového dřeva. Jednotlivé výsledky byly porovnávány s různými autory, kteří využívali masivní akát. Z výsledků řešené práce bylo zjištěno, že použité polyuretanové lepidlo Kestopur 1010 by bylo vhodné pro určité druhy kombinace dřev, a to konkrétně kombinace akátu a břízy a akátu a douglasky. Zmíněné kombinace vedly ke zlepšení vlastností a možnému snížení ceny produktu. U kombinace akátu s olší již byly vlastnosti zhoršeny. U druhého použitého lepidla konkrétně polyvinylacetátové Rakoll GXL 3 bylo zjištěno zhoršení všech vlastností, a tedy toto lepidlo bylo vyhodnoceno jako nevhodné pro lepené lamelové dřevo.

Jako přínos pro praxi je možno označit optimalizaci materiálového výběru, kdy tato práce nabízí konkrétní použitelné varianty kombinací lepeného lamelového dřeva, což může vést k efektivnější výrobě a následně kvalitě konstrukcí. Práce také poukázala na potenciál alternativních dřevin pro lepené lamelové konstrukce, jako je akát, bříza a douglaska a tím pádem i poukázala na možnosti inovace ve výrobních procesech.

Přínosem pro vědu je zjištění nevhodné aplikace PVAc lepidla pro lepené lamelové dřevo. Tento typ lepidla již byl pro lepené lamelové dřevo použit s nevyhovujícími výsledky. Lepidlo ovšem nikdy nebylo otestováno na zvolené kombinaci dřev. Dalším zjištěním byly zjištěné mechanické vlastnosti v ohybu u kombinace měkkého a tvrdého dřeva pro vrstvené materiály na bázi dřeva. Tato práce by také mohla být brána jako podnět pro hlubší prozkoumání kombinovaných variant lepeného lamelového dřeva.



## 5. Seznam literatury a použitých zdrojů

ADAMÍČEK, Radovan, 2020. *Chemické složení dřeva - Složení a vlastnosti dřeva - Dřevo centrum* [online] [cit. 2024-03-23]. Dostupné z: <https://drevo.celyden.cz/sloen-a-vlastnosti-deva/chemicke-slozeni-dreva/index.html>

BABIAK, Marián, Milan GAFF, Adam SIKORA a Štěpán HYSEK, 2018. Modulus of elasticity in three- and four-point bending of wood. *Composite Structures*. **204**, 454–465. ISSN 0263-8223. DOI:10.1016/j.compstruct.2018.07.113

BĚHÁLEK, Luboš, 2014. *Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání* [online] [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>

BIJAK, Szymon a Hubert LACHOWICZ, 2021. Impact of Tree Age and Size on Selected Properties of Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) Wood. *Forests*. **12**(5), 634. ISSN 1999-4907. DOI:10.3390/f12050634

BODIG, Jozef a Benjamin A. JAYNE, 1993. *Mechanics of wood and wood composites*. Reprint ed. Malabar, Fla: Krieger Pub. ISBN 978-0-89464-777-2.

BÖHM, Martin a Jan BOMBA, 2012. *Materiály na bázi dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6.

BRIŠ, Petr, Jiří. KUBĚNA a Jan ŠTRKANĚ, 2017. *Lepení v praxi*. První vydání. Praha: Grada Publishing. ISBN 978-80-271-0247-1.

BROCKMANN, W., ed., 2009. *Adhesive bonding: materials, applications and technology*. Weinheim: Wiley-VCH. ISBN 978-3-527-31898-8.

BUCUR, Voichita, 2014. *Delamination in Wood, Wood Products and Wood-Based Composites*. B.m.: Springer. ISBN 978-94-007-8972-2.

ČSN EN 789, 2005. *Dřevěné konstrukce - Zkušební metody - Zjišťování mechanických vlastností desek na bázi dřeva*. 2005. B.m.: Český normalizační institut.

DOLEJŠ, Alois a František KADLEČEK, 1984. *Technologie pro dřevooobory*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.

EBNESAJJAD, Sina a Cyrus F. EBNESAJJAD, 2014. *Surface treatment of materials for adhesive bonding*. 2nd edition. Amsterdam: William Andrew, an imprint of Elsevier. ISBN 978-0-323-26435-8.

EISNER, K, V BERGER, HAVLÍČEK a Miloš OSTEN, 1966. *Příručka lepení dřeva*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.

EVROPSKÁ UNIE, 2024. *Evropská unie* [online] [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: [https://european-union.europa.eu/index\\_cs](https://european-union.europa.eu/index_cs)

FRESE, M. a H. J. BLASS, 2007. Characteristic bending strength of beech glulam. *Materials and Structures*. **40**(1), 3–13. ISSN 1359-5997, 1871-6873. DOI:10.1617/s11527-006-9117-9

FRIESS, František, Jan REISNER a Aleš ZEIDLER, 2010. *Materiály I. - Pro učební obor truhlář*. 1. vyd. Praha: Informatorium. ISBN 978-80-7333-070-5.

GANDELOVÁ, Libuše, Jarmila ŠLEZINGEROVÁ a Petr HORÁČEK, 2008. *Nauka o dřevě*. 2. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 978-80-7157-577-1.

GRYC, V, VAVRČÍK, H, a ZEIDLER, A, 2010. Dřevo trnovníku bílého (akátu). *Lesnická práce*. (9), 89, 27. ISSN 0322-9254. DOI:0322-9254

HRÁZSKÝ, Jaroslav a Pavel KRÁL, 2005. *Kompozitní materiály na bázi dřeva*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-7157-751-0.

KAMBOJ, Gourav, Milan GAFF, Jerzy SMARDZEWSKI, Eva HAVIAROVÁ, Vlastimil BORŮVKA a Anil Kumar SETHY, 2020. Numerical and experimental investigation on the elastic stiffness of glued dovetail joints. *Construction and Building Materials*. **263**, 120613. ISSN 0950-0618. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.120613

KAMPERIDOU, V, I BARBOUTIS a V VASSILIOU, 2016. Prospects for the Utilization of Black locust Wood (*Robinia pseudoacacia* L.) coming from plantations in Furniture Manufacturing. In: *In Proceedings of the 27th International Conference on Wood Modification and Technology*. s. 123–128.

KREIBICH, Viktor a Karel HOCH, 1991. *Koroze a technologie povrchových úprav: Určeno pro stud. fak. strojní*. 2. vyd. Praha: ČVUT. ISBN 978-80-01-00476-0.

KUKLÍK, Petr, 2005. *Dřevěné konstrukce*. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT. ISBN 80-01-03310-4.

KYTKA, Tomáš, 2019. *Posouzení kvality PUR lepidla pro nosné dřevěné konstrukce metodou stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání*. Praha. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.

KYTKA, Tomáš, Miroslav GAŠPARÍK, Lukáš SAHULA, David NOVÁK, Elham KARAMI, Sumanta DAS a Martin SVITÁK, 2024. Predicted and Experimental Bending Behaviour of Glulam Bonded by RPF Adhesive. *Materials*. **17**(2), 514. ISSN 1996-1944. DOI:10.3390/ma17020514

LEHMAN, Eben, 2018. October 15, 1934: Glued Laminated Timber Comes to America. *Forest History Society* [online] [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://foresthistor.org/october-15-1934-glued-laminated-timber-comes-to-america/>

LIPTÁKOVÁ, Eva a Milan SEDLIAČIK, 1989. *Chémia a aplikácia pomocných látok v drevárskom priemysle*. Bratislava: Alfa. ISBN 80-05-00116-9.

MACHÁČEK, Josef, 2016. *11. Dřevo, materiálové vlastnosti* [online]. 2016. B.m.: online. Dostupné z: <https://people.fsv.cvut.cz/~machacek/prednaskyNNK/NNK-11.pdf>

MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ, 2023. eAGRI. *eAGRI* [online] [cit. 2024-03-21]. Dostupné z: [https://eagri.cz/public/portal/mze/tiskovy-servis/tiskove-zpravy/x2023\\_nase-lesy-se-meni-treti-rok-po-sobe-se](https://eagri.cz/public/portal/mze/tiskovy-servis/tiskove-zpravy/x2023_nase-lesy-se-meni-treti-rok-po-sobe-se)

MOLNÁR, S a M BARISKA, 2002. *Industrial trees of Hungry-Wood species in Hungary*.

- MUDRA, F, 2011. *Materiály na bázi dřeva pro nosné účely*. Praha. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- MUSIL, Ivan a Jan HAMERNÍK, 2007. *Jehličnaté dřeviny: přehled nahosemenných i výtrusných dřevin*. Vyd. 1. Praha: Academia. ISBN 978-80-200-1567-9.
- MUZIKÁŘ, Zdeněk, 2008. *Materiály II - pro učební obor Truhlář*. 1. vyd. Praha: Infomatorium. ISBN 978-80-7333-061-3.
- NAGLER, Jacob, 2019. *Failure Mechanics of Multi Materials Laminated Systems Review Analysis-Based Project*. DOI:10.13140/RG.2.2.15062.91200
- NEMETH, R, S FEHER, Marián BABIAK, S CUNDERLIK a I KESZLEN, 2000. *Static and dynamic strength properties. Final report on the project activities. Technology for high quality products from black locust*. Brusel: Inco-Copernicus.
- OSTEN, Miloš, 1986. *Práce s lepidly a tmely*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.
- PÁNEK, Miloš, 2015. *Nátěry na dřevo a jejich testování*. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2548-7.
- PETRIE, E.M., 2013. 8 - Adhesive bonding of textiles: principles, types of adhesive and methods of use. In: I. JONES a G.K. STYLIOS, ed. *Joining Textiles*. B.m.: Woodhead Publishing, s. 225–274. ISBN 978-1-84569-627-6. DOI:10.1533/9780857093967.2.225
- PILA SÁZAVA, 2023. *Pila Sázava* [online] [cit. 2024-03-24]. Dostupné z: <https://www.pilasazava.cz/>
- PIZZI, A., ed., 1989. *Wood adhesives: chemistry and technology*. New York: M. Dekker. ISBN 978-0-8247-1579-3.
- POKORNÝ, Jiří, 2000. *Lepení a tmelení v dílně i domácnosti*. 1. vyd. Praha: Grada. ISBN 80-7169-857-1.
- POLLET, C., C. VERHEYEN, J. HÉBERT a B. JOUREZ, 2012. Physical and mechanical properties of black locust (*Robinia pseudoacacia*) wood grown in Belgium. *Canadian Journal of Forest Research*. **42**(5), 831–840. ISSN 0045-5067, 1208-6037. DOI:10.1139/x2012-037
- POŽGAJ, Alexander, Dušan CHOVANEC, Stanislav KURJATKO a Marián BABIAK, 1993. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd. Bratislava: Príroda. ISBN 80-07-00600-1.
- PROCESSING - WOOD, 2020. Manufacture of mass timber: glued laminated timber (glulam), cross laminated timber (CLT). *Processing-wood.com* [online] [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: [https://processing-wood.com/processes/mass\\_timber/](https://processing-wood.com/processes/mass_timber/)
- REISNER, Jan a Matrin BÖHM, 2010. Lepené lamelové dřevo. *Lesnická práce - nakladatelství a vydavatelství* [online] [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.lesprace.cz/casopis-lesnicka-prace-archiv/rocnik-89-2010/lesnicka-prace-c-11-10/lepene-lamelove-drevo>
- REISNER, Jan a Aleš ZEIDLER, 2010. Možnosti využití dřeva břízy. *Lesnická práce - nakladatelství a vydavatelství* [online] [cit. 2024-03-14]. Dostupné

z: <https://www.lesprace.cz/casopis-lesnicka-prace-archiv/rocnik-89-2010/lesnicka-prace-c-12-10/moznosti-vyuziti-dreva-brizy>

RHUDE, Andreas Jordahl, 1996. *Structural glued laminated timber: History of its - ProQuest* [online] [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.proquest.com/docview/214631336?sourcetype=Scholarly%20Journals>

ROFFAEL, Edmone, 2016. Significance of wood extractives for wood bonding. *Applied Microbiology and Biotechnology*. **100**(4), 1589–1596. ISSN 0175-7598, 1432-0614. DOI:10.1007/s00253-015-7207-8

ROWELL, Roger M., ed., 2005. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton, Fla: CRC Press. ISBN 978-0-8493-1588-6.

SEDLIAČIK, Milan, 1992. *Nové kompozície polykondenzačných lepidiel a ich aplikácie v drevárskom priemysle*. ISBN 978-80-228-0207-9.

SHUKLA, S. R. a D. Pascal KAMDDEM, 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. ISSN 0018-3768, 1436-736X. DOI:10.1007/s00107-007-0209-1

SIKORA, Adam, Kateřina HÁJKOVÁ a Tereza JURCZYKOVÁ, 2022. Degradation of Chemical Components of Thermally Modified Robinia pseudoacacia L. Wood and Its Effect on the Change in Mechanical Properties. *International Journal of Molecular Sciences*. **23**, 15652. DOI:10.3390/ijms232415652

SLODICAK, Marian, Dušan KACÁLEK, Jiří NOVÁK a David DUŠEK, 2015. *Vědci nabízejí nové možnosti, jak dobře pěstovat douglasku v našich lesích – Les aktuálně* [online] [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://www.lesaktualne.cz/vedci-nabizeji-nove-moznosti-jak-dobre-pestovat-douglasku-v-nasich-lesich/>

TESAŘOVÁ, Daniela, Josef HLAVATÝ a Petr ČECH, 2014. *Povrchové úpravy dřeva*. 1. vyd. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-4715-6.

TRÁVNÍK, Arnošt, 2005. *Technologické operace výroby nábytku*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-7157-865-7.

TRÁVNÍK, Arnošt a Jaroslav SVOBODA, 2007. *Technologické procesy výroby nábytku*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 978-80-7375-056-5.

UHLÍŘ, Alois, 1997. *Technologie výroby nábytku II*. 2. vyd. Praha: Informatorium. ISBN 80-86073-09-2.

VASILIEV, Valery V. a Evgeny V. MOROZOV, 2018. *Advanced mechanics of composite materials and structures*. Fourth edition. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. ISBN 978-0-08-102209-2.

VĚTVIČKA, Václav, 1999. *Evropské stromy*. Vyd. 1. Praha: Aventinum. ISBN 978-80-7151-104-5.

VOSTŘÁK, Radek, 2022. *Klastry nábytkářů v ČR a na úrovni EU a jejich vliv na jejich členy*. Praha. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.

YOUNG, Charlie, 2023. Flexural Strength: Key Factors and Measurement. *EngineerExcel* [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://engineerexcel.com/flexural-strength/>

ZEIDLER, Aleš a Vlastimil BORŮVKA, 2016. *Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin - podklady pro cvičení*. Vydání první. V Praze: Česká zemědělská univerzita. ISBN 978-80-213-2674-3.

## 6. Seznam obrázků, tabulek a grafů

### Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| OBRÁZEK 1: CHYBA SOUDRŽNOSTI A PŘILNAVOSTI (ZDROJ: UPRAVENO Z: PETRIE 2013).....                              | 31 |
| OBRÁZEK 2: ŠPATNÁ A DOBRÁ SMÁČLIVOST (ZDROJ: UPRAVENO Z: PETRIE 2013).....                                    | 32 |
| OBRÁZEK 3: ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ (ZDROJ: UPRAVENO Z: BABIAK <i>ET AL.</i> 2018).....                               | 35 |
| OBRÁZEK 4: ROZLOŽENÍ SMYKOVÉHO NAPĚTÍ V NOSNÍKU (ZDROJ: UPRAVENO Z BABIAK <i>ET AL.</i> 2018).....            | 36 |
| OBRÁZEK 5: DIAGRAM NAPĚTÍ (ZDROJ: UPRAVENO Z POŽGAJ <i>ET AL.</i> 1993).....                                  | 36 |
| OBRÁZEK 6: SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ TŘÍ A ČTYŘBODOVÉHO OHYBU (ZDROJ: UPRAVENO Z BABIAK <i>ET AL.</i> 2018)..... | 37 |
| OBRÁZEK 7: VYSELEKTOVÁNÍ VAD JEDNOTLIVÝCH LAMEL (ZDROJ: AUTOR PRÁCE).....                                     | 43 |
| OBRÁZEK 8: SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VRSTVENÍ VZORKŮ (ZDROJ: AUTOR).....   | 44 |
| OBRÁZEK 9: VYZNAČENÁ MÍSTA MĚŘENÍ ŠÍŘKY A TLOUŠTKY LAMEL (ZDROJ: AUTOR PRÁCE).....                            | 44 |
| OBRÁZEK 10: LAMELA PŘI NANÁŠENÍ PVAC LEPIDLA (ZDROJ: AUTOR PRÁCE).....  | 45 |
| OBRÁZEK 11: LAMELA PO ROZETŘENÍ PVAC LEPIDLA (ZDROJ: AUTOR PRÁCE).....  | 45 |
| OBRÁZEK 12: LISOVÁNÍ PŘI VYTVRZOVÁNÍ PUR LEPIDLA (ZDROJ: AUTOR PRÁCE).....                                    | 46 |
| OBRÁZEK 13: POROVNÁNÍ LEPENÝCH SPÁR VLEVO PVAC, VPRAVO PUR (ZDROJ: AUTOR PRÁCE).....                          | 47 |
| OBRÁZEK 14: SCHÉMA JEDNOTLIVÝCH VZDÁLENOSTÍ U ČTYŘBODOVÉHO OHYBU (ZDROJ: AUTOR).....                          | 47 |

### Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| TABULKA 1: SROVNÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ (ZDROJ: MUDRA 2011)..... | 17 |
| TABULKA 2: CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH ADHEZIV (ZDROJ: AUTOR PRÁCE).....         | 42 |

### Seznam grafů

|  |    |
|--|----|
| GRAF 1: HUSTOTA KOMBINOVANÝCH SLEPENÝCH VZORKŮ (ZDROJ: AUTOR).....       | 49 |
| GRAF 2: HODNOTY MODULU PRUŽNOSTI (ZDROJ: AUTOR).....                     | 51 |
| GRAF 3: KORELACE MODULU PRUŽNOSTI ZÁVISLÉHO NA HUSTOTĚ.....              | 52 |
| GRAF 4: POROVNÁVÁNÍ OHYBOVÉ PEVNOSTI (ZDROJ: AUTOR).....                 | 53 |
| GRAF 5: KORELACE OHYBOVÉ PEVNOSTI ZÁVISLÉ NA HUSTOTĚ (ZDROJ: AUTOR)..... | 55 |
| GRAF 6: HODNOTY MEZE ÚMĚRNOSTI (ZDROJ: AUTOR).....                       | 57 |
| GRAF 7: KORELACE MEZE ÚMĚRNOSTI ZÁVISLÉ NA HUSTOTĚ (ZDROJ: AUTOR).....   | 58 |

## **7. Seznam příloh**

Příloha č. 1 - Tabulka průměrných výsledků (zdroj: autor)

Příloha č. 2 - Tabulka s hustotou jednotlivých lamel před slepením

Příloha č. 3 - Tabulka s hodnotami měření ostatních autorů

Příloha č. 4 - Tabulky Duncanových testů

Příloha č. 5 - Technický list Kestopur 1010

Příloha č. 6 - Technický list Rakoll GXL 3

Příloha č. 7 - Fotografie příkladů různých porušení vzorků při testování

## 8. Přílohy

Příloha č. 1 - Tabulka průměrných výsledků (zdroj: autor)

| Vzorek  | Lepidlo | ∅ hustota | směr. odch | var. koe | ∅ MOE     | směr. odch | var. koe. | ∅ MOR  | směr. odch | var. koe | ∅ LOP  | směr. odch | var. koe |
|---------|---------|-----------|------------|----------|-----------|------------|-----------|--------|------------|----------|--------|------------|----------|
| AK      | PVAc    | 674,47    | 16,91      | 2,51     | 10 107,70 | 2 125,77   | 21,03     | 134,15 | 29,82      | 22,23    | 62,09  | 22,63      | 36,44    |
| AK      | PUR     | 686,38    | 27,84      | 4,06     | 10 722,88 | 788,11     | 7,35      | 162,28 | 30,3       | 18,67    | 86,29  | 12,46      | 14,44    |
| AK + BR | PVAc    | 712,88    | 12,48      | 1,75     | 9 919,31  | 1 502,77   | 15,15     | 139,13 | 30,14      | 21,67    | 65,22  | 12,76      | 19,57    |
| AK + BR | PUR     | 729,22    | 15,53      | 2,13     | 11 425,99 | 716,28     | 6,27      | 179,07 | 34,83      | 19,45    | 102,41 | 14,24      | 13,9     |
| AK + OL | PVAc    | 645,49    | 24,51      | 3,8      | 8 945,28  | 1 262,87   | 14,12     | 106,97 | 20,66      | 19,32    | 61,39  | 22,17      | 36,12    |
| AK + OL | PUR     | 657,34    | 20,07      | 3,05     | 10 550,45 | 968,58     | 9,18      | 140,09 | 23,07      | 16,47    | 71,31  | 15,1       | 21,18    |
| AK + DG | PVAc    | 683,71    | 14,61      | 2,14     | 9 477,87  | 1 945,96   | 20,53     | 114,38 | 28,57      | 24,98    | 56,58  | 21,23      | 37,53    |
| AK + DG | PUR     | 686,34    | 13,07      | 1,91     | 11 429,91 | 1 261,61   | 11,04     | 168,09 | 30,22      | 17,98    | 94,7   | 19,4       | 20,48    |



## Příloha č. 2 – Tabulka s hustotou jednotlivých lamel před slepením

| Lamely  | Lepidlo | Ø hustota | směr. odch | var. koe | Lamely  | Lepidlo | Ø hustota | směr. odch | var. koe |
|---------|---------|-----------|------------|----------|---------|---------|-----------|------------|----------|
| AK      | PVAc    | 662,35    | 24,02      | 3,63     | AK      | PVAc    | 662,35    | 24,02      | 3,63     |
| AK      | PUR     | 669,70    | 40,63      | 6,07     | AK      | PUR     | 669,70    | 40,63      | 6,07     |
| AK + BR | PVAc    | 711,79    | 36,49      | 5,13     | AK + BR | PVAc    | 707,34    | 21,57      | 3,05     |
| AK + BR | PUR     | 679,99    | 24,76      | 3,64     | AK + BR | PUR     | 710,80    | 20,26      | 2,85     |
| AK + OL | PVAc    | 704,05    | 36,64      | 5,20     | AK + OL | PVAc    | 525,19    | 40,82      | 7,77     |
| AK + OL | PUR     | 699,67    | 30,48      | 4,36     | AK + OL | PUR     | 540,86    | 45,78      | 8,46     |
| AK + DG | PVAc    | 698,46    | 37,34      | 5,35     | AK + DG | PVAc    | 611,25    | 23,11      | 3,78     |
| AK + DG | PUR     | 705,97    | 39,76      | 5,63     | AK + DG | PUR     | 618,14    | 20,17      | 3,26     |

## Příloha č. 3 Tabulka s hodnotami měření ostatních autorů

| Veličina  | Maďarsko <sup>1</sup> | Maďarsko <sup>2</sup> | Řecko  | Polsko | Belgie | Česko  |
|-----------|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| MOE [MPa] | 9 000 - 13 000        | 18 122                | 10 977 | 14 228 | 15 700 | 13 269 |
| MOR [MPa] | 103–169               | 173,02                | 109    | 155,5  | 138    | 150,8  |
| LOP [MPa] | -                     | -                     |        | -      | -      | 106,6  |

Vysvětlivky tabulky - Maďarsko<sup>1</sup> (Molnár a Bariska 2002); Maďarsko<sup>3</sup> a Řecko (Kamperidou *et al.* 2016); Polsko (Bijak a Lachowicz 2021); Belgie (Pollet *et al.* 2012); Česko (Sikora *et al.* 2022).

## Příloha č. 4 – Tabulky Duncanových testů

### Duncanův test pro modul pružnosti

| Cell No. | Vzorek                     | {1}      | {2}      | {3}      | {4}      | {5}      | {6}      | {7}      | {8}      |
|----------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          |                            | 10723,   | 11426,   | 10550,   | 11430,   | 10108,   | 9919,3   | 8946,3   | 9477,9   |
| 1        | AK - PUR                   |          | 0,160023 | 0,729480 | 0,183288 | 0,247520 | 0,144360 | 0,001348 | 0,025087 |
| 2        | AK + BR - PUF              | 0,160023 |          | 0,098531 | 0,993817 | 0,015075 | 0,006206 | 0,000028 | 0,000426 |
| 3        | AK + OL - PUF              | 0,729480 | 0,098531 |          | 0,109382 |          | 0,375138 | 0,003476 | 0,049562 |
| 4        | AK + DG - PUF              | 0,183288 | 0,993817 | 0,109382 |          | 0,017031 | 0,006893 | 0,000023 | 0,000467 |
| 5        | AK - PVA <sub>d</sub>      | 0,247520 | 0,015075 | 0,375138 | 0,017031 |          | 0,705568 | 0,033004 | 0,236347 |
| 6        | AK + BR - PVA <sub>d</sub> | 0,144360 | 0,006206 | 0,235373 | 0,006893 | 0,705568 |          | 0,065979 | 0,376536 |
| 7        | AK + OL - PVA <sub>d</sub> | 0,001348 | 0,000028 | 0,003476 | 0,000023 | 0,033004 | 0,065979 |          | 0,287257 |
| 8        | AK + DG - PVA <sub>d</sub> | 0,025087 | 0,000426 | 0,049562 | 0,000467 | 0,236347 | 0,376536 | 0,287257 |          |

### Duncanův test pro ohybovou pevnost

| Cell No. | Vzorek                     | {1}      | {2}      | {3}      | {4}      | {5}      | {6}      | {7}      | {8}      |
|----------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          |                            | 162,28   | 179,07   | 140,09   | 168,09   | 134,15   | 139,13   | 106,97   | 114,38   |
| 1        | AK - PUR                   |          | 0,121612 | 0,031152 | 0,568288 | 0,011109 | 0,032063 | 0,000025 | 0,000043 |
| 2        | AK + BR - PUF              | 0,121612 |          | 0,000418 | 0,282829 | 0,000086 | 0,000364 | 0,000017 | 0,000020 |
| 3        | AK + OL - PUF              | 0,031152 | 0,000418 |          | 0,009363 | 0,586493 | 0,924765 | 0,003160 | 0,020656 |
| 4        | AK + DG - PUF              | 0,568288 | 0,282829 | 0,009363 |          | 0,002463 | 0,008847 | 0,000020 | 0,000026 |
| 5        | AK - PVA <sub>d</sub>      | 0,011109 | 0,000086 | 0,586493 | 0,002463 |          | 0,625663 | 0,011670 | 0,054265 |
| 6        | AK + BR - PVA <sub>d</sub> | 0,032063 | 0,000364 | 0,924765 | 0,008847 | 0,625663 |          | 0,003552 | 0,021817 |
| 7        | AK + OL - PVA <sub>d</sub> | 0,000025 | 0,000017 | 0,003160 | 0,000020 | 0,011670 | 0,003552 |          | 0,467489 |
| 8        | AK + DG - PVA <sub>d</sub> | 0,000043 | 0,000020 | 0,020656 | 0,000026 | 0,054265 | 0,021817 | 0,467489 |          |

### Duncanův test pro mez úměrnosti

| Cell No. | Vzorek                     | {1}      | {2}      | {3}      | {4}      | {5}      | {6}      | {7}      | {8}      |
|----------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          |                            | 86,294   | 102,41   | 71,312   | 94,703   | 62,088   | 65,216   | 61,389   | 56,576   |
| 1        | AK - PUR                   |          | 0,016723 | 0,019997 | 0,187927 | 0,000446 | 0,001750 | 0,000371 | 0,000046 |
| 2        | AK + BR - PUF              | 0,016723 |          | 0,000050 | 0,227508 | 0,000025 | 0,000028 | 0,000020 | 0,000017 |
| 3        | AK + OL - PUF              | 0,019997 | 0,000050 |          | 0,000555 | 0,173868 | 0,339001 | 0,158317 | 0,038548 |
| 4        | AK + DG - PUF              | 0,187927 | 0,227508 | 0,000555 |          | 0,000030 | 0,000060 | 0,000026 | 0,000020 |
| 5        | AK - PVA <sub>d</sub>      | 0,000446 | 0,000025 | 0,173868 | 0,000030 |          | 0,623283 | 0,912557 | 0,418108 |
| 6        | AK + BR - PVA <sub>d</sub> | 0,001750 | 0,000028 | 0,339001 | 0,000060 | 0,623283 |          | 0,574483 | 0,220516 |
| 7        | AK + OL - PVA <sub>d</sub> | 0,000371 | 0,000020 | 0,158317 | 0,000026 | 0,912557 | 0,574483 |          | 0,450037 |
| 8        | AK + DG - PVA <sub>d</sub> | 0,000046 | 0,000017 | 0,038548 | 0,000020 | 0,418108 | 0,220516 | 0,450037 |          |

# Příloha č. 5 - Technický list Kestopur 1010

Date 29.01.2024



Page 1/2

## Kestopur 1010



Kestopur 1010 is a one-part, moisture curing PU-adhesive for production of engineered wood products. It complies with the requirements of EN 15425 norm and is approved for manufacturing of CE-labelled glulam according to EN 14080.



- Fiber reinforced
- Low foaming
- Non-sagging

### AREA OF APPLICATION

Kestopur 1010 is a 1-component, moisture curing PU-adhesive for jointing of wooden materials. It complies with the requirements of EN 15425 and is approved for manufacturing of CE-labelled glulam according to EN 14080, manufacturing of CE-labelled finger jointed wood according to EN 15497 and CE-labelled CLT (cross laminated timber) according to EN 16351.

It can also be used for manufacturing other engineered wood products and applications that require unexceptionally good moisture resistance.

Kestopur 1010 is solvent- and formaldehyde-free. Complies with M1-emission classification for building materials.

### INSTRUCTIONS FOR USE

The surfaces to be bonded must be clean and dust-free. Suitable for nozzle and ribbon application. Apply the adhesive in an even layer one or two-sided. In order to determine the necessary pressing time and ensure the adhesive joint strength, adequate tests are to be carried out before use in full-scale production.

Use safety gloves when using Kestopur 1010 adhesive. Wear a breathing mask if spraying the glue and working in temperature above +40 °C.

Remove fresh adhesive stains with a dry cloth and clean the surfaces with acetone or Kilto Cleaner 307. Hardened adhesive can be removed only mechanically.

### ADDITIONAL INFORMATION

The information given in this product data sheet is based on our tests and our practical knowledge. The technical data is defined in standard conditions. Variations in local working conditions will affect the product performance and result. The result is also strongly affected by working methods. We guarantee the high quality of our products according to our Quality Management System. No liability can be accepted from incorrect use of the product or prevailing

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| TYPE/BINDER                      | Polyurethane  |
| DENSITY/SPECIFIC WEIGHT          | approx. 1.2 kg/dm <sup>3</sup>  |
| COLORS                           | Transparent, light after drying.  |
| VISCOSITY                        | 10000 mPas. (Brookfield, RVT 20 °C)   |
| OPEN TIME                        | max. 10 min<br>(amount applied 180 g/m <sup>2</sup> , wood moisture 15 %, temperature 20 °C, RH 50 %)   |
| CLASSIFICATIONS AND CERTIFICATES | EN 15425 I 70 GP 0.3<br>AUS/NZ 4364:2010 type I   |
| CONSUMPTION                      | 140-180 g/m <sup>2</sup> finger jointing<br>160-200 g/m <sup>2</sup> face jointing  |
| PRESSING TIME                    | From 30 min when face jointing  |
| WORKING CONDITIONS               | Temperature in the hall at least 15 °C<br>(according to EN 14080; EN16351; EN 15497)  |
| APPLICATION TEMPERATURE          | 18-30 °C (according to EN 14080; EN16351; EN 15497)   |
| AIR HUMIDITY                     | During gluing 40-75 % and after pressing ≥ 30 % (according to EN 14080, EN 16351)   |
| WOOD MOISTURE CONTENT            | 6-20 % (we recommend approx. 15 % humidity)   |
| JOINT SIZE                       | < 0.3 mm  |
| STORAGE                          | Can be stored in a dry and cool place (+10-20 °C), if stored in an unopened original package at +20 °C, the shelf life is 4 months for 1000 l containers and 6 months for smaller packages. |

KILTO OY, P.O. BOX 250, FI-33101 TAMPERE, FINLAND, TEL +358 207 710 100, FAX +358 207 710 101, [www.kilto.com](http://www.kilto.com)



conditions, over which we have no control. Thus, we cannot be held responsible for the final result. The user of the product must test the product's suitability for the intended application.

**ENVIRONMENT AND SAFETY**

Avoid unnecessary skin contact and exposure with the fresh product, use safety gloves. Refer to material safety data sheet. For information on product and package disposal, visit [www.kiilto.com](http://www.kiilto.com).



## Rakoll® GXL 3

|                         |   |
|-------------------------|---|
| <b>Typ lepidla</b>      | PVAc-lepidlo, které při jednosložkovém zpracování splňuje požadavky skupiny D 3 a při smíchání s tvrdidlem Rakoll® GXL-3-Härter splňuje požadavky skupiny D 4.  |
| <b>Výhody produktu</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- dobrá voděodolnost</li> <li>- vytvrzuje velmi rychle</li> <li>- při lisování za tepla umožňuje velmi krátké lisovací časy</li> <li>- vytvrzený lepený spoj se vyznačuje dobrou odolností vůči vyšším teplotám</li> <li>- certifikát IFT Rosenheim dle EN 204: D3 při jednosložkovém zpracování a D4 při dvousložkovém zpracování</li> <li>- certifikát dle EN 14257 (WATT 91)</li> </ul> |
| <b>Typické použití</b>  | <p>Aplikace, příklady použití:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- plošné lepení dekoračních folií</li> <li>- dýhování</li> <li>- lepení ve vysokofrekvenčním lisu</li> <li>- plošné lepení HPL/CPL v taktových lisech</li> <li>- lepení korpusů a montážní lepení</li> <li>- lepení spárovky a bloků z měkkého i tvrdého dřeva a dřevotřísky</li> </ul>   |
| <b>Vhodné substráty</b> | dřevo a materiály na bázi dřeva   |

### Typické vlastnosti

| Vlastnost   | Hodnota          |                      |                  |
|---|------------------|----------------------|------------------|
|   | Rakoll® GXL 3    | Rakoll® GXL 3 Härter | Směs             |
| Báze  | PVAc-Disperze    | Polyisokyanát        | -                |
| Barva   | bílá             | bezbarvý             | bílá             |
| pH  | cca 3            | -                    | cca 3            |
| Bílý bod  | cca 7°C          | -                    | cca 7°C          |
| Viskozita<br>(Brookfield HB, Sp.3,<br>20UPM, +20°C) | cca 13 000 mPa.s | -                    | cca 11 500 mPa.s |
| Skladovatelnost                                     | 9 měsíců         |                      |                  |

**Pokyny k použití** Lepidlo se nanáší jednostranně, při požadavku na vysokou voděodolnost oboustranně pomocí nanášecího zařízení, ručního válečku, špachtle, štětce nebo jiného zařízení v tenké a rovnoměrné vrstvě.

Dobrých výsledků je dosaženo za následujících předpokladů:

- teplota místnosti, materiálu a lepidla : 18 – 20°C
- vlhkost dřeva: 8 – 10%
- relativní vlhkost vzduchu: 40 – 60%

Množství nánosu:

- plošné lepení: 60 – 140 g/m<sup>2</sup>
- montážní lepení: 160 – 180 g/m<sup>2</sup>

Otevřený čas při 150 g/m<sup>2</sup>: 8 – 10 minut

Lisovací tlak je dle typu lepení : 0,1 – 0,8 N/mm<sup>2</sup>



### Pokyny k použití

#### Minimální lisovací čas:

- plošné lepení dekoračních folií v taktových lisech: 5 - 10 vteřin
- vysokofrekvenční lepení s podélným ohřevem: od 15 vteřin

#### Lepení:

- plošné lepení HPL/CPL v taktových lisech při 70°C: od 45 vteřin
- montážní lepení: 8 - 15 minut
- lepení spárovky a bloků (měkké dřevo): 10 - 15 minut

#### Mísicí poměr:

- 100 % hm. Rakoll® GXL 3 s 5 % hm. Rakoll® GXL 3 Härter  
Lepidlo a tvrdidlo důkladně rozmíchat.

Hrncový čas: cca 12 hodin při běžné teplotě. Teplota nad 20°C zkracuje hrncový čas.

#### Otevřený čas / Vytvrzovací čas:

Otevřený čas a čas vytvrzení jsou silně závislé na pracovních podmínkách, např. teplota, vlhkost a savost substrátu, množství nánosu a prnutí v materiálu ovlivňuje otevřený čas i dobu vytvrzení.

#### Příprava dřeva:

Díly by měly být čisté a zbavené prachu a mastnoty. Tolerance při sestavení dílů mají za následek delší doby vytvrzení a sníženou pevnost. Dřevo by se mělo připravit krátce před lepením.

#### Lisování:

Lepené díly složte během otevřeného času a lisujte tak dlouho, dokud není dosaženo požadované počáteční počáteční pevnosti. Lisovací tlak by měl být tak vysoký, aby v celé oblasti lepení došlo k uzavření lepené spáry. Mechanické pevnosti dílů potřebné pro další zpracování je dosaženo během krátké doby v závislosti na materiálu a typu lepeného spoje. Vyšší voděodolnost lepených spár se vytváří pomaleji a měla by být zkoušena nejdříve sedm dní po lepení.

#### Barvení dřeva:

Vzhledem k rozdílnému složení silic v dřevinách dle druhu dřeva a např. i v závislosti na oblasti růstu či předúpravě dřeva může v jednotlivých případech dojít k nepředvídatelné změně barvy u některých druhů dřeva, jako jsou např. buk, třešeň a jiné.

Kromě toho může železo v kombinaci s tříslovou kyselinou dřeva způsobit změnu barvy, zejména v dubu.

Doporučujeme provést vlastní zkoušky!

## Our Focus is Clear. Perfecting Adhesives.

Důležité: poskytnuté informace, specifikace, postupy a doporučení (dále jen "informace"), jsou založeny na základě našich zkušeností, z jejichž správnosti vycházíme. Nelze poskytnout žádné prohlášení, záruky nebo závazky s ohledem na správnost a úplnost poskytnutých informací, respektive že použití produktu nepovede ke ztrátě nebo škodám, popřípadě dosažení požadovaných výsledků. Koupící je odpovědný za provedení zkoušky na vhodnost produktu pro zamýšlený účel použití. V případě jakýchkoli změny podmínek nebo materiálu je nutné provést nové zkoušky. Žádný zaměstnanec, zástupce či distributor není oprávněn cokoli na těchto podmínkách měnit nebo poskytovat záruky.

#### UPOZORNĚNÍ PRO UŽIVATELE:

Objednání výrobků z naší společnosti se vztahuje k obchodním podmínkám H.B. Fuller. Pokud jste je neobdrželi, vyžádejte si jejich vystavení. Všeobecné obchodní podmínky obsahují prohlášení o vyloučení implicitních záruk (včetně, ale bez omezení na popření záruk vhodnosti pro určitý účel) a omezení odpovědnosti. Jiné podmínky budou zanedbány. Celková odpovědnost H.B. Fuller za jakýkoli nárok či škodu vzájemně provázaných nároků s ohledem na závazkové právo, náklady nepřevzatých škod (včetně nebalosti), porušení zákonné povinnosti, uvedení v čerň papír, z jiných důvodů je omezena na výměru polkovozných výrobků nebo inkasní kupní ceny dobořených výrobků. H.B. Fuller nese odpovědnost za ašly zrak, ztrátu marží, ztrátu obchodních příležitostí, ztrátu dobrých pověstí nebo jakékoli jiné přímé či následné škody v důsledku nebo v souvislosti s poskytnutím produktů. Žádná z těchto podmínek nemá vliv na vyloučení nebo omezení odpovědnosti H.B. Fuller za podvod, hrubou nebalost, za smrt nebo zranění způsobené nebalostí nebo za porušení závažných předpisů.





|                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>Pokyny k použití</b>    | <b>Upozornění:</b><br>Nádrže, potrubí a aplikační zařízení vyrobené z oceli, galvanizované oceli, hliníku nebo jiných neželezných kovů se nedoporučují kvůli slabě kyselému pH disperze kvůli riziku koroze. Proto doporučujeme skladovací nádrže, potrubí a aplikační zařízení z nerezové oceli nebo plastu (tvrdý PVC, polyethylen, polyesterová pryskyřice). Tento produkt může po dlouhém skladování poněkud zhoustnout. Po důkladném promíchání by měl být znovu použitelný. |
| <b>Pokyny k čištění</b>    | Nanášecí zařízení před vyschnutím lepidla umýt vodou.   |
| <b>Balení</b>              | Ohledně dostupných balení se obraťte, prosím, na naše obchodní zástupce.  |
| <b>Skladovací podmínky</b> | Rakoll® GXL 3 skladovat v uzavřených originálních baleních při teplotě nad +5°C. Rakoll® GXL 3 může při teplotě skladování nad +25°C zhoustnout. Rakoll® GXL 3 může i při dlouhém skladování lehce zhoustnout. Lepidlo je potřeba důkladně rozmíchat, aby bylo opět použitelné.   |
| <b>Pokyny k likvidaci</b>  | Pokyny k likvidaci jsou uvedeny v bezpečnostním listu.  |
| <b>Bezpečnostní pokyny</b> | Bezpečnostní pokyny jsou uvedeny v bezpečnostním listu.   |

Our Focus is Clear. **Perfecting Adhesives.**

**Důležité:** poskytnuté informace, specifikace, postupy a doporučení (dále jen "informace"), jsou založeny na základě našich zkušeností, z jejichž správnosti vycházíme. Nelze poskytnout žádná prohlášení, záruky nebo závazky s ohledem na správnost a úplnost poskytnutých informací, respektive že použití produktu nepovede ke ztrátě nebo škodám, popřípadě dosáhnout požadovaných výsledků. Kupující je odpovědný za provedení zkoušky na vhodnost produktu pro zamýšlený účel použití. V případě jakýchkoli změn podmínek nebo materiálu je nutné provést nové zkoušky. Žádný zaměstnanec, zástupce či distributor není oprávněn cokoli na těchto podmínkách měnit nebo poskytovat záruky.

**MITTEILUNG AN DEN BENUTZER:** Sie erklären sich durch Bestellung/Entgegennahme des Produkts mit den für die Region geltenden **Allgemeinen Geschäftsbedingungen von H.B. Fuller** einverstanden. Sollten Sie sie nicht erhalten haben, bitten Sie Ihre erste Anfertigung an diese Allgemeinen Geschäftsbedingungen anzufügen. **Geschäftsbeschluss** im Hinblick auf stichweisende Zusagen (einschließlich, jedoch nicht beschränkt auf einen Geschäftsbeschluss im Bezug auf die Einlage für einen bestimmten Zweck) sowie Haftungsbeschränkungen. Sonstige Geschäftsbedingungen werden abgelehnt. **Die Gesamthaftung von H.B. Fuller beschränkt sich im Rahmen einer beliebigen Forderung bzw. Reihe miteinander verbundener Forderungen, welche im Hinblick auf schuldrechtliche Ansprüche, Strafschadenersatz (einschließlich Fahrlässigkeit), Verletzung der Rechtspflichten, Intellektuelle, Geldforderungshaltung bzw. aufgrund anderer Ursachen geltend gemacht werden, auf jeden Fall auf die Erstattung der beschädigten Produkte bzw. die Rückerstattung des Einkaufspreises der beschädigten Produkte. H.B. Fuller haftet nicht für Betriebsunterbrechungen, Gewinnausfälle, Vertragsausfälle, Geschäftsausfälle, Veränderungen des Firmenwertes oder sonstige unmittelbare Schäden bzw. Folgeschäden aufgrund bzw. in Verbindung mit der Bereitstellung von Produkten.** Nichts in diesen Bedingungen bewirkt einen Ausschluss bzw. eine Beschränkung der Haftung von H.B. Fuller für Betrug, grobe Fahrlässigkeit, für Tod bzw. Personenschäden durch Fahrlässigkeit oder für eine Verletzung zwingender öffentlich-rechtlicher Bestimmungen.