

Česká zemědělská univerzita v Praze



Diplomová práce

Praha 2022

Bc. Matěj Bečvář

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Analýza vlastností křížem vrstveného dřeva (CLT) vyrobeného z
listnatého dřeva

Diplomová práce

Studijní program:

Dřevařské inženýrství

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Praha 2022

Bc. Matěj Bečvář

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Matěj Bečvář

Dřevařské inženýrství

Název práce

Analýza vlastností křížem vrstveného dřeva (CLT) vyrobeného z listnatého dřeva

Název anglicky

Analysis of the properties of cross-laminated timber (CLT) made from hardwood species

Cíle práce

Cílem práce je návrh vhodné skladby křížem lepeného dřeva (CLT) vyrobeného z listnatého dřeva. Pro jednotlivé typy takto navržených skladeb křížem lepeného dřeva (CLT) je použito více typů lepidel pro konstrukční materiály ze dřeva. Jednotlivé typy skladeb křížem lepeného dřeva (CLT) jsou experimentálně zkoumány pro zjištění fyzikálních a mechanických vlastností. Experimentální zkoumání zahrnuje zjišťování důležitých mechanických vlastností křížem lepeného dřeva (CLT), vyrobeného z listnatého dřeva, které jsou důležité pro všechny konstrukční lepené materiály ze dřeva. Vlastnosti křížem lepeného dřeva (CLT) z listnatého dřeva jsou srovnávány s běžným typem křížem lepeného dřeva (CLT) z jehličnatých dřevin.

Metodika

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

- červenec – září 2021: Zpracování literární rešerše o fyzikálních a mechanických vlastnostech lepeného dřeva s důrazem na křížem vrstvené dřevo (CLT). Literární rešerše dále rozebírá problematiku vlivu konstrukčních lepidel, uspořádání nebo spojení jednotlivých lamel a skladby křížem vrstveného dřeva na jeho vlastnosti.
- říjen – listopad 2021: Příprava materiálu, výroba a značení zkušebních těles křížem vrstveného dřeva (CLT) z konkrétní vybrané listnaté dřeviny. Určení základních fyzikálních vlastností křížem vrstveného dřeva (CLT).
- prosinec 2021 – únor 2022: Experimentální zjišťování fyzikálních a mechanických vlastností křížem vrstveného dřeva (CLT) z listnatého dřeva. Porovnání mechanických vlastností křížem vrstveného dřeva (CLT) vyrobeného z listnatého dřeva s vlastnostmi standardního křížem vrstveného dřeva (CLT) jehličnatého dřeva.
- březen 2022: Zpracování výsledků v textové, tabulkové a grafické podobě. Statistické vyhodnocení výsledků. Diskuze a závěry.
- duben 2022: Odevzdání diplomové práce.

Doporučený rozsah práce

75 – 85 stran

Klíčová slova

CLT, křížem vrstvené dřevo, lepené dřevo, listnaté dřeviny, jehličnaté dřeviny

Doporučené zdroje informací

- AICHER, S., REINHARDT, H.-W., GARRECHT, H. Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology. Springer Science & Business Media, 2013, 819 s. ISBN: 978-94-007-7810-8
- AMBROSSE, J. Building Structures. 2nd ed., John Wiley & Sons, 1993, 701 s. ISBN: 0-471-54060-9
- BODIG, J., JAYNE, B. A. Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company New York, Cincinnati, Toronto, London, Melbourne, 1982, 712 s.
- BRANDNER, R., TOMASI, R., MOOSBRUGGER, T., SERRANO, E., DIETSCH, P. Properties, Testing and Design of Cross Laminated Timber: A State-of-the-art Report by COST Action FP1402/WG 2. Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2018, 481 s. ISBN 978-3-8440-6143-7
- CRAWLEY, N. Cross Laminated Timber: A design stage primer. London: RIBA Publishing, 2021, 192 s. ISBN 978-1-85946-922-4
- KARACABEYLI, E., GAGNON, S. Canadian CLT Handbook. Pointe-Claire: FPInnovations, 2019, 812 s. ISBN 978-0-86488-592-0
- KOLB, J. Dřevostavby: Systém nosných konstrukcí, obvodové pláště. 3. vydání, 2011, 320 s. ISBN 978-80-247-4071-3
- KOŽELOUH, B., KOLB, J. Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-4071-3.
- MAHAMID, M. Cross-Laminated Timber Design: Structural Properties, Standards, and Safety. New York: McGraw Hill Professional, 2020, 368 s. ISBN 978-1-26-011800-1
- ŠTEFKO, J., REINPRECHT, L., KUKLÍK, P., BRAUNŠTEINOVÁ, Z. Dřevěné stavby: konstrukce, ochrana a údržba. Bratislava: Jaga, 2009. ISBN 978-80-8076-080-9.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 3. 9. 2021

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 05. 04. 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Analýza vlastností křížem vrstveného dřeva (CLT) vyrobeného z listnatého dřeva“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Gašparíka, PhD. 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 05. 04. 2022

.....

Matěj Bečvář

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat za odborné rady, vstřícné jednání a ochotné přistupování při konzultacích panu Ing. Miroslavovi Gašparíkovi, PhD. za pomoc při experimentálních zkouškách bych chtěl poděkovat Ing. Tomášovi Kytkovi a Ing. Tomášovi Holečkovi. Nakonec děkuji všem, kteří mi byli při psaní diplomové práce nápomocni a podporovali mě, zejména rodině.

Abstrakt:

Tato diplomová práce řeší analýzu vlastností křížem vrstveného dřeva vyrobeného z březového dřeva. Při experimentálních zkouškách byly použity panely vyrobené z lamel z březového dřeva a na porovnání ze smrkového dřeva. Dále se práce zabývala posouzením lepidel (EPI, PUR), kterými byly jednotlivé lamely panelů spojovány. Na všech zkoušených panelech byly provedeny zkoušky smykové pevnosti a delaminační zkoušky pomocí tlakového impregnačního zařízení. Výsledky smykové pevnosti ukazují, že panely vyrobené z březového dřeva mají vyšší pevnost ve smyku než panely vyrobené ze smrkového dřeva. Průměrně jsou výsledky smykové pevnosti březových panelů o 125 % vyšší než u smrkových panelů. U delaminační zkoušky byly výsledky vyšší u panelů vyrobených ze smrkového dřeva. Polyuretanové lepidlo vykazovalo u všech zkoušek lepší vlastnosti než lepidlo EPI. Výsledky smykové pevnosti naznačují, že panely vyrobené z břízy mají vyšší pevnost ve smyku než smrkové. Průměrně jsou výsledky smykové pevnosti březových panelů o 125 % vyšší než u panelů ze smrku. U delaminační zkoušky byly výsledky vyšší u panelů vyrobených ze smrkového dřeva.

Klíčová slova: CLT, křížem vrstvené dřevo, lepené dřevo, listnaté dřeviny, jehličnaté dřeviny

Abstract:

This master thesis solves the analysis of the properties of cross-laminated timber made of birch timber. For experimental tests were made panels of lamellas of birch timber and of spruce timber for comparison. The work also deals with the assessment of adhesives (EPI, PUR), which were used to connect the individual lamellas of the panels. A shear strength tests and delamination tests with pressure impregnation equipment were performed on all tested panels. The results of shear strength tests show that panels made of birch timber have a higher shear strength than panels made of spruce timber. Average results of the shear strength tests of birch panels are 125 % higher than spruce panels. In the delamination test, the results were higher for panels made of spruce timber. Polyurethane adhesive showed better properties than EPI adhesive in all tests.

Key words: CLT, Cross laminated timber, glued wood, hardwood, softwood

OBSAH

1	Úvod.....	13
2	Teoretický rozbor.....	14
2.1	Dřevo	14
2.2	Vrstvené materiály na bázi dřeva	17
2.3	Lepené vrstvené dřevo (LVL)	18
2.4	Intrallam (LSL).....	19
2.5	Lepené lamelové dřevo (Glulam).....	21
3	Křížem vrstvené dřevo (CLT).....	23
3.1	Definice CLT	23
3.2	Historie CLT.....	23
3.3	Výrobní proces CLT panelů	24
3.4	Vlastnosti materiálu.....	27
3.4.1	Fyzikální vlastnosti	27
3.4.1.1	Vlhkost.....	27
3.4.1.2	Tepelná vodivost.....	29
3.4.1.3	Akustika	30
3.4.2	Mechanické vlastnosti.....	31
3.4.2.1	Pevnost v ohybu.....	31
3.4.2.2	Valivý smyk.....	32
3.4.2.3	Modul pružnosti.....	34
3.5	Využití listnatého dřeva.....	34
3.5.1	Smyk	35
3.5.2	Ohyb.....	36
3.5.3	Delaminace	38
4	Cíle práce	39
5	Metodika	40

5.1	Příprava panelů	42
5.2	Smyk.....	45
5.2.1	Postup zkoušky	46
5.3	Delaminace	47
6	Výsledky a diskuse	51
6.1	Smyková pevnost.....	51
6.2	Delaminace	53
6.3	Cenové zhodnocení.....	60
7	Závěr	61
8	Použitá literatura	62
9	Přílohy.....	68

Seznam obrázků

Obrázek 1. Modul pružnosti v tahu v závislosti na vlhkosti	16
Obrázek 2. Dřevěné částice používané v dřevěných kompozitech	17
Obrázek 3. Ukázka složení CLT panelu	23
Obrázek 4. Systém odlehčení smršťování dřeva	26
Obrázek 5. Držení vody	28
Obrázek 6. Nastavení čtyřbodového testu v ohybu.....	31
Obrázek 7. Výsledky maximální pevnosti v ohybu a vlivu složení panelu	32
Obrázek 8. Typické porušení pro valivý smyk	33
Obrázek 9. Test obrazového rámu	34
Obrázek 10. Vztah mezi hustotou a valivým modulem pružnosti ve smyku.....	36
Obrázek 11. Nastavení třibodového ohybového testu.....	37
Obrázek 12. Fošny na zpracování	42
Obrázek 13. Lisování podélných vrstev	43
Obrázek 14. Tloušťkování vrstev	44
Obrázek 15. Svorka stahující střední vrstvu	44
Obrázek 16. Hydraulický lis SCM Sergiani Leopeda gs 6/90	45
Obrázek 17. Rozměry těles pro smykovou zkoušku	45
Obrázek 18. Rozestavení těles v klimatizační komoře	46
Obrázek 19. Univerzální zkušební stroj UTS 50	46
Obrázek 20. Princip testování smykové pevnosti	47
Obrázek 21. Tělesa na zkoušku delaminace	48
Obrázek 22. Impregnační zařízení	48
Obrázek 23. Klimatizační komora Memmert 30–1060.....	49
Obrázek 24. Digitální posuvné měřítko Mitutoyo	49
Obrázek 25. Závislost smykové pevnosti na druhy dřeviny a lepidle.....	52
Obrázek 26. Závislost smykové pevnosti na druhu dřeviny	52
Obrázek 27. Závislost smykové pevnosti na druhu lepidla.....	53
Obrázek 28. Vliv lepidla a dřeviny na celkovou delaminaci	54
Obrázek 29. Vliv lepidla a dřeviny na maximální delaminaci.....	55
Obrázek 30. Vliv lepidel na celkovou delaminaci	56
Obrázek 31. Vliv lepidel na maximální delaminaci.....	56
Obrázek 32. Vliv lepidel na celkovou delaminaci	57

Obrázek 33. Vliv lepidel na maximální delaminaci.....	57
Obrázek 34. Porušení dřeva	58

Seznam tabulek

Tabulka 1. Hustota dřevin	15
Tabulka 2. Mechanické vlastnosti LVL	18
Tabulka 3. Mechanické vlastnosti LVL	19
Tabulka 4. Mechanické vlastnosti LSL.....	20
Tabulka 5. Mechanické vlastnosti LSL.....	20
Tabulka 6. Mechanické vlastnosti lepeného lamelového dřeva.....	21
Tabulka 7. Mechanické vlastnosti Lepeného lamelového dřeva	22
Tabulka 8. Tepelná vodivost skladby.....	30
Tabulka 9. Průměrná vzduchová neprůzvučnost	31
Tabulka 10. Hodnoty maximální pevnosti v ohybu a vlivu složení panelu	32
Tabulka 11. Průměrná pevnost ve valivém smyku	33
Tabulka 12. Hodnoty modulu pružnosti ve valivém smyku	36
Tabulka 13. Výsledky modulu pružnosti a meze pevnosti	37
Tabulka 14. Vlastnosti lepidla Kestopur 1010.....	41
Tabulka 15. Vlastnosti lepidla Kestokol WR 6040.....	42
Tabulka 16. Statistické vyhodnocení smykové pevnosti	51
Tabulka 17. Statistické vyhodnocení smykové pevnosti	54
Tabulka 18. Průměrné hodnoty smykové pevnosti a delaminace pro smrkové a břízové CLT.....	58
Tabulka 19. Maximální porušení dřeva	59
Tabulka 20. Cenové zhodnocení panelů	60

1 ÚVOD

Již od počátků lidské civilizace je jako tradiční materiál ve stavebnictví využíváno dřevo. Dřevo bylo již v dávných dobách používáno na mnoho funkcí, jako například prvek na výrobu nástrojů, obydlí, zbraní a také jako zdroj tepla. V pravěku se dřevo již využívalo jako základní stavební materiál nosných konstrukcí obydlí.

Dřevo se dnes hojně využívá v moderní architektuře jako doplňkový materiál a často je také využíváno jako hlavní část nosných konstrukcí. Je využito při stavbě rodinných domů, při stavbě budov větších měřítek a v dnešní době také u vícepodlažních objektů. Nejvyšší budovy na bázi dřeva mají výšku až přes deset podlaží.

Informace, které dnes máme o zpracování dřeva, otevírají nové možnosti jeho využití. Kromě tradičních konstrukčních metod, které jsou zde mnoho desítek let, se přichází s novými možnostmi zpracování. Jedním z těchto nových metod je konstrukční systém masivních panelů CLT.

Křížem vrstvené dřevo (CLT), které bylo původně vyvinuto v Evropě v polovině 90. letech devatenáctého století, získává celosvětovou popularitu tím, že napomáhá definovat novou třídu dřevařských výrobků známých jako masivní dřevo. Využití CLT při stavbě budov se ve druhém desetiletí 21. století zajímavě zvýšilo. Byly postaveny stovky budov a dalších staveb po celém světě pomocí CLT a ukazují mnoho výhod, které tento produkt nabízí stavebnímu sektoru.

Tato diplomová práce se zabývá analýzou vlastností křížem vrstveného dřeva vyrobeného z listnatého dřeva, dále problematikou vlivu konstrukčních lepidel, uspořádání nebo spojení jednotlivých lamel a skladby křížem vrstveného dřeva na jeho vlastnosti.

2 TEORETICKÝ ROZBOR

2.1 Dřevo

Přestože poměr nízké objemové hmotnosti a vysoké pevnosti (ve srovnání s jinými stavebními materiály) nabízí dřevu vynikající podmínky pro použití ve stavbách, často se zmiňují tyto nedostatky pro možnost širšího využití:

Hygroskopicita – Jedná se o schopnost dřeva pohlcovat vlhkost, která je u dřeva spojena také se změnami rozměrů.

Anizotropie – Vlastnosti jsou v různých směrech odlišné. Mechanické vlastnosti v podélném směru jsou mnohonásobně vyšší než vlastnosti v příčném směru.

Nehomogenita – Rozmanitost struktury, kvality a vlastností.

Díky tomu, že lesní porosty nevyžadují vysoce kvalitní půdu, je jejich zastoupení na našem území poměrně velké. Lesní porosty dokážou růst i na místech, kde ostatní hospodářské plodiny nemohou. I přes ohromný rozvoj vědy a technologií zůstává dřevo pro průmysl a stavebnictví nejvyhledávanější materiálem.

Odchytky nacházející se ve tvaru, textuře nebo struktuře dřevní suroviny lišící se od stavu, který je pro způsob využití nejpriznivější, se nazývají chybami dřeva. Chyby se nejčastěji projevují změnou vzhledu, změnou v anatomické stavbě dřeva, dále to může být porušení pravidelnosti stavby dřeva a další. Tyto chyby vznikají během samotného růstu, manipulaci, těžbě či skladování. Mezi chyby patří například různé boule, trhliny, nádory, nepravé jádro a další. Chyby a vady jako jsou suky a plísně ovlivňují vlastnosti dřeva, a proto je nutné tyto chyby minimalizovat.

Rocha et al. (2018) pro svojí studii o vlivu vad na mechanické vlastnosti dřeva použili eukalyptové dřevo. Tělesa byla rozdělena do tří tříd podle výskytu suků. První třída obsahovala malé suky do plochy 8,31 mm², druhá středně velké suky od 8,31 do 33,43 mm² a třída třetí velké suky od 33,44 do 105,36 mm². Každá třída byla následně porovnávána s tělesy bez suků. Hodnoty uvedené pro první třídu bez výskytu suků měly průměrný modul pružnosti 7 649 MPa a tělesa se suký 7 144 MPa. Druhá třída bez suků odpovídala modulu pružnosti 7 276,1 MPa a se suký 5 583 MPa. Výsledky poslední třídy měly hodnoty modulu pružnosti 7 276,1 MPa a 5 588 MPa. Z výsledků je patrné, že přítomnost suků velice ovlivňuje modul pružnosti dřeva.

Jak již bylo zmíněno, vady ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva. Toto potvrzují Koman et al. (2013), kteří prezentovali vliv suků na mechanické vlastnosti u topolového a borovicového dřeva. Studie poukazuje stejně jako u Rocha et al. (2018) na jasný vliv suků na pevnost v ohybu.

Významným faktorem u dřeva je jeho hustota. Je vyjadřována v jednotkách kg/m^3 a určuje objemovou hmotnost jednotky dřeva. V tabulce 1 jsou vypsány hustoty některých českých dřevin. Její vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti je prokázáný a zabývá se jí mnoho odborných prací. Je možné říci, že dřevo s větší hustotou je tvrdší, pevnější a také odolnější proti opotřebování (Požgaj et al., 1993).

Tabulka 1. Hustota dřevin
(Požgaj et al., 1993)

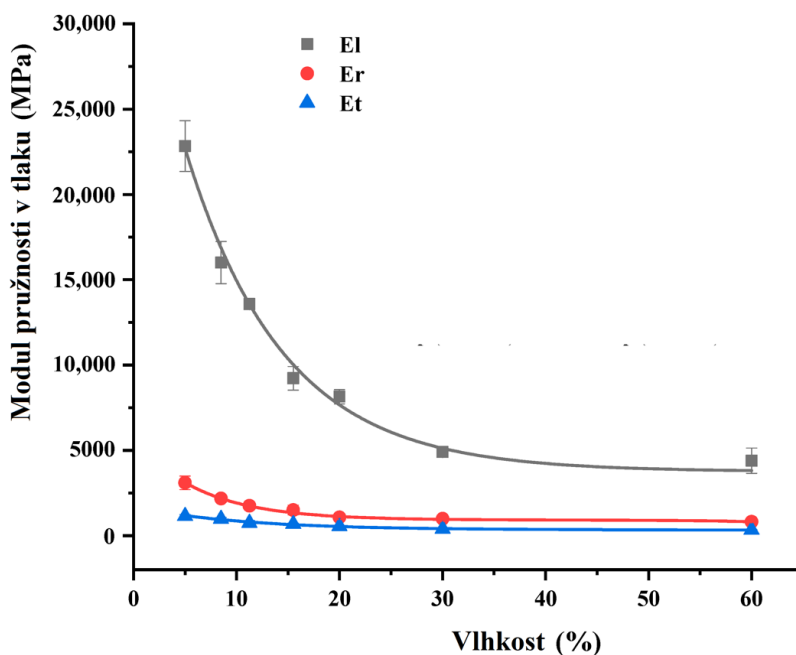
Dřevina	Hustota (kg/ m^3)
Smrk, jedle, topol	350 – 400
Lípa, osika	400 – 450
Borovice	500
Bříza, douglaska, vrba	500 – 600
Javor	630
Dub	640 – 650
Buk	680
Akát, habr	730 – 800

Jedním z těch, kteří zkoumali vliv hustoty na mechanické vlastnosti dřeva, byli Bardeti et al. (2003). Testy prováděli na několika tropických dřevinách s rozlišnou hustotou. Dospěli zde k závěru, že dřeviny s vyšší hustotou vykazovaly lepší mechanické vlastnosti než ty s nižší hustotou.

V úvahu je nutné brát také vlhkost dřeva. To je množství vody, které dřevo obsahuje. Tato veličina je vyjadřována pro absolutní vlhkost poměrem hmotnosti vody k hmotnosti absolutně suchého dřeva. Pokud se hovoří o relativní vlhkosti, pak je to poměr hmotnosti vody a hmotnosti mokrého dřeva. Při charakterizování vlastností dřeva se používá absolutní vlhkost,

naopak je to například u prodeje dřeva. Je známé, že obsah vody ve dřevě snižuje jeho mechanické vlastnosti (Požgaj et al., 1993).

Fu et al. (2021) zkoumali vliv vlhkosti a směru vláken na pevnost v tlaku u bukového dřeva. Bylo potvrzeno, že s narůstající vlhkostí ve dřevě klesala pevnost v tlaku. Důležitým faktorem byl také směr zatížení. V podélném směru dosahovalo dřevo i po vlivu vlhkosti nejvyšší pevnosti v tlaku, nejnižší pevnost byla ve směru tangenciálním (Obr. 1).



Obrázek 1. Modul pružnosti v tahu v závislosti na vlhkosti

(Fu et al., 2021)

Rozhodující pro vývoj materiálů na bázi dřeva byla snaha vyrábět produkty, které využívají kladných vlastností dřeva (izolační vlastnosti, snadná zpracovatelnost, šetrnost k životnímu prostředí, nízká energetická náročnost) a zároveň překonávají jeho nevýhody. Dřevo je vláknitý materiál, avšak sesychání/ bobtnání probíhá pouze ve směru kolmo na vlákna. Díky této skutečnosti je možné rozměrové změny minimalizovat vhodným konstrukční řešením, jako je například křížové lepení (lepení jednotlivých vrstev na sebe tak, aby směry vláken jednotlivých vrstev byly na sebe kolmé).

Další výhodou materiálů na bázi dřeva je potlačování nehomogenity, čímž je rozšiřována rozmanitost jednotlivých konstrukčních řešení. I přesto, že stejně jako u dřeva, ze kterého jsou tyto materiály vyráběny, jsou materiály na bázi dřeva anizotropní, je zde možnost regulace například změnou orientace anebo různou velikostí dřevních částic. Tato možnost

dává těmto materiálům velkou výhodu oproti samotnému dřevu. Díky těmto úpravám je možné uzpůsobit vlastnosti pro požadovanou aplikaci.

2.2 Vrstvené materiály na bázi dřeva

Vlastnosti dřeva se liší mezi druhy, mezi stromy stejného druhu, ale také mezi kusy ze stejného stromu. Dřevo, které má různé vady, lze efektivně využít při výrobě materiálů na bázi dřeva. Aby se posílilo udržitelné těžební úsilí, používá se na výrobu těchto kompozitů například dřevo z lesních zbytků, dřevo ze stromů o malém průměru, anebo invazivní a exotické druhy.

Kompozitní materiály mohou být vyrobeny z různých prvků jako jsou dýhy, vlákna nebo lamináty. Vlastnosti lze měnit kombinací, přeskupením nebo rozčleněním těchto prvků. Pokud jsou tyto materiály správně vybrány a spárovány, mohou být vlastnosti takto vyrobených materiálů lepší než masivního dřeva (Stark a Cai, 2021).

Běžné elementy používané v kompozitech na bázi dřeva jsou hobliny, piliny, vlákna, velké částice, třísky. Tyto prvky mohou být vyráběny v různých velikostech a různých geometrických tvarech (Obr. 2) (Stark a Cai, 2021).

CLT panely lze vyrobit z řeziva, ale některé nové typy jsou zkoumány například ze strukturálního kompozitního dřeva (SCL), anebo kombinací obou materiálů. Nosné konstrukční dřevo zahrnuje laminované dýhované dřevo (LVL), Intrallam (LSL) a Parallam (PSL) (Grandmont et al., 2019).



Obrázek 2. Dřevěné částice používané v dřevěných kompozitech

(Stark a Cai, 2021)

2.3 Lepené vrstvené dřevo (LVL)

Jedná se o dřevěný materiál vyrobený z dýh, které jsou rotačně loupány, sušeny a následně laminovány s paralelně orientovanými vlákny za přítomnosti tepla a tlaku pomocí voděodolného lepidla. Díky této metodě je docíleno zvýšení pevnosti z kulatiny menších průměrů pomocí rozptylu vad z dýhy na dýhu. Velké vady jako jsou suky a další charakteristiky snižující pevnost jsou buď eliminovány, nebo jsou rozptýleny.

Jelikož je pevnost materiálu vysoká a dostupnost v podstatě v neomezené délce a velikosti, je LVL využíváno v řadě produktů, jako například podlahové nosníky, garážová vrata, záhlaví oken a dveří, krokve a prkna lešení.

Další výhodou je, že proces dýhování a lepení umožňuje výrobu velkých trámů i z kmenů s poměrně malým průměrem, což zajišťuje efektivní využití lesních zdrojů. Stejně jako jiné dřevěné materiály je LVL ovlivňováno mnoha faktory, jako například tloušťka dýhy, kvalita dýhy, velikost dílce, proměnné zpracování, provozní prostředí a typy zatížení (Colak et al., 2004).

Jedním z hlavních výrobců LVL je firma Steico. Firma uvádí mechanické vlastnosti pro tento materiál, které jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2. Mechanické vlastnosti LVL
(Steico, 2017)

Mechanické vlastnosti	LVL
Pevnost v ohybu rovnoběžně s vlákny (MPa)	44
Pevnost v ohybu kolmo na vlákna (MPa)	10
Tah – paralelně s vlákny (MPa)	36
Tah – Kolmo na vlákna (MPa)	0,9
Tlak – Rovnoběžně s vlákny (MPa)	40
Tlak – kolmo na vlákna (MPa)	7,5

Některé fyzikální a mechanické vlastnosti LVL vyrobených z rychle rostoucích dřevin ve studii zkoumali Tenorio et. al (2011). Průměrná vlhkost materiálu byla okolo 12 %, hustota

pak 523 kg/m^3 , dále absorpce vody se pohybovala okolo 15 %. Podle typu zpracování vycházela pevnost ve smyku mezi 3,06 – 3,97 MPa.

Tenorio et al. (2011) dospěli k závěru, že většina vlastností LVL je obdobná masivnímu dřevu, s výjimkou maximálního napětí v tahu a tlaku paralelně s vlákny (Tab. 3).

Tabulka 3. Mechanické vlastnosti LVL

(Tenorio et al., 2011)

Mechanické vlastnosti	LVL
Tah – paralelně s vlákny MOE (MPa) / Maximální napětí (MPa)	41,37 / 37,40
Tah – Kolmo na vlákna Maximální napětí (MPa)	0,76
Tlak – Paralelně s vlákny MOE (MPa) / Maximální napětí (MPa)	20,66 / 10,13
Ohyb – Kolmo na vlákna; paralelně s vlákny MOE (GPa) / MOR (MPa)	2,21 / 12,28; 12,86 / 61,39

2.4 Intrallam (LSL)

Je materiál z dřevěných plochých třísek, které jsou lepeny a stlačeny tak, aby vytvořily panel o tloušťce až 90 mm. Využití je zejména jako alternativa masivního řeziva, díky možnosti vytvoření větších rozměrů, což bývá u masivního dřeva složitější, a také lepší rozměrové stabilitě. Používá se například u nosníků a sloupů.

Vlastnosti intrallamu jsou ovlivňovány zejména hustotou, druhem a orientací třísek. Hustota a druh souvisí s tuhostí a pevností. Poslední položkou ovlivňující vlastnosti intrallamu je orientace třísek. Ta může být do určité míry kontrolována při výrobě a ovlivňuje ohybovou pevnost pro specifické aplikace zatížení (Moses et al. 2003).

Obecně je intrallam vyráběn z delších štěpek než OSB a orientace má významný vliv na pevnostní vlastnosti materiálu. Mnoho výzkumných prací ukázalo, že zvětšení délky jednotlivých štěpek vedlo ke zvýšení pevnosti u těchto materiálů (Chirasatitsin et al. 2005).

Weyerhaeuser je firma vyrábějící intrallam a uvádí pro své výrobky hodnoty modulu pružnosti v ohybu 7,6 GPa a mez pevnosti 35,8 MPa.

Moses et al. (2003) testovali mechanické vlastnosti intrallamu vyrobeného z osikového dřeva a vlhkost měla průměrně 9 %. Vlastnosti byly testovány ve dvou směrech, a to kolmo na vlákna a paralelně s vlákny (Tab. 4).

Ve studii Chirasatitsin et al. (2005) zkoumali mechanické vlastnosti intrallamu při různých délkách štěpky (50 mm, 100 mm, 150 mm), kde je vidět, že délka štěpky měla významný vliv na tyto vlastnosti (Tab. 5).

Tabulka 4. Mechanické vlastnosti LSL

(Moses et al.,2003)

Mechanické vlastnosti	LSL
Tah – paralelně s vlákny (MPa)	56,2
Tah – Kolmo na vlákna (MPa)	5,2
Tlak – Paralelně s vlákny (MPa)	36,9
Smyk (MPa)	11,3

Tabulka 5. Mechanické vlastnosti LSL

(Chirasatitsin et al., 2005)

Způsob namáhání	LSL		
	50 mm	100 mm	150 mm
Tah – Paralelně s vlákny Maximální napětí (MPa)/ MOE (MPa)	49,58 / 2073	55,98 / 2116	76,82/ 2340
Tah – Kolmo na vlákna Maximální napětí (MPa)/ MOE (MPa)	2,65 / 385,8	1,58 / 270,8	1,50 / 352,2
Tlak – Paralelně s vlákny Maximální napětí (MPa)/ MOE (MPa)	49,65 / 5692	52,74 / 6036	58,36 / 6193
Tlak – Kolmo na vlákna Maximální napětí (MPa)/ MOE (MPa)	13,5 / 324,6	13,03 / 315,1	15,78 / 340,3
Ohyb – Paralelně s vlákny Maximální napětí (MPa)/ MOE (GPa)	85,59 / 7,92	90,88 / 8,78	99,23 / 9,42

2.5 Lepené lamelové dřevo (Glulam)

Lepené lamelové dřevo známe také pod německou zkratkou BSH (Brettschichtholz). Používá se u velkých konstrukcí s různými geometrickými tvary. Lepené lamelové dřevo má vhodnou rozměrovou stabilitu omezenou pouze výrobními parametry a dopravou.

Vyrábí se z masivních lamel, které jsou na sebe vzájemně lepeny v jednotlivých vrstvách. Na délky jsou nastavovány pomocí zubovitého spoje a mohou k sobě být bočně lepeny. Mohou být vyráběny ze dřeva malých průměrů, tudíž není třeba používat staré stromy z důvodu zajištění vysoké pevnosti a velikosti (Yang et al., 2008).

Výroba lamelových nosníků se skládá z řady známých kroků jako jsou: skladování řezaných kusů, vlastní příprava, vkládání lepidla mezi jednotlivé kusy, lisování, definování intenzity času a tlaku a konečné upravování trámu (Lahr et al., 2015).

Lepené lamelové dřevo se dělí do pevnostních tříd GL 24, GL 28, GL 32, GL 36, kde GL 24 je nejnižší a GL 36 nejvyšší a udávají pevnost materiálu v ohybu. Firma Dekwood, vyrábějící tyto materiály, uvádí mechanické vlastnosti pro pevnostní třídy (Tab. 6).

Lepené lamelové dřevo je využíváno zejména u staticky namáhaných dřevěných konstrukcí, jako jsou například střešní vazníky, nosníky, sloupy a další.

Tabulka 6. Mechanické vlastnosti lepeného lamelového dřeva
(Dekwood, 2013)

	GL 24 (MPa)	GL 28 (MPa)	GL 32 (MPa)
pevnost v ohybu	24,00	28,00	32,00
pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny	16,50	16,50	19,50
pevnost v tahu kolmo k vláknům	0,40	0,40	0,45
pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny	24,00	24,00	26,50
pevnost v tlaku kolmo k vláknům	2,70	2,70	3,00
pevnost ve smyku	2,70	2,70	3,20

Mechanické vlastnosti (ohyb, tlak paralelně s vlákny a kolmo na vlákna, tah paralelně a kolmo na vlákna, modul pružnosti paralelně a kolmo na vlákna) dle pevnostních tříd zkoušeli Lahr et al. (2015) a došli k závěru, že vyskytlé vady na lamelách, ovlivňují tyto vlastnosti. Tělesa, na kterých byly vady minimální, vykazovaly vyšší pevnost. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7. Při porovnání výsledků s hodnotami, které uvádí výrobce Dekwood, byly výsledky nepatrně lepší.

Tabulka 7. Mechanické vlastnosti Lepeného lamelového dřeva
(Lahr et al., 2015)

Způsob namáhání	GL 24	GL 28	GL 32	GL 36
Ohyb (MPa)	24	28	32	36
Tah:				
Paralelně s vlákny (MPa)	16,5	19,5	22,5	26
Kolmo na vlákna (MPa)	0,4	0,45	0,5	0,6
Tlak:				
Paralelně s vlákny (MPa)	24	26,5	29	31
Kolmo na vlákna (MPa)	2,7	3,0	3,3	3,6
Modul pružnosti:				
Paralelně s vlákny (GPa)	9 400	10 200	11 100	11 900
Kolmo na vlákna (GPa)	390	420	460	490

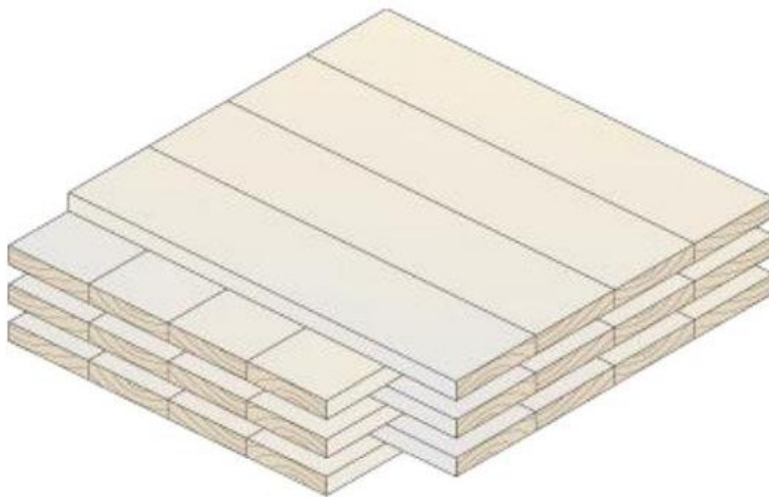
3 KŘÍŽEM VRSTVENÉ DŘEVO (CLT)

3.1 Definice CLT

Konstrukční systém CLT se řadí do masivních dřevostaveb. Takto jsou označovány budovy, které mají stěny v plné ploše tvořeny dřevěným materiálem. Nejznámějšími zástupci jsou například tradiční roubené stavby nebo sruby.

Zkratka CLT vychází z anglického cross-laminated timber. CLT panely jsou tvořeny alespoň ze 3 vrstev, které jsou na sebe kolmé, běžně jsou ze 3 až 7 vrstev (Obr.3). Každá vrstva je dále tvořena z masivních lamel. Jednotlivé vrstvy jsou lisovány a lepí se za studena. Splením vzniká křížem vrstvený panel, který je možné použít podle požadavků na nosné konstrukce stěn, stropu a také střechy. Díky tomu, že jsou na sebe lamely z jednotlivých vrstev kolmé, je zajištěna vysoká tvarová stálost. Tloušťka panelů je z pravidla od 60 do 240 mm (Pavlas, 2016).

Vnější vrstvy u panelů, které jsou využity jako stěny, jsou orientovány rovnoběžně s gravitačním zatížením. Stejně tak u podlahových a stropních systému jsou tyto vrstvy rovnoběžné se směrem hlavního rozpětí (Karacabeyli a Gagnon, 2019).



Obrázek 3. Ukázka složení CLT panelu

(Popovski et al., 2019)

3.2 Historie CLT

Křížem vrstvené dřevo je relativně novým stavebním systémem, o který je ve stavebnictví zájem. Jde o technické řešení na bázi dřeva. To je možným nahrazením pro aplikace, kde jsou v současnosti využívány zděné, ocelové nebo betonové systémy. CLT je

poměrně novým výrobkem, který byl představen v počátcích 90. let 20. století. V Evropě vzrůstá jeho popularita jak v bytových, tak v nebytových prostorách (Karacabeyli a Gagnon, 2019).

Z počátku byl nástup této technologie pomalý, avšak po roce 2000 došlo ke znatelnému zvýšení uplatnění vrstvených panelů. Z Rakouska se technologie rychle rozšířila dál a dnes již existuje mnoho významných výrobců CLT.

CLT panely jsou od začátku zaměřeny na výrobu rodinných domů, ale postupem času byla zjištěna vhodnost použití této technologie také pro stavby, které mají větší rozměry. Příkladem je devítipodlažní budova v Londýně dokončená v roce 2008 s názvem Murray Grove Tower, jedná se o první využití této technologie u vícepodlažních budov (Pavlas, 2016).

3.3 Výrobní proces CLT panelů

Jak již bylo zmíněno, CLT panely jsou tvořeny z minimálně 3 vrstev, které jsou na sebe kolmé. Díky ortogonálnímu uspořádání lamel jednotlivých vrstev je zajištěna rozměrová stabilita, a také dochází k vytvoření schopnosti obousměrného působení.

Výrobní proces se skládá z následujících 9 procesů:

- 1) Výběr řeziva
- 2) Seskupení řeziva
- 3) Broušení
- 4) Řezání na požadovanou délku
- 5) Nanášení lepidla
- 6) Uložení CLT panelu
- 7) Lisování
- 8) Kontrola kvality, obrábění, řezání
- 9) Označení výrobku, balení, doprava (Yeh et. al, 2013)

Výběr řeziva

Ve většině případů vyžadují lepidla, aby byl lepený povrch čistý a drsnější. To znamená, že u běžně dodávaného řeziva S4S (hoblované ze 4 stran), je nutné povrch před lepením obrousit. Při úpravě povrchu může dojít ke změně jakosti dřeva, proto u takto upravovaných povrchů je nutné přidat ještě stupeň ověření jakosti. Při použití hrubě hoblovaného řeziva (pouze z jedné strany) je nutné přidat zase stupeň estetické kontroly.

Řezivo používané na výrobu CLT panelu by mělo mít vlhkost okolo 12 %, ale je brána tolerance ± 3 %. Požadovaná hodnota spadá přímo do středu rozsahu vlhkosti, ve které dřevo bobtná, anebo naopak sesychá, čímž je minimalizováno vnitřní napětí způsobené právě těmito procesy. Dále je doporučeno, aby sousedící kusy neměly rozdíl ve své vlhkosti větší než 5 %.

Teplota dřeva také ovlivňuje kvalitu spojů a měla by být striktně dodržována taková, jakou uvádí výrobce lepidla. I okolní teplota ve výrobním zařízení má vliv na některé parametry, jako je například vytvrzování lepidla, a proto je doporučena alespoň 15 °C. Teplota dřeva, vlhkost tak i okolní teplota můžou být během výroby panelů měřeny. Díky tomu je možné určit případný vliv teploty a vlhkosti na kvalitu spojů a panelů.

Další důležitou kontrolou je kontrola kůry, množství dřeva v rozích nebo různé deformace řeziva, které by mohly zmenšovat oblast lepení. Toto třídění je z důvodu získání takzvané efektivní spojovací line, což znamená, že oblast lepení je alespoň 80 %.

Seskupení řeziva

Při seskupování řeziva jsou základními hledisky vlhkost a vizuální charakteristika. Obecně platí, že vrstvy ve stejných směrech mají mít identické technické vlastnosti. Pro zajištění estetické kvality bývá povrch na krajních vrstvách s lepším vzhledem. V určitých případech se používá řezivo vyšší kvality v místech, kde budou spojovací prvky pro zlepšení efektivity upevnění.

Broušení

Aby byla zvýšena účinnost lepení, je důležitá povrchová úprava, která se dělá pomocí broušení. Při odstranění velmi tenké povrchové vrstvy dochází k lepší adhezi. Z důvodu zajištění jednotných rozměrů je ve většině případů řezivo broušeno ze všech stran, avšak v některých případech stačí pouze lepené povrchy. Je doporučováno odebrat 2,5 mm z tloušťky a 3,8 mm z šířky (Karacabeyli a Gagnon, 2019).

Po broušení může dojít, díky rozdílům v účinnosti sušení a vlastnostem dřeva u některých kusů, ke zvýšení vlhkosti. Pokud se tak stane, je nutné tyto kusy opravit. Když je broušení v pořádku hotové, přichází řezání na požadovanou délku.

Nanášení lepidla

V současné době se používají zejména lepidla melamin-močovino-formaldehydová (MUF), jednosložková polyuretanová lepidla (PUR) nebo emulzní polymerní izokyanátová

lepidla (EPI). Polyuretany jsou všeobecně měkčí než lepidla, která jsou na bázi MUF. Z důvodu, že mají tyto lepidla různé vlastnosti, musí být určena použitelnost lepidla u výroby CLT.

Aplikace lepidla pro lepení bočních ploch se dělá dvěma způsoby. První způsob je za pomoci mechanické kontinuální podávací linky a druhý je nanášení lepidla přímo v polohovacím nebo lisovacím loži. Více využívaným způsobem je první způsob. Lepidlo je na lamely i na jednotlivé vrstvy nanášeno lineárně (Brandner et al.,2016).

Uložení CLT panelu

Uložení CLT panelu je vcelku podobné jako u výroby překližky, ale jednotlivé vrstvy jsou na sebe pokládány kolmo a každá vrstva je z více kusů řeziva. Dobrou montáží se rozumí časový interval mezi nanášením lepidla na jednotlivé vrstvy a použitím cílového tlaku. Doba montáže musí být taková, aby nepřekročila maximální dobu určenou výrobcem lepidla. Pokud nejsou okolní podmínky vhodné, měla by být doba montáže přísnější.

Lisování

Když jsou panely uloženy, nastává lisování. Jelikož mezi jednotlivými lamelami a jednotlivými vrstvami nesmí být mnoho mezer, je krok lisování velice důležitý. Bez lisů je tento krok zcela nemožný. Pro výrobu CLT panelů se využívá hydraulické a vakuové lisování.

Vakuové lisování nevytváří tak velký tlak, aby byly jednotlivé mezery dokonale odstraněny, proto se při tomto procesu napomáhá systémem odlehčení smršťování dřeva (Obr. 4). Po využití tohoto pomocného procesu je nutné zkontrolovat vlastnosti panelu. Naopak hydraulické lisování vytváří dostatečný tlak a nejsou potřeba pomocné procesy (Karacabeyli a Gagnon, 2019).



Obrázek 4. Systém odlehčení smršťování dřeva
(Karacabeyli a Gagnon, 2019)

Teplota při lisování by měla být více než 15 °C, je to z toho důvodu, že při nízkých teplotách vytvrde lepidlo pomaleji. Doba lisování se pohybuje od 10 minut do několika hodin (Sobur, 2017).

Kontrola kvality, obrábění, řezání

Nejdříve je panel broušen na požadovanou tloušťku s tolerancí 0,1 mm – v závislosti na umístění panelu mohou být tolerance menší nebo větší. Po broušení jsou panely dopraveny do obráběcího centra, kde jsou pomocí CNC vyřezávány otvory pro okna, dveře a další požadované součásti. Pomocí CNC lze také dosáhnout požadované tloušťky. Po dokončení jsou drobné nedostatky upravovány ručně (Karacabeyli a Gagnon, 2019).

Označení výrobku, balení, doprava

Označení výrobku je důležité z důvodu specifikace, dodání a nainstalování správného produktu. Také je důležitým aspektem pro projektanty, dodavatele a odběratele kvůli informacím.

Označení by mělo následující prvky: informace, na co má být CLT panel použit; tloušťku a identifikaci; název firmy, kde byl panel vyroben; normu podle, které byl panel vyroben; odolnost lepidla; směr, ve kterém by měl být panel zatížen.

3.4 Vlastnosti materiálu

3.4.1 Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti jsou takové vlastnosti, které jsme schopni zjišťovat bez narušení materiálu, a také beze změn v jeho chemickém složení. U dřeva jsou vlastnosti díky tomu, že je anizotropní materiál v různých směrech odlišné.

3.4.1.1 Vlhkost

Jak již bylo zmiňováno, lamely používané na výrobu CLT panelů by měly mít vlhkost 12 %. Mnozí vědci zkoumají maximální přípustnou vlhkost při výrobě a vliv vlhkosti na vlastnosti zhotovených panelů. V dalších studiích byla také zkoumána vlhkost panelů a vliv použití v různých ročních obdobích – tudíž vliv teploty na konstrukci z panelů.

Okolní vlhkost a teplota mají také významný vliv na vlhkost dřeva, i když je dřevo použito vysušené, okolní vlhkost ho může ovlivňovat. To může přispět k růstu hub, které způsobují degradaci chemické struktury a zvýšení obsahu vlhkosti ve dřevě (Baker, 1969).

Například Olsson (2020) ve studii zkoumá vliv srážek na CLT panely během konstrukce. Ve studii doporučuje ochranu CLT panelů proti povětrnostním vlivům během konstrukce z důvodu zhoršení vlastností u vzorků a také rizika vzniku plísní. Údaje, jako je relativní vlhkost teplota a srážky, byly zaznamenávány z meteorologických stanic asi 10 km od budov.

Na vnitřní podmínky se dohlíželo pomocí kontinuálního měření relativní vlhkosti v místnostech. Bylo prováděno okamžité měření vlhkosti na horizontální i vertikálních plochách a také v místech, kde se voda odráží nebo se předpokládá, že se bude držet (Obr. 5). Dále byly vybrány referenční body, které byly vystaveny zanedbatelnému množství vlhkosti nebo body, které nebyly vystaveny srážkám.

Po měření vlhkosti na celkem 300 měřících místech při hloubce měření 0 mm byla zaznamenána vlhkost 19 % nebo vyšší. Studie dále ukázala, že na 77 % měřících bodech byl zaznamenán mikrobiální růst. Nejvyšší procento bylo na horní části podlahové konstrukce.

Na základě této studie se zdá velice obtížné až nemožné během stavby z CLT panelů bez ochrany proti povětrnostním vlivům zabránit vzniku mikrobiálního růstu.



Obrázek 5. Držení vody
(Olsson, 2020)

Touto problematikou se zabývali také Evan Schmidt a Mariapaola Riggio (2019), kteří dělali test na třípatrové budově v USA. Test byl prováděn po dobu šesti měsíců, a to od prosince

do května. Měření bylo opět prováděno na několika místech, ve spojích, podlaze a horní a spodní části stropu. Ve studii došli k závěru, že prostředí a doba podléhání má vliv na vlhkost panelů. V místech, kde se zadržovala voda, byla změna vlhkosti nejvyšší, naopak v částečně chráněných místech nebyla tak velká. Zmíněná studie má napomoci k lepší strategii prevence a ošetření panelů.

3.4.1.2 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost (λ) je definována jako míra rychlosti toku tepla materiálem, který je vystaven jednotkovému teplotnímu rozdílu v jednotkové tloušťce. Tepelná vodivost se udává v jednotkách watt na metr a kelvin ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). U běžných konstrukčních dřev je mnohem menší než například u oceli, která je často ve stavebnictví spojována se dřevy. Vodivost u konstrukčního řeziva z měkkého dřeva při vlhkosti 12 % se pohybuje v rozmezí od 0,10 až 0,14 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, u hliníku 216 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, u oceli 45 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a u betonu 0,9 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Tepelný odpor se rozumí jako převrácená hodnota tepelné vodivosti.

Tepelná vodivost dřeva je ovlivňována řadou základních faktorů: hustota, obsah vlhkosti, směr vláken, teplota, anebo nepravidelnosti (suky). Se zvyšující se hustotou, obsahem vlhkosti a teplotou roste také tepelná vodivost. V radiálním a tangenciálním směru je téměř stejná, avšak ve směru rovnoběžném s vlákny je tepelná vodivost vyšší, a to v průměru 1,8 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (Glass a Zelinka, 2021).

Ve všech klimatizačních zónách je nejlepší umístit tepelnou izolaci CLT sestavy z vnější strany CLT panelu. Je to z toho důvodu, že dřevo zůstane teplejší než okolní prostředí. Tím je zajištěna snížená možnost smáčení a lepší sušení. Pokud je celá nebo část izolace umístěna z vnitřní části, doporučuje se vyhodnotit danou sestavu pro projekt z pohledu dlouhodobé odolnosti vůči vlhkosti (Finch a Wang, 2019).

Tepelná vodivost CLT byla zkoumána v několika studiích, například Švajlenka et al. (2020) zkoušeli tepelnou vodivost CLT panelu na vzorku, který byl zkonstruován tak, aby odpovídal reálné stavbě v praxi. Jednalo se tedy o kombinaci běžně používaného zateplovacího systému na bázi polystyrenu EPS a CLT panelu. Tabulka 8 ukazuje tepelnou vodivost jednotlivých prvků skladby.

Průměrné hodnoty koeficientu prostupu tepla byly při experimentálním měření v laboratorních podmínkách 0,148 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, kdy minimální hodnota byla 0,136 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a

nejvyšší $0,157 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Podle normovaných hodnot dle ČSN 73 0540-2:2011: Tepelná ochrana budov, spadají tyto výsledky do pasivních budov.

Tabulka 8. Tepelná vodivost skladby
(Švajlenka et al. 2020)

Název prvku	Tepelná vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
CLT	0,11
PUR lepidlo na tepelně izolační desky	0,035
Tepelná izolace – EPS	0,038
Stavební lepidlo	0,45
Omítka	0,5

3.4.1.3 Akustika

V současnosti roste v celé Evropě potřeba udržitelných budov, díky tomu jejich výstavba roste. Stále více jsou žádané dřevěné výškové budovy, u kterých je hojně využíváno CLT panelů. V poslední době je větší zaměření také na zvukovou izolaci, kročejový hluk a také na akustický komfort (Bettarello et al.2021).

Při srovnání s jinými masivními a spojitými těžkými prvky, jako například s betonem, mají CLT panely nízkou hustotu v kombinaci s poměrně vysokou tuhostí. Díky těmto vlastnostem je objasnění akustického chování CLT panelů složité, protože přechod z volného do difúzního zvukového pole může být zařazen do typického rozsahu metod klasifikace zvukotěsných vlastností. Akustické modelování stěn při nízkých frekvencích je běžně prováděno pomocí statické energetické analýzy, u které se předpokládá rozptýlení vibračního pole po panelu. Když je vibrační pole rozptýleno, odrazy mají náhodnou fázi ve kterýchkoliv bodech a existuje stejná šance, že zvukové vlny budou přicházet z jakéhokoliv směru (Di Bella a Mitrovic, 2020).

Podle Schoenwald et al. (2013), kteří zkoumali 3vrstvé stěny a 5vrstvé podlahy, je ztráta přenosu zvuku (vzduchová neprůzvučnost) u 5vrstvých podlah vyšší než u 3vrstvých stěn, a to z důvodu větší hmotnosti. Dále byl pozorován znatelný pokles u 5vrstvé podlahy při 3150 Hz, kvůli tloušťkovým rezonancím. Průměrná ztráta přenosu byla tedy u 3vrstvých stěn okolo 33 dB a u 5vrstvých okolo 41 dB. K podobným výsledkům došli ve své studii také Di Bella a Mitrovic (2020), kde byly zkoušeny panely 3vrstvé, 5vrstvé a 7vrstvé (Tab. 9).

Tabulka 9. Průměrná vzduchová neprůzvučnost
(Di Bella a Mitrovic, 2020)

Materiál	Rozsah tloušťky (mm)	Průměrná vzduchová neprůzvučnost (dB)
CLT – 3vrstvý	80 – 90	32
CLT – 5vrstvý	100 – 175	40
CLT – 7vrstvý	200 – 245	45

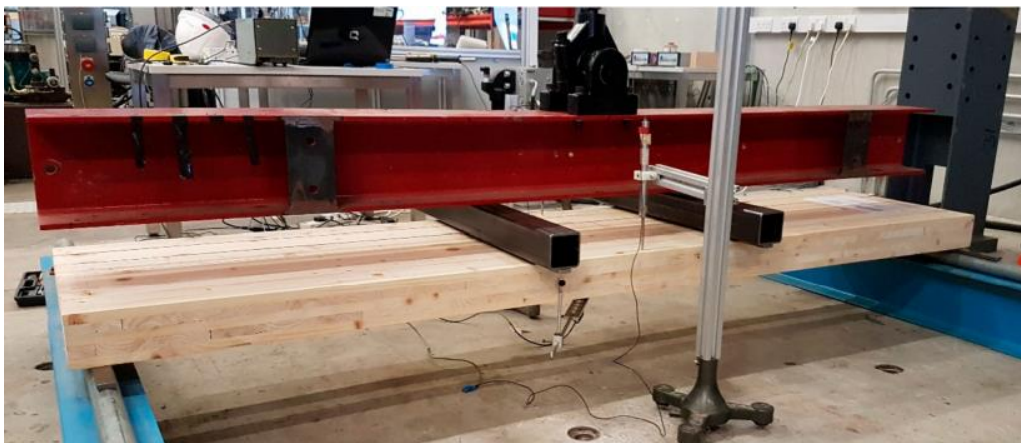
3.4.2 Mechanické vlastnosti

3.4.2.1 Pevnost v ohybu

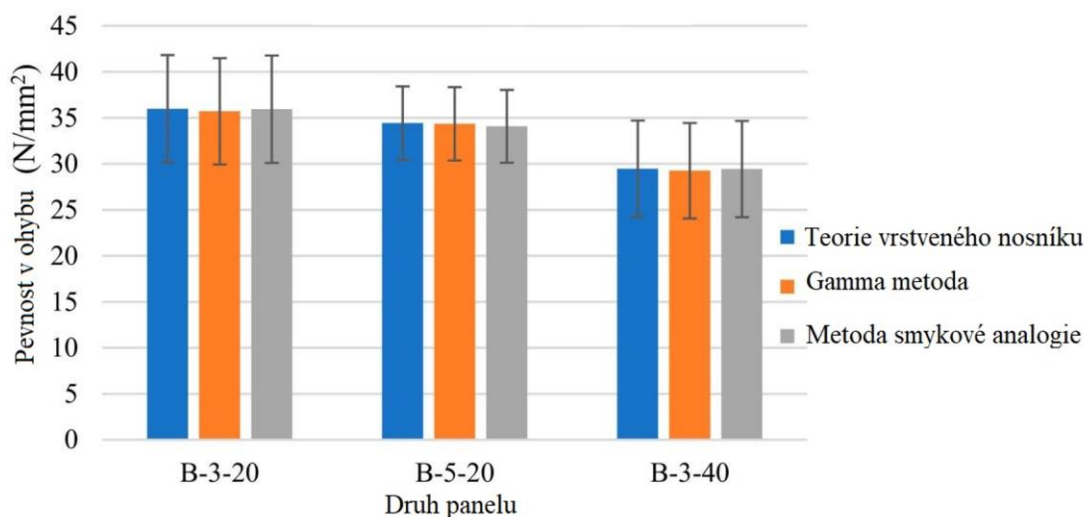
Pevností v ohybu u CLT panelů se zabývalo několik autorů. Jedněmi z nich byli například O’Ceallaigh et al. (2018). Ve své práci popisují zkoušku ohybu pomocí čtyřbodového zatížení, kde byla nastavena rychlost posuvu tak, aby bylo maximálního zatížení dosaženo okolo 300 ± 120 s. Nastavení čtyřbodového testu v ohybu je znázorněno na obrázku 6.

Zkoušení probíhalo u 3vrstvých a 5vrstvých panelů vyrobených ze smrku. Byly vyrobeny 3 druhy panelů: 3vrstvý panel o tloušťce lamel 20 mm, 3vrstvý panel o tloušťce lamel 40 mm a 5vrstvý panel o tloušťce lamel 20 mm. Od každého bylo vyrobeno a odzkoušeno 8 těles, tedy celkem 24 těles.

Výsledky ukazovaly, že s narůstající tloušťkou panelu klesala pevnost v ohybu (Obr. 7). Nejvyšší hodnota byla naměřena u 3vrstvého panelu s tloušťkou lamel 20 mm a to okolo 36 MPa a u panelů 3vrstvých s tloušťkou lamel 40 mm nejnižší 29 MPa.



Obrázek 6. Nastavení čtyřbodového testu v ohybu
(O’Ceallaigh et al., 2018)



Obrázek 7. Výsledky maximální pevnosti v ohybu a vlivu složení panelu (O’Ceallaigh et al., 2018)

Pevností v ohybu se také zabývali Sikora et al. (2016). Vytvořili ze smrku 4 druhy CLT panelů (3vrstvý s tloušťkou lamel 20 mm, 3vrstvý s tloušťkou lamel 24 mm, 3vrstvý s tloušťkou lamel 40 mm, 5vrstvý s tloušťkou lamel 20 mm), ze kterých byla od každého druhu testována 3 tělesa. Výsledky pevnosti v ohybu byly podobné jako u O’Ceallaigh et al., (2018). Tabulka 10 zobrazuje hodnoty naměřené u jednotlivých druhů panelů.

Tabulka 10. Hodnoty maximální pevnosti v ohybu a vlivu složení panelu (Sikora et al., 2016)

Druh CLT	Průměrná pevnost v ohybu (MPa)		
	Teorie vrstveného nosníku	Gamma metoda	Metoda smykové analogie
B-3-20	37,67	36,84	37,71
B-3-24	35,51	34,11	35,55
B-3-40	25,11	24,56	25,14
B-5-20	33,91	33,79	33,62

3.4.2.2 Valivý smyk

Pro CLT panely je typický tak zvaný „valivý smyk“, který je definovaný jako smykové napětí v radiálně-tangenciální rovině kolmé ke směru vláken. Eurokód 5 uvádí pro pevnost valivého smyku u dřeva jen 1,0 MPa, z tohoto důvodu by se mělo při návrhu zabránit vysokému namáhání ve valivém smyku. Pevnost ve valivém smyku není hlavní konstrukční vlastností

dřeva, avšak kvůli složení CLT panelu je pro určité konstrukce důležitá. Příkladem může být podlahový panel podepřen sloupy, kde je v místě podepření vysoce koncentrované zatížení, čímž vzniká velké napětí valivého smyku v příčných vrstvách. Proto je důležité tuto pevnost vyhodnotit, aby bylo možné poskytnou technickou podporu pro mohutnější konstrukce (Li et al., 2014).

Opět tloušťka panelu ovlivňuje valivý smyk. Dá se říct, že s rostoucí tloušťkou klesá pevnost ve valivém smyku. U panelů vyrobených ze smrku a vysušených na $12\% \pm 2\%$ vlhkost byla testována tělesa 3vrstvá z lamel o tloušťce 20 mm (S-3-20), 3vrstvá z lamel o tloušťce 40 mm (S-3-40) a 5vrstvá z lamel o tloušťce 20 mm (S-5-20). Od každého bylo odzkoušeno 8 těles. Průměrné hodnoty pevnosti ve valivém smyku byly 2,18 MPa u S-3-20, u S-3-0 1,32 MPa a 1,39 MPa u S-5-20 (O’Ceallaigh et al., 2018).

Vliv tloušťky na valivý smyk testovali také Sikora et al. (2016). Na obrázku 8 je ukázáno porušení typické pro valivý smyk. Výsledky těchto zkoušek byly podobné jako u O’Ceallaigh et al. (2018). Také bylo použito smrkové dřevo, ale u vzorků 3- vrstevných o tloušťkách lamel 20 mm, 24 mm a 40 mm a 5- vrstevných o tloušťce lamel 20 mm. Tabulka 11 zobrazuje výsledky těchto zkoušek.



Obrázek 8. Typické porušení pro valivý smyk
(Sikora et al., 2016)

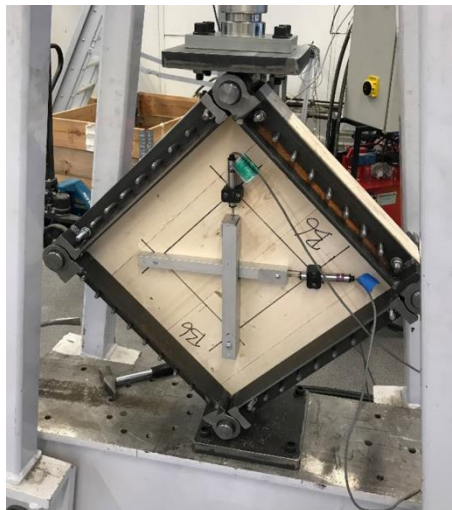
Tabulka 11. Průměrná pevnost ve valivém smyku
(Sikora et al., 2016)

Druh CLT	Průměrná pevnost ve valivém smyku (MPa)		
	Teorie vrstveného nosníku	Gamma metoda	Teorie smykové analogie
S-3-20	2,08	1,91	2,07
S-3-24	1,71	1,57	1,71
S-3-40	1,09	1	1,09
S-5-20	1,03	1,04	1,03

3.4.2.3 Modul pružnosti

Modul pružnosti byl u těles měřen nedestruktivní metodou za pomoci E – Computeru s příčnými vibracemi. Na řezivo bylo použito dřevo z kanadského jedlovce a byly vyrobeny 5vrstvé panely o tloušťce 175 mm. Průměrné hodnoty řeziva ve směru rovnoběžném s vlákny vykazovaly 10 766,5 MPa a ve směru kolmo na vlákna 978,8 MPa. Vlastnosti tuhosti panelů CLT se vypočetly na základě ekvivalentní tuhosti vícevrstevných anizotropních materiálů podle příručky CLT. Modul pružnosti panelů tedy potom odpovídal ve směru rovnoběžné k vláknům 6 851,4 MPa a ve směru kolmém na vlákna 4 893,9 MPa (He, 2018).

Modul pružnosti ve smyku zkoušeli Turesson et al. (2020) na smrkových 3vrstevných a 5vrstevných panelech. Odzkoušeno bylo čtrnáct 3vrstevných těles a jedenáct 5vrstevných. Zkoušení proběhlo pomocí testů obrazových rámu (picture frame tests) (Obr. 9). 3vrstvé panely se skládaly z 29 mm lamel a 5vrstvé z 20 mm.



Obrázek 9. Test obrazového rámu
(Turesson et al., 2020)

Pro 3vrstvé panely vyhodnotili modul pružnosti ve smyku na 497 MPa a pro 5vrstvé 553 MPa. V jejich práci nebyl zjištěn žádný vliv na velikost testovaných panelů.

3.5 Využití listnatého dřeva

V dnešní době se vyrábějí takřka všechny CLT panely z měkkého dřeva, tedy z jehličnatého. Avšak roste zájem o výrobu těchto panelů ze dřevin listnatých. Jedním z důvodů by mohla být nedostačující nabídka jehličnatého dřeva, která nepokryje nabídku této dřeviny,

příkladem mohou být USA. Z tohoto důvodu společnosti, které vyrábějí CLT, hledají alternativu (Adhikari et al., 2020).

Listnaté stromy oproti jehličnatým rostou relativně pomalu, mají lepší mechanické vlastnosti, a proto je listnaté dřevo dražší. Nedávno se provádělo několik pokusů na mechanické vlastnosti CLT panelů vyrobených z listnatých dřevin. Výzkumy ukázaly, že modul valivého smyku je výrazně vyšší než u dřeva jehličnatého. To zbudilo zájem o zkoumání méně kvalitního listnatého dřeva pro výrobu CLT panelů, aby bylo možné dosáhnout lepších mechanických vlastností bez zvýšení ceny (Rahman et al., 2020).

Rakouská společnost Hasslacher postavila rodinný dům z CLT panelů vyrobených z břízy a dnes je Hasslacherův materiál komerčně dostupným. Dalším propagátorem této výroby byla americká rada pro export tvrdého dřeva (AHEC), která vytvořila dva objekty z panelů z liliovníku tulipánokvětého, protože je početný, levný a má lepší mechanické vlastnosti než měkké dřevo. Tyto objekty jsou dodnes k vidění a vystupují pod názvy „Endless Stairs“ a „The Smile“ (Thomas a Buehlmann, 2017).

3.5.1 Smyk

Jak již bylo zmíněno, listnaté dřevo je u CLT panelů zkoumáno, kvůli zlepšení mechanických vlastností. Jednou z hlavních a důležitých vlastností je právě smyk. Ehrhart et al. (2015) experimentovali na různých typech dřevin. Panely byly vyrobeny ze smrku, jakožto nejvíce významného a používaného stromu, dále borovice, břízy, buku a topolu. V tabulce 12 jsou zobrazeny hlavní výsledky této studie, a to jsou modul pružnosti valivého smyku, maximální síla a hustota. Dále je nutné zohlednit vztah mezi hustotou a hodnotou modulu pružnosti ve valivém smyku (Obr. 10). Ve studii bylo dokázáno, že bříza si vede s modulem a pevností asi dvakrát lépe než smrk.

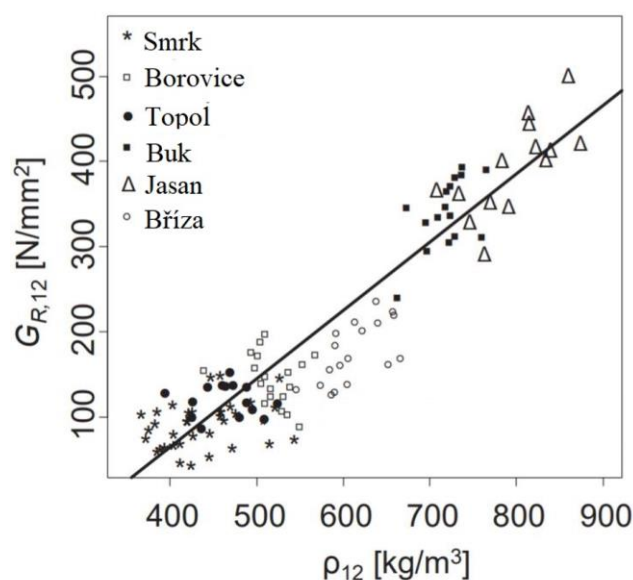
Stejnou problematiku zkoumali Crovella et al. (2019). Ti porovnávali použití jehličnatého (borovice) a listnatého dřeva (javor, jasan). I v této práci bylo dosaženo u listnatých dřevin vyšší pevnosti ve smyku. Hodnoty maximální síly u CLT panelů z borovice se pohybovali okolo 1,34 MPa a u listnatých 3 MPa pro javor a 3,10 MPa pro jasan. Díky těmto hodnotám mohou být slibnou vstupní surovinou pro výrobu panelů.

Gong et al. (2015) potvrzují, že bříza je nadějnou variantou pro další výrobu CLT panelů. Jejich výsledky ukazovaly maximální sílu v rovinném smyku u břízy až 3,10 MPa a u

osiky 2,88 MPa. Modul pružnosti ve valivém smyku byl v průměru 180 MPa, což potvrzuje příležitost pro listnaté dřevo.

Tabulka 12. Hodnoty modulu pružnosti ve valivém smyku
(Ehrhart et al., 2015)

Materiál	Modul pružnosti ve smyku (MPa)	Maximální napětí (MPa)	Hustota (kg/m ³)
Smrk	100	1,88	439
Bříza	188	3,45	612
Topol	127	2,88	463
Buk	357	5,37	720
Borovice	158	2,29	521



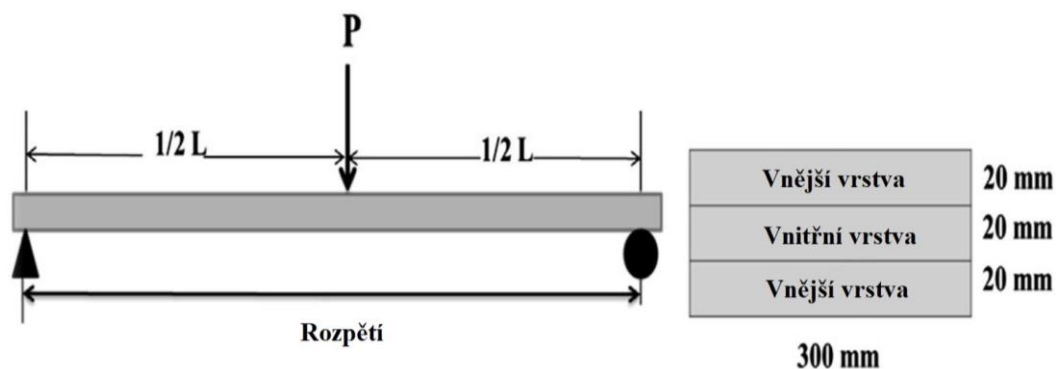
Obrázek 10. Vztah mezi hustotou a valivým modulem pružnosti ve smyku
(Ehrhart et al., 2015)

3.5.2 Ohyb

Další významnou mechanickou vlastností je právě ohyb. Právě tuto vlastnost studovali Hematabadi et al. (2020). Ke své práci použili rychle rostoucí topol (*Populus alba*) o průměru zhruba 300 – 500 mm. Desky byly vysoušeny na vzduchu o teplotě 25 °C a relativní vlhkosti 65 % po dobu jednoho měsíce, aby bylo dosaženo požadované vlhkosti 12 %. Byly vyrobené panely 3vrstvé, a to s orientací 90 × 0 × 90 stupňů pro směr hlavní pevnosti a 0 × 90 × 0 pro směr vedlejší pevnosti. Lepidlo pro výrobu bylo použito polyuretanové jednosložkové (PUR).

Další důležitou součástí studie byl vliv poměru rozpětí a šířky panelu na ohybové vlastnosti. Poměry byly rozděleny na 6:1 (A), 10:1 (B), 15:1 (C), 20:1 (D) a 25:1 (E).

Všechny ohybové zkoušky prováděli pomocí třibodového ohybového testu. Nastavení tohoto testu je uvedeno na obrázku 11.



Obrázek 11. Nastavení třibodového ohybového testu

(Hematabadi et al., 2020).

Výsledky testů se pak dle jednotlivých konfigurací měnily. Nejvyššího modulu pružnosti v ohybu (MOE) u hlavního směru pevnosti bylo dosaženo při největším rozpětí (konfigurace E) a to 7983 MPa. Naopak nejnižší u konfigurace A 3083 MPa. Meze pevnosti (MOR) se pak pohybovali od 25,7 MPa do 42,7 MPa.

Další výzkum byl prováděn na dvou eukalyptových dřevinách. První testovanou dřevinou byl Blahovičník kulatoplodý (*Eucalyptus globulus*) a druhou *Eucalyptus nitens*. Opět se jednalo o 3vrstvé panely lepené komerčním polyuretanovým lepidlem. Pro každou dřevinu byly vyrobeny 3 panely z méně kvalitních lamel, značené pro nitens (NU) a pro globulus (GU), a 3 panely lepší kvality NS a GS. Jednotlivé výsledky jsou zaznamenány v tabulce 13 (Pangh et al., 2019).

Tabulka 13. Výsledky modulu pružnosti a meze pevnosti

(Pangh et al., 2019)

Typ panelu	MOE (MPa)	MOR (MPa)
NU	9433,3	41,3
NS	11695,0	48,6
GU	11250,0	56,4
GS	13610,3	62,7

3.5.3 Delaminace

Je dobře známo, že dřevo s měnící se vlhkostí buď bobtná, anebo se smršťuje, ale naopak lepidla jsou hydrofobnější a tento proces u nich není až tak velký. Tento rozdíl mezi dřevem a lepidlem vede k pnutí na lepeném spoji (Frihart et al., 2015).

Použité lepidlo v panelech může výrazně ovlivňovat delaminaci. Okuda et al. (2018) potvrzují, že lepidlo EPI by nemělo být použito například v tropech z důvodu převládajících vlhkostních podmínek. Zkoušeno bylo šest různě kombinovaných CLT panelů. Vstupní dřeviny představovaly zejména asijské listnaté dřeviny, jako sengon (Albicie čínská), jabon (*Anthocephalus Cadamba*), akát a bambus. Výsledky ukazovaly, že pro všechny kombinace dřevin vycházelo jednosložkové polyuretanové lepidlo lépe než EPI. Ze všech 30 zkoušených těles lepených lepidlem EPI dosáhla na výsledek povolující norma pouze 3. Naopak polyuretanové lepidlo nesplnilo normu pouze u jednoho tělesa. Celkově bylo tedy polyuretanové lepidlo vyhodnoceno jako vhodnější pro lepení, při použití ve vlhkostních podmínkách.

Testováním CLT panelů vyrobených z akátového dřeva se zabývali Yusof et al. (2019). Zkouška probíhala u 20 těles z nichž se 10 lepilo pomocí polyuretanového lepidla a 10 pomocí fenolresorcinolformaldehydovým pryskyřičným lepidlem (PRF). Tělesa byla ponořena do vody a dána do tlakové nádoby, kde bylo vytvořeno vakuum 60 kPa a udržováno po dobu 30 minut. Po 30 minutách bylo vakuum uvolněno a byl aplikován tlak o 550 kPa na 2 hodiny. Po ukončení působení tlaku byla tělesa na 24 hodin umístěna do sušárny o teplotě 70 ± 5 °C. Delaminace u těles s PRF lepidlem vykazovala menší procento než u PUR lepidel. U PRF byla průměrná hodnota okolo 24 % a nejvyšší 41 %, u PUR průměrná 36 % a maximální 57 %.

4 CÍLE PRÁCE

Diplomová práce řešila otázku návrhu vhodné skladby CLT panelu vyrobeného z alternativních dřevin, konkrétně z břízy, v porovnání se smrkovým CLT. V rámci zadání byly stanoveny tyto cíle práce:

- návrh CLT panelů z březového a smrkového dřeva
- příprava lamel z březového a smrkového dřeva pro CLT panely
- příprava zkušebních těles z březového dřeva
- příprava těles z březového dřeva
- lepení lamel pro CLT panely pomocí PUR a EPI
- experimentální zjišťování smykové pevnosti na březových a smrkových CLT
- experimentální testování delaminace pomocí tlakového impregnačního zařízení

5 METODIKA

Kapitola metodika seznamuje čtenáře s vlastním prováděním experimentu. V kapitole jsou zahrnuty použité materiály a popis postup zkoušky. Dále informuje o důležitých parametrech, které musejí být dodrženy z důvodu přesnosti testů. Experimentální zkoušky byly provedeny podle platných norem, které jsou zde také zařazeny, kvůli možnému porovnání výsledků z jiných studií.

Dílní části metodiky jsou:

- Použitý materiál
- Postup výroby experimentálních těles
- Klimatizování
- Delaminace
- Smykové zatížení
- Vyhodnocení zkoušek

Použitý materiál

Smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst) se dnes nachází téměř po celé severní polokouli, avšak původní lokací této dřeviny byla pouze Evropa a západní Asie. Původně byl horskou dřevinou, ale postupem času se přesunul mezi celé území od vysokých hor až po nížiny, jako je tomu dnes. Stromy mohou dorůstat až do výšky 50 m a mají kuželovitou korunu (Krása, 2007).

U nás je smrk významné užitkové dřevo, používá se jak v nábytkářském průmyslu (lišty, překližky, dýhy, nábytek), tak v konstrukčním a stavebním (sloupy, střešní konstrukce, nosníky, konstrukční dřevo). Průměrná hustota smrku ztepilého je u nás okolo 450 kg/m³ při vlhkosti 12 % (Gryc et al., 2008).

Bříza Bělokorá (*Betula pendula* Roth) je velice nenáročná, a proto se jedná o nejrozšířenější druh břízy ve střední Evropě. Březové dřevo je pružné a pevné, ale méně odolné proti dřevokazným houbám a povětrnostním podmínkám. Bříza dorůstá do výšky 30 m a její koruna je nepravidelná. Ohledně výhřevnosti je téměř srovnatelná s dubovým dřevem, dobře hoří i ve vlhkém prostředí. Zpracovatelnost této dřeviny je dobrá, avšak trvanlivost je menší. Využití břízy je v mnoha oborech, jako například: nábytkářství, papírnictví, léčitelství. Ve výzkumu je využití tohoto dřeva ve stavebnictví.

Lepidla

Kestopur 1010 je jednosložkové vlhkostí vytvrzující polyuretanové lepidlo, které je vyhrazeno pro lepení lamelového dřeva podle ČSN EN 14080 (2013), dále pro výrobu dřeva s zubovým spojem podle ČSN EN 15497 (2015) a pro křížem vrstvené dřevo (CLT) dle normy ČSN EN 16351 (2021) (Tab. 14). Lepidlo může být dále používáno při lepení dřeva, kde je vyžadována vysoká odolnost proti vlhkosti. Neobsahuje žádná rozpouštědla ani formaldehyd, a tudíž vyhovuje emisní klasifikaci M1 pro stavební materiály. Při lepení musí být povrch lepeného materiálu čistý a odstraněný od nečistot. Nanášení lepidla musí být rovnoměrné a roztírá se buď na jednu nebo na obě lepené plochy, podle charakteru použitého materiálu. Při použití lepidla je doporučeno použít ochranné rukavice a při teplotách vyšších než 40 °C je nutné použít ochrannou masku. Čerstvé skvrny od lepidla se odstraňují pomocí suchého hadříku a acetonu. Již vytvrdlé lepidlo je možné odstranit pouze mechanicky (Kiilto Oy, 2021). Podrobnější informace o lepidle jsou uvedeny v příloze 1.

Tabulka 14. Vlastnosti lepidla Kestopur 1010
(Kiilto Oy, 2021)

Typ	Polyuretan
Hustota	1,2 kg/dm ³
Barva	Průhledná, po vytvrnutí světlá
Viskozita	10 000 mPas
Otevřený čas	Max. 10 min (aplikované množství 180 g/m ²)
Lisovací čas	Od 30 min
Teplota při aplikaci	18 – 30 °C
Vlhkost dřeva	6 – 20 % (doporučuje se cca 15 % vlhkosti)
Nános	140 – 180 g/m ² zubový spoj 160 – 200 g/m ² plošný spoj

Kestokol WR 6040 je izokyanátové emulzní polymerní lepidlo s vynikající odolností vůči povětrnostním vlivům (Tab. 15). Lepidlo má výborné vlastnosti proti povětrnostním vlivům a splňuje požadavky třídy odolnosti proti vodě D4. Možné využití je při aplikacích, které jsou vystavené nepříznivým povětrnostním vlivům, jako je zahradní nábytek, lepení lodí (nesmí být použito u částí, které jsou pod hladinou vody) a specifické aplikace na lepené dřevo. Lepidlo je nutné smíchat před použitím s tvrdidlem M v poměru 100:15 a řádně promíchat. Lepidlo musí být nanášeno rovnoměrně a na jednu stranu lepených ploch. Lisování je možné jak ve studeném, horkém nebo vysokofrekvenčním lisu. Horký a vysokofrekvenční lis

urychluje vytvrnutí (Kiilto Oy, 2021). Podrobnější informace o lepidle jsou uvedeny v příloze 2.

Tabulka 15. Vlastnosti lepidla Kestokol WR 6040
(Kiilto Oy, 2021)

Hustota	1,15 kg/dm ³
Barva	Světle béžová
Viskozita	11000 mPas po přidání tvrdidla
Otevřený čas	11 – 24 min (spotřeba 150 – 250 g/m ²)
Lisovací čas	Minimum 40 min
Poměr míchání	100:15
Vlhkost dřeva	6 – 15 %
Nános	150 – 250 g/m ²

5.1 Příprava panelů

Výroba CLT panelů byla podle normy ČSN EN 16351 (2021). Pro výrobu byly použity dva různé druhy dřevin a dva různé typy lepidel. Byly vyrobeny 4 druhy CLT panelů o rozměrech 300 × 60 × 2000 mm v kombinacích: smrkové dřevo s polyuretanovým lepidlem (SM-PUR), smrkové dřevo s izokyanátovým emulzním polymerním lepidlem (SM-EPI), březové dřevo s polyuretanovým lepidlem (BR-PUR) a březové dřevo s izokyanátovým emulzním polymerním lepidlem (BR-EPI). K výrobě byly poskytnuty březové a smrkové fošny přibližně o rozměrech 450 × 55 × 4100 mm (Obr. 12). Fošny byly rozpůleny na pokosové pile, a dále byly na formátovací pile odděleny oblíny se středovou vrstvou. V dalším kroku byly nařezány lamely na požadovanou šířku s přídavkem na další opracování.



Obrázek 12. Fošny na zpracování

Po nařezání jednotlivých lamel bylo provedeno na srovnávací frézce srovnání dvou ploch do pravého úhlu, což je důležité pro následující upravování na požadovanou tloušťku. Úprava tloušťky proběhla na tloušťkovací frézce SCM S 630 CLASS (SCM). Jednotlivé lamely nebyly upraveny přímo na definitivní tloušťku z důvodu lepení a pozdějšího tloušťkování celých samostatných vrstev. Příčné lamely se nekrátily, kvůli možnému zaseknutí při otočení ve frézce. Byly zhotoveny tak, že se dlouhé lamely nejdříve upravily na požadovanou tloušťku, a poté nakrátily na délku 320 mm.

Lamely na podélné vrstvy mohly být k sobě bočně lepeny. Lepidlo se nanoslo rovnoměrně na jednotlivé spáry a následně byly lamely vloženy na sebe do svislého lisu (Obr. 13). Doba lisování se odvíjela od použitého lepidla z důvodu rozdílného vytvrdnutí.



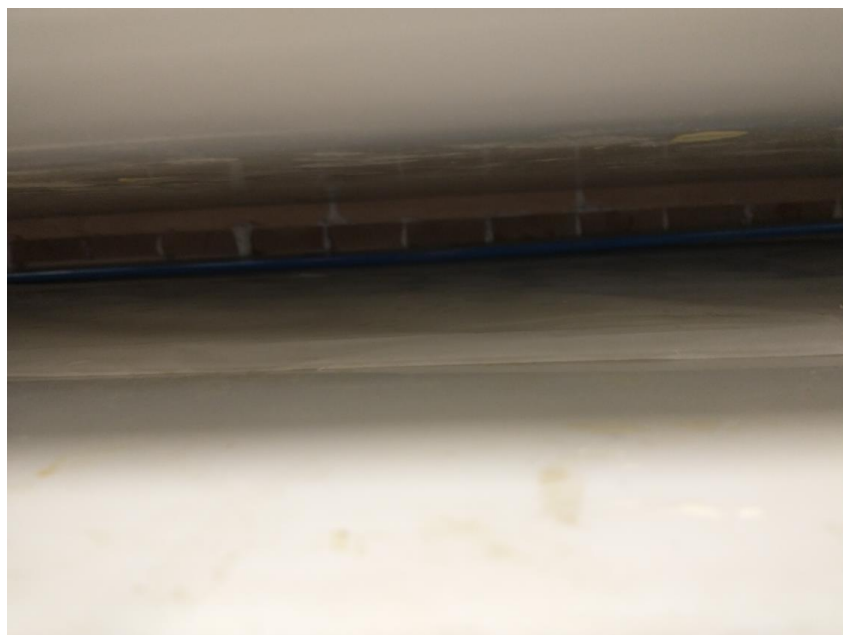
Obrázek 13. Lisování podélných vrstev

Vytvrdlé desky byly vyjmuty z lisu a připraveny na čištění od vyteklého lepidla. Tento proces byl nutný, kvůli další úpravě tloušťky v tloušťkovací frézce, aby se zamezilo opotřebení nožů. Jak již bylo zmíněno, další fází přípravy byla úprava tloušťky desky na již konečnou, tedy 20 mm (Obr. 14). Po tloušťkování přišlo na řadu krácení na kotoučové pile na délku pro podélné vrstvy, délka odpovídala konečnému rozměru s nadmírou, kvůli zarovnání po slisování.



Obrázek 14. Tloušťkování vrstev

Když byly podélné vrstvy hotové, mohla být vytvořena vrstva střední. Výroba střední vrstvy byla složitější. Na spodní vrstvu bylo nanесeno lepidlo a poté na ní skládány příčné lamely, které byly lepeny k sobě i bočně. Po naskládání všech příčných lamel byly délkově staženy svorkou (Obr. 15). Dále se rovnoměrně nanесlo lepidlo mezi střední a horní vrstvu. Po přiložení poslední vrstvy byl panel předán do vodorovného hydraulického lisu SCM Sergiani Leopeda gs 6/90 (SCM) (Obr. 16). Doba lisování odpovídala typu použitého lepidla.



Obrázek 15. Svorka stahující střední vrstvu

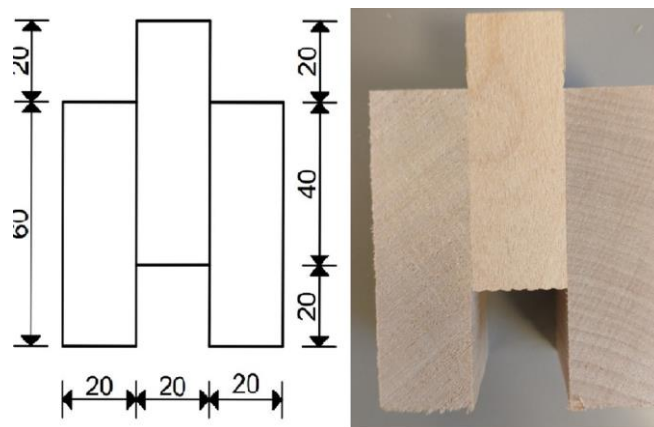


Obrázek 16. Hydraulický lis SCM Sergiani Leopeda gs 6/90

Hotový vytvrdlý panel se zarovnal na formátovací pile ze všech stran. Odřezány byly nadměry a vyteklé lepidlo.

5.2 Smyk

Pro smykovou zkoušku se z panelů vyřezalo celkem 80 těles (20 těles – BR-PUR, 20 těles BR-EPI, 20 těles SM-PUR a 20 těles SM-EPI). Tělesa byly vytvořeny dle normy prEN 14 732. Celková výška tělesa byla 80 mm s tím, že střední vrstva přesahovala z jedné strany o 20 mm a z druhé byla o 20 mm kratší než vnější vrstvy, šířka byla 40 mm a tloušťka odpovídala tloušťce panelu, tedy 60 mm. Rozměry těles jsou zobrazeny na obrázku 17. Každé těleso byl po zhotovení označen značkou a pořadovým číslem, například SM-PUR 2.



Obrázek 17. Rozměry těles pro smykovou zkoušku

Tělesa byla ihned po vytvoření odnesena a vložena do klimatizační komory, aby byla klimatizována na vlhkost 12 %. Zde byla tělesa rozestavena tak, aby mezi nimi mohl proudit vzduch a dosáhlo se maximálního klimatizování (Obr. 18). Komora byla nastavena na relativní vlhkost $65 \pm 5 \%$ a teplotu $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obrázek 18. Rozestavení těles v klimatizační komoře

5.2.1 Postup zkoušky

Zkouška se prováděla v univerzitní laboratoři na zkušebním stroji UTS 50 (Obr. 19), stroj je připojený na počítač, který ho řídí a má nainstalovaný software TIRAtest, díky kterému je možné nastavit správné parametry zkoušky, jako je rychlost posuvu, síla, zapisování přesných hodnot a další, které vyžaduje norma.



Obrázek 19. Univerzální zkušební stroj UTS 50

Do stroje byly tělesa vkládána tak, aby střední (delší) vrstva směřovala nahoru a mohly tak být namáhány spáry mezi vnějšími vrstvami (Obr. 20), dále bylo důležité označit místo, aby byla tělesa vkládána stále stejně. Po umístění byl trhací stroj spuštěn a pomalu sjížděla horní část dolů. Pokud došlo během zkoušky k poklesu síly o 20 % byla zkouška automaticky ukončena a horní část se přesunula do počáteční polohy. Pomocí stroje UTS 50 byla zaznamenána maximální síla pro smykové porušení těles. Naměřené hodnoty softwarem TIRAtest byly přesunuty do programu Excel a uchovány pro další výpočty.



Obrázek 20. Princip testování smykové pevnosti

Maximální síla byla následně dosazena do vzorce pro výpočet pevnosti ve smyku (1). Do vzorce musela být zapsána plocha obou namáhaných ploch.

$$f_v = \frac{F_u}{2 \cdot A} \quad (1)$$

Kde:

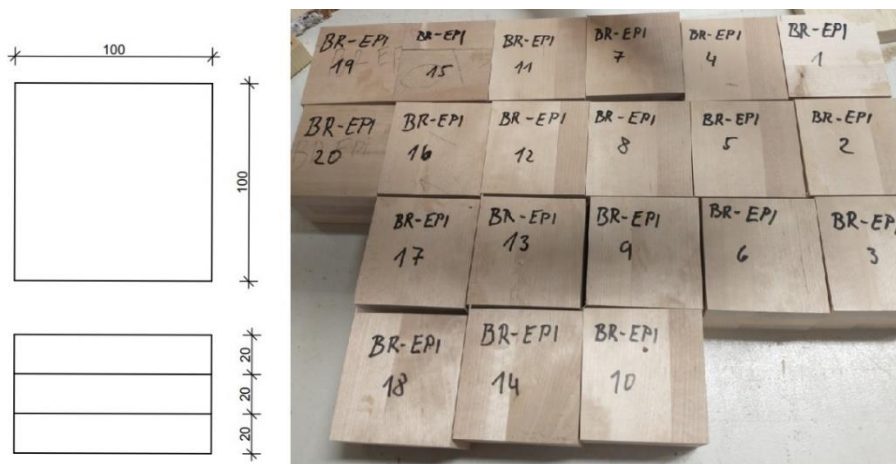
F_u – maximální zatížení (N),

A – smyková plocha (mm^2), pro výpočet musely být použity obě smykové plochy.

5.3 Delaminace

Pro zkoušku delaminace byly použity CLT panely, které byly vyrobeny u smykové pevnosti (výroba viz. kapitola 5.1 Příprava panelů). Zkouška byla prováděna podle normy ČSN EN 16351 (2021). Bylo nutné vytvořit z CLT panelů tělesa o velikosti 100 mm x 100 mm (Obr.

21). Tělesa se vyřezávala na formátovací pile a každé těleso bylo označeno kódem podle druhu dřeviny a použitého lepidla, a pořadovým číslem. Od každého druhu (SM-PUR, SM-EPI, BR-PUR, BR-EPI) bylo vytvořeno 20 těles, které se klimatizovali v klimatizační komoře při relativní vlhkosti $65 \pm 5 \%$ a teplotě $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ na 12 % vlhkost. Po dosažení vlhkosti 12 % byla tělesa umístěna po 20 do nádoby s vodou, ve které byla pomocí závaží zatěžkána, aby nevyplavávala nahoru, a uložena do impregnačního zařízení (Obr. 22). Proces v impregnačním zařízení byl rozdělen na několik částí. První část se skládala z podtlaku 30 kPa po dobu 30 minut. Po uplynutí 30 minut nastávala část druhá a byl pomocí kompresoru změněn podtlak na přetlak, a to o velikosti $\pm 680 \text{ kPa}$. Tento proces trval 120 minut.



Obrázek 21. Tělesa na zkoušku delaminace



Obrázek 22. Impregnační zařízení

Po uplynutí 120 minut byl vypuštěn vzduch z autoklávu, aby se vyrovnaly tlaky mezi komorou a okolním prostředím a tělesa byla vyjmuta z nádoby a přesunuta do, ve stejné laboratoři, klimatizační komory Memmert 30 – 1060 (Obr. 23). V klimatizační komoře byla nastavena teplota 75 °C. V této komoře se tělesa uzavřela na 19 hodin. 19 hodin od uzavření těles byla z klimatizační komory vyjmuta a připravena k následnému měření delaminace. U každé spáry byla pomocí posuvného měřítka (Obr. 24) měřena delaminace a obvod. Všechny hodnoty byly zaznamenávány do tabulek podle kódů v programu Excel.



Obrázek 23. Klimatizační komora Memmert 30–1060



Obrázek 24. Digitální posuvné měřítko Mitutoyo
(Mitutoyo Česko s.r.o., 2022)

Po naměření všech hodnot bylo možné začít provádět výpočty. Nejprve se počítala maximální delaminace, což znamená spára s největší delaminací je použita pro výpočet této hodnoty. Výpočet, který uvádí norma je podle vzorce:

$$Delam_{max} = 100 \times \frac{l_{max,delam}}{l_{glue\ line}} \quad (2)$$

kde:

$Delam_{max}$ – maximální delaminace (%),

$l_{max,delam}$ – délka největší delaminace (mm),

$l_{glue\ line}$ – délka lepené spáry s největší delaminací (mm).

Druhým výpočtem byla celková delaminace. Výpočet celkové delaminace se provádí pomocí vzorce:

$$Delam_{tot} = 100 \times \frac{l_{tot,delam}}{l_{tot,glue\ line}} \quad (3)$$

kde:

$Delam_{tot}$ – celková delaminace (%),

$l_{tot,delam}$ – součet všech delaminací (mm),

$l_{tot,glue\ line}$ – součet délek všech lepených spár (mm).

Všechny výpočty byly opět zapisovány do programu Excel. Hodnoty byly převedeny do programu Statistica 13 od společnosti Tibco Inc. V programu byla aplikována ANOVA, jedná se o více faktorovou analýzu rozptylu. ANOVA je metoda zkoumající vliv různých faktorů a jejich vzájemné kombinace. K posouzení bylo využito takzvaného Fischerova testu (F-test).

6 VÝSLEDKY A DISKUSE

Následující kapitola je rozdělena podle prováděných zkoušek (delaminace, smyk). Výsledky jsou zaznamenány v jednotlivých grafech a tabulkách. Výsledky jsou dále také doplněny o srovnání s údaji dostupnými v literatuře.

6.1 Smyková pevnost

Díky tabulce 16 bylo možné určit faktory, které byly statisticky významnými. Z obsahu tabulky je zřejmé, že pro smykovou pevnost jsou všechny faktory (Typ lepidla, Dřevina CLT a Dřevina CLT * Typ lepidla) statisticky významné.

Tabulka 16. Statistické vyhodnocení smykové pevnosti

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F – Test	Hladina významnosti
Intercept	543,5860	1	543,5860	3990,474	0,000000
Typ lepidla	2,9454	1	2,9454	21,622	0,000014
Dřevina CLT	80,6168	1	80,6168	591,809	0,000000
Dřevina CLT * Typ lepidla	0,8208	1	0,8208	6,025	0,016390
Chyba	10,3528	76	0,1362		

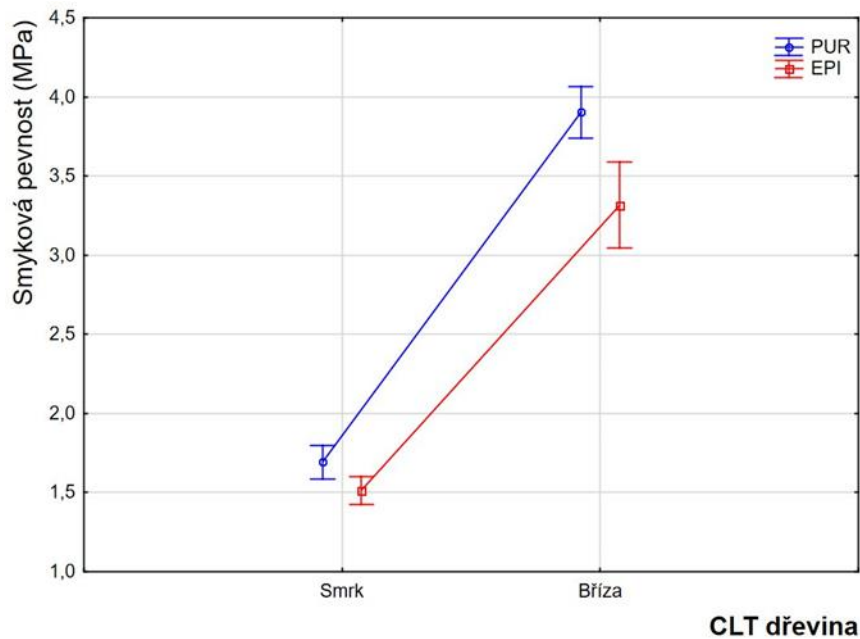
Na základě výsledků byla vyhodnocena největší pevnost ve smyku u CLT panelů vyrobených z břízy a lepených polyuretanovým lepidlem. Pevnost odpovídala 3,90 MPa. Naopak nejnižší pevnost vykazovaly panely vyrobené ze smrku, které byly lepeny izokyanátovým emulzním polymerním lepidlem. V tomto případě byla pevnost 1,51 MPa (Obr. 25).

Výsledky práce ukazují, že vliv dřeviny měl na smykovou pevnost velký vliv. Panely, které byly vyrobeny z březového dřeva vykazovaly o více jak polovinu větší pevnost ve smyku než panely vyrobené ze dřeva smrkového (Obr. 26), což naznačuje, že použitím březového dřeva by mohlo být možné zlepšit pevnost ve smyku CLT.

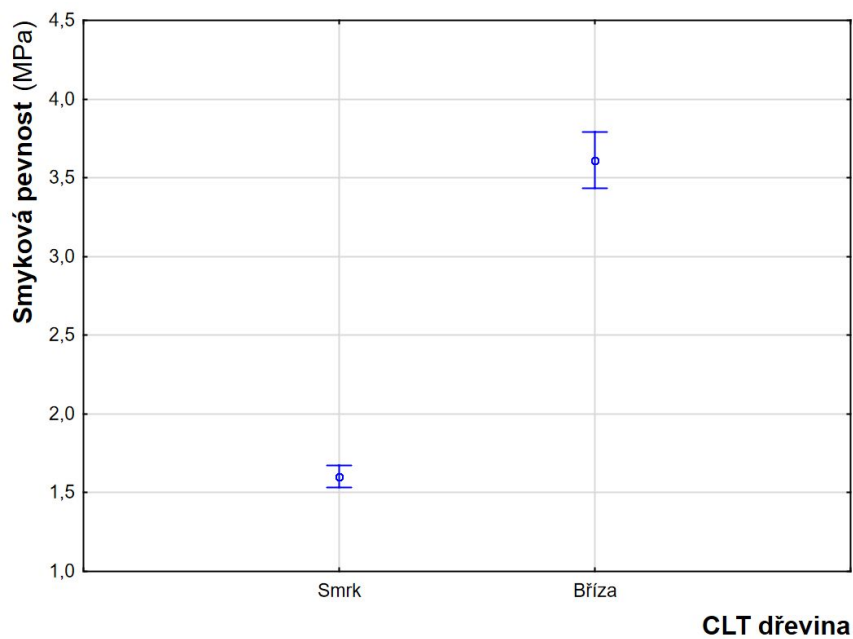
Vlivem dřeviny na smykovou pevnost CLT panelů se zabývali Muñoz et al. (2022), kteří ve své studii zkoušeli jako alternativu týk obrovský (*Tectona grandis*). Svými vlastnostmi se týk obrovský podobá bříze, a tak bylo možné porovnání. Při zkoušce smykové pevnosti

uvedli, že týk v zastoupení za listnaté dřeviny, vykazoval průměrné hodnoty okolo 4 MPa. Tato hodnota je srovnatelná s výsledky této práce.

Dalšími, kdo zkoumali možnou výrobu CLT panelů z listnatého dřeva, byli Lu et al. (2018). Při tomto výzkumu bylo použito, jako alternativa ke komerčně vyráběným panelům, eukalyptové dřevo. I zde byl zaznamenán posun v pevnosti ve smyku. U těchto panelů dosahovala pevnost ve smyku 3,51 MPa.



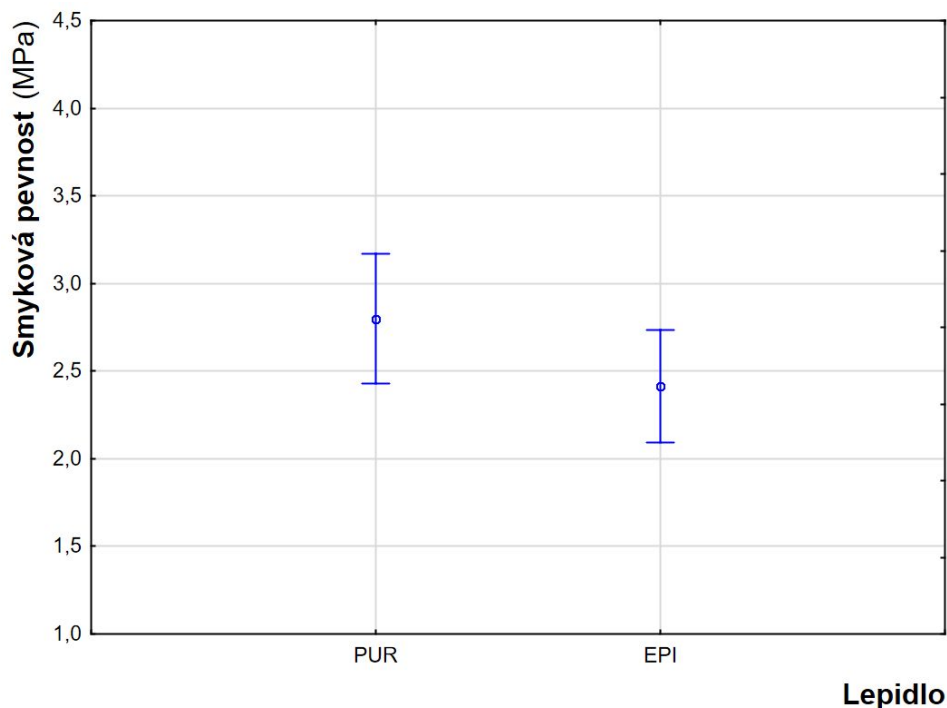
Obrázek 25. Závislost smykové pevnosti na druhu dřeviny a lepidle



Obrázek 26. Závislost smykové pevnosti na druhu dřeviny

Dalším faktorem bylo použité lepidlo. Izokyanátovým emulzní polymerní lepidlo dosahoval nižších výsledků u obou typů panelů. U smrkových panelů byl tento rozdíl o přibližně 11 % a u březových o 15 % (Obr. 27). Z těchto informací je patrné, že pro lepení CLT panelů je vhodnějším lepidlem polyuretanové lepidlo. Na vliv lepidla na pevnost ve smyku se zaměřili také Lu et al. (2018). V jejich studii bylo odzkoušeno lepidlo polyuretanové a izokyanátové emulzní polymerní lepidlo na eukalyptovém dřevě. Rozdíl mezi těmito lepidly byl v průměru 15 % s tím, že polyuretanové lepidlo vycházelo lépe.

CLT panely vyrobené z modřínového dřeva a lepené různými lepidly zkoušeli Li et al. (2021). I zde bylo potvrzeno, že polyuretanové lepidlo dosahuje lepších výsledků ve smykové zkoušce než izokyanátové emulzní polymerní. Zde dosahoval rozdíl mezi těmito lepidly až o 20 %.



Obrázek 27. Závislost smykové pevnosti na druhu lepidla

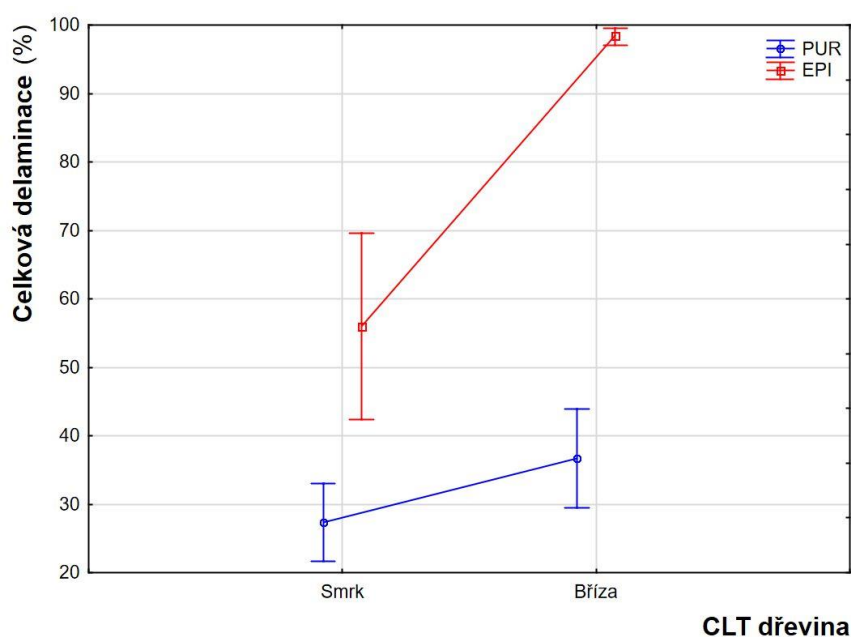
6.2 Delaminace

Pro delaminaci byla také vypracována tabulka statistické významnosti (Tab. 17). Z vypracované tabulky je možné říci, že všechny faktory jsou opět pro tuto zkoušku statisticky významné. Dále z tabulky vyplývá, že pro delaminační zkoušku je statisticky nejvýznamnějším faktorem druh použitého lepidla. Druhým faktorem je dřevina a nejméně významnou, avšak statisticky významnou je kombinace druh lepidla a druh dřeviny.

Tabulka 17. Statistické vyhodnocení smykové pevnosti

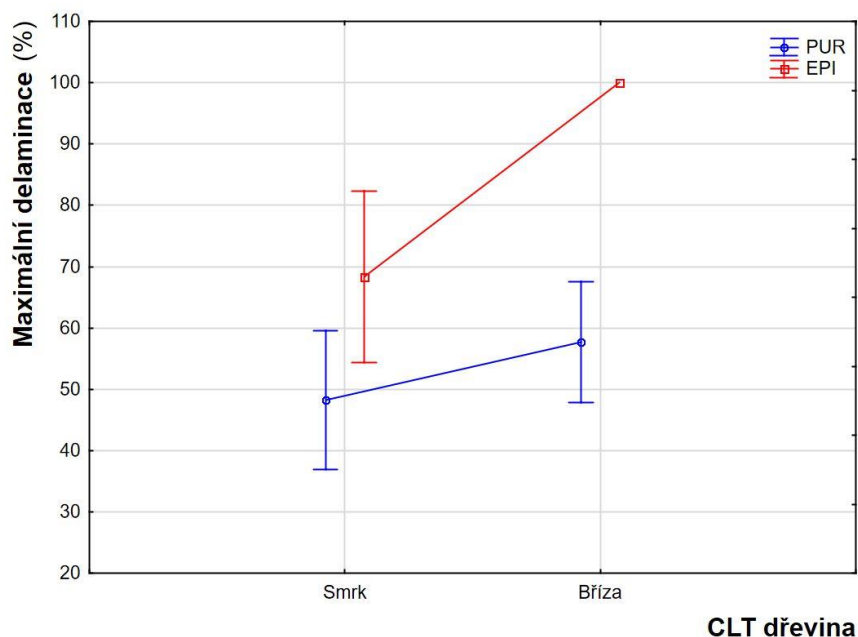
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F – Test	Hladina významnosti
Intercept	376201,9	1	376201,9	784,0226	0,000000
Typ lepidla	19512,4	1	19512,4	40,6648	0,000000
Dřevina CLT	8417,4	1	8417,4	17,5422	0,000075
Dřevina CLT * Typ lepidla	2464,2	1	2464,2	5,1356	0,026286
Chyba	36467,5	76	479,8		

Největší delaminace byla u panelů vyrobených z březového dřeva lepené izokyanátovým emulzním polymerním lepidlem. Průměrná celková delaminace u těchto vzorků dosahovala na 99,45 %. Jako druhá největší byla celková delaminace u panelů ze smrkového dřeva lepených izokyanátovým emulzním polymerním lepidlem. Zde byla průměrná celková delaminace 55,98 %. Nejlépe vycházely panely lepené polyuretanovým lepidlem. U břízy lepené polyuretanovým lepidlem byla průměrná celková delaminace 36,71 % a nejlépe vycházely panely smrkové lepené polyuretanovým lepidlem, kde celková delaminace odpovídala 27,36 % (Obr. 28). Menší odolnost EPI lepidla by mohla být způsobena tím, že je na vodní bázi, a tak nemá takovou odolnost vůči vodě jako polyuretanové. Dále polyuretanové lepidlo je pružnější než EPI, a tak více může kopírovat rozměrové změny při zatížení panelů vodou.



Obrázek 28. Vliv lepidla a dřeviny na celkovou delaminaci

Maximální průměrná delaminace u BR-EPI dosahovala až na 100 %, tedy úplné odlepení. U vzorků SM-EPI byla průměrná hodnota maximální delaminace 68,38 %. Pro BR-PUR dosahovala 57,67 % a u SM-PUR 48,25 % (Obr. 29).

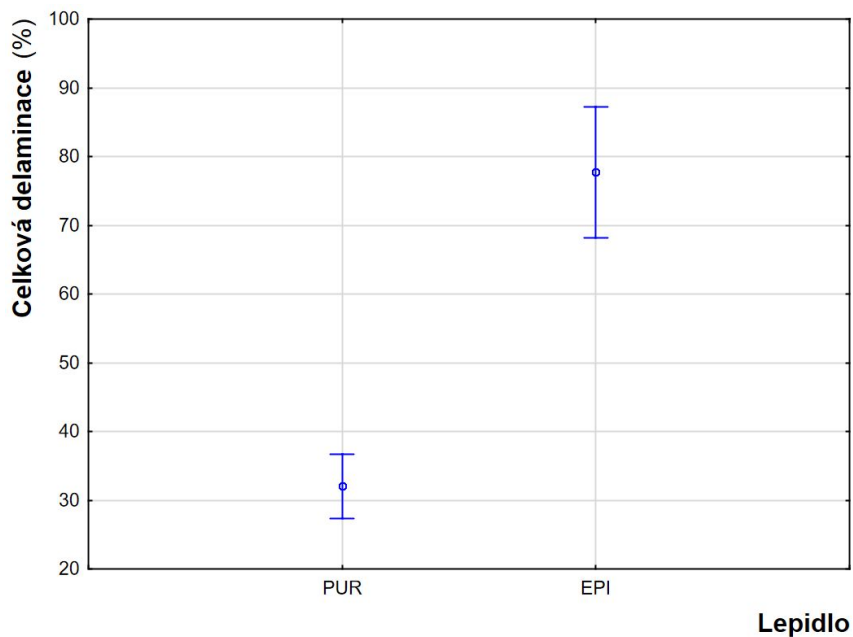


Obrázek 29. Vliv lepidla a dřeviny na maximální delaminaci

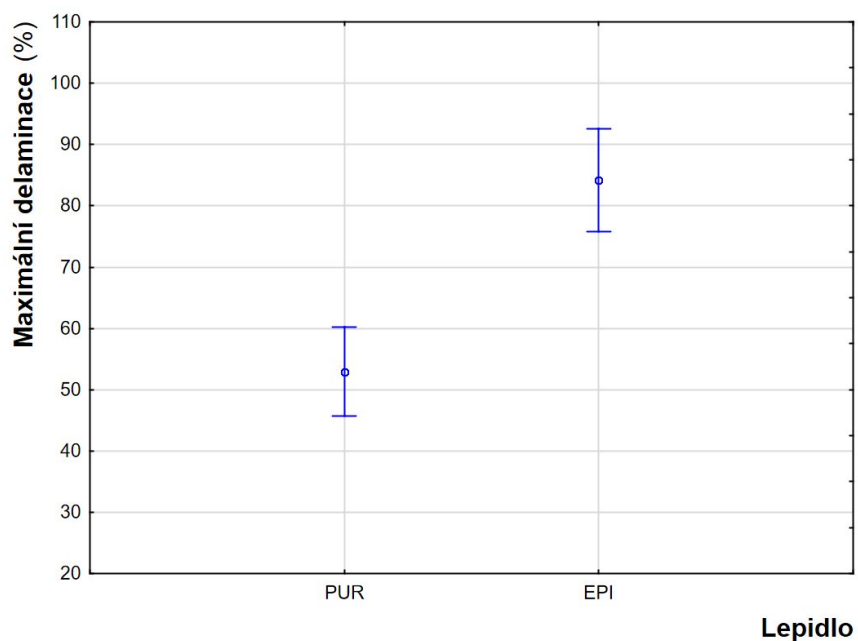
Vliv lepidla při celkové delaminaci zobrazuje obrázek 30. Z obrázku je patrné, že vliv lepidel byl velice velký. Polyuretanové lepidlo vykazovalo několikrát větší odolnost vůči vodě než lepidlo EPI. Maximální delaminace s vlivem lepidla je zobrazena na obrázku 31.

Vlivem lepidla na delaminaci se zabývali také Okuda et al. (2018). V této studii byla zkoušena tělesa vyrobené z listnatých dřevin (sengon, jabon, akát a bambus). Polyuretanové lepidlo dosahovalo také několikanásobně lepších výsledků než EPI. Zdůrazňují, že EPI lepidla nejsou určena pro prostředí s vysokou vlhkostí. Avšak i přesto, že EPI lepidla nefungovala dobře, zdůrazňují, že je předčasné je zavrhnout. Dle jejich tvrzení je to prostor pro nový výzkum v prostředí s vysokou teplotou a vysokou vlhkostí.

Li et al. (2021) také potvrdili lepší výkon polyuretanových lepidel oproti EPI. Ve své práci zkoušeli na CLT panelech vyrobených z modřínu tato dvě lepidla. U EPI lepidla dosáhla delaminace 55 % oproti polyuretanovému, které mělo průměrnou delaminaci přibližně 18 %. Dále zjistili, že pevnost spojů pomocí EPI lepidla ovlivňuje tlak při lisování. Při vyšším lisovacím tlaku dosahovaly panely lepené EPI lepidlem lepší delaminace.

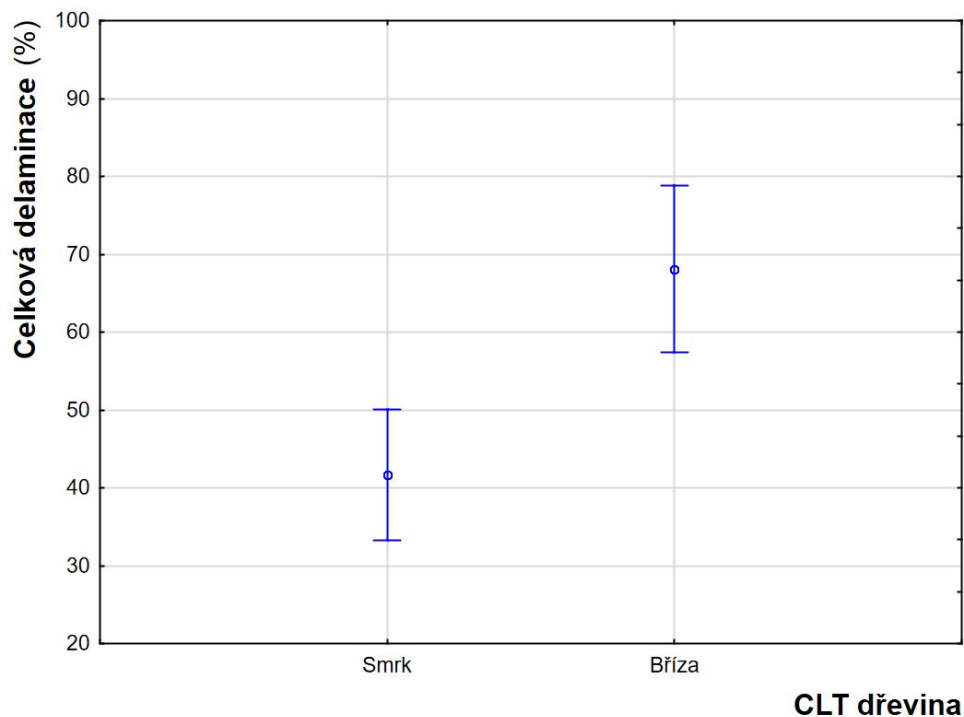


Obrázek 30. Vliv lepidel na celkovou delaminaci



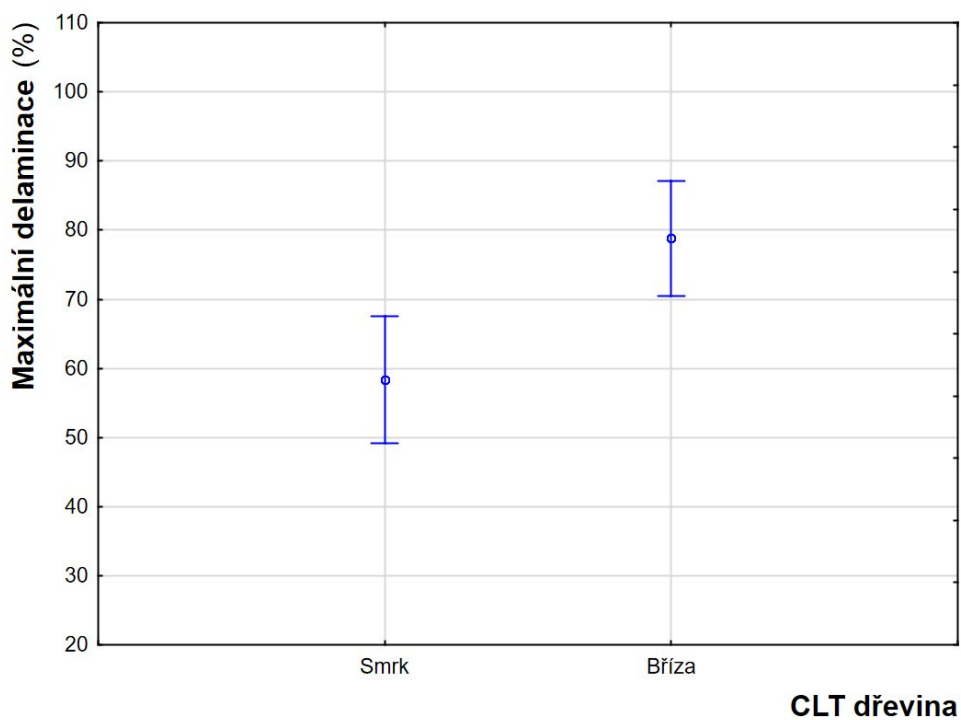
Obrázek 31. Vliv lepidel na maximální delaminaci

Vliv dřeviny byl i u delaminační zkoušky velice významným. Smrkové panely měly výsledky delaminační zkoušky v průměru o více než 20 % lepší než březové (Obr. 32). Maximální delaminaci zobrazuje obrázek 33. Tato skutečnost mohla být způsobena tím, že bříza je řazena do hodně sesychavých dřev a díky bobtnání a sesychání během delaminační zkoušky vzniká velký tlak na lepené spoje. Naopak smrk je řazen do středně sesychavých dřev a rozměrové změny nejsou tak velké.



Obrázek 32. Vliv lepidel na celkovou delaminaci

Muñoz et al. (2022) zkoumající vliv dřeviny na delaminaci ve svém výzkumu zkoušeli možnost výroby panelů z týku a gmeliny. Hledali možnost využití těchto listnatých dřevin pro další výrobu, avšak panely z obou dřevin byly vyhodnoceny s delaminací přesahující 50 %.



Obrázek 33. Vliv lepidel na maximální delaminaci

Veškeré průměrné hodnoty smykové pevnosti a delaminace zobrazuje tabulka 18. Březová tělesa měla větší delaminaci než tělesa ze smrkového dřeva, avšak smrková tělesa nevykazovala tak velké hodnoty smykové pevnosti jako březová.

Tabulka 18. Průměrné hodnoty smykové pevnosti a delaminace pro smrkové a březové CLT

Dřevina	Typ lepidla	Smyková pevnost f_t		Delaminace			
				Maximální delaminace $Delam_{max}$		Celková delaminace $Delam_{tot}$	
		průměr (MPa)	variační koeficient	průměr (%)	variační koeficient	průměr (%)	variační koeficient
Smrk	PUR	1,69	0,133	48,25	0,500	27,36	0,446
Smrk	EPI	1,51	0,123	68,38	0,437	55,98	0,518
Bříza	PUR	3,90	0,090	57,67	0,366	36,71	0,418
Bříza	EPI	3,32	0,175	100,00	0,000	99,45	0,014





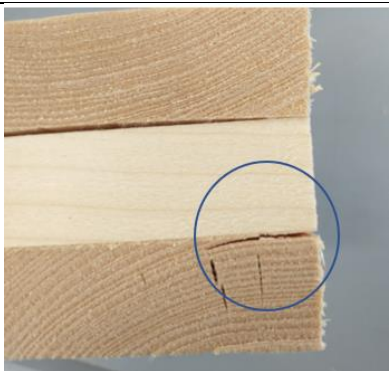
Porušení dřeva

Posledním bodem normy, podle které byla zkouška provedena, je porušení dřeva. U všech těles docházelo k minimálnímu poškození ve dřevě. Tudíž téměř u všech těles docházelo k porušení v lepidle. Podrobný popis jednotlivých typů panelů je uvedený v tabulce 19. Jedná se o odtržení (porušení) dřeva, a ne chybu v lepidle, což je nutné zohlednit pro posouzení kvality lepeného spoje. Typické porušení dřeva při delaminaci bylo u tělesa zobrazeném na obrázku 34.



Obrázek 34. Porušení dřeva

Tabulka 19. Maximální porušení dřeva

Název tělesa	Foto	Popis
BR EPI		<p>U BR – EPI, který měl 100 % delaminaci, bylo nalezeno minimální porušení dřeva na spodní lamele.</p>
BR EPI		<p>Porušení ve dřevě na konci spodní lamely BR EPI</p>
SM EPI		<p>Na SM EPI bylo také nalezeno minimální porušení ve dřevě na střední lamele.</p>
BR PUR		<p>Další porušení bylo nalezeno u BR PUR.</p>
SM PUR		<p>Na spodní lamele tohoto tělesa je vidět porušení spoje, které není způsobeno chybou v lepidle, ale ve dřevě.</p>

Po prozkoumání všech těles byly nalezeny dvě porušení u typu BR-EPI a u ostatních typů po jednom. Všechna tato porušení byly minimální. Díky těmto informacím je možné říci, že pro tuto práci je porušení dřeva zanedbatelné a neovlivní výsledky delaminační zkoušky.

6.3 Cenové zhodnocení

Nutné je poznamenat, že březové dřevo je běžně dražší než smrkové, ovšem v současnosti je vysoká poptávka po smrkovém dřevě, proto je tento trend opačný. Polyuretanová lepidla jsou dlouhodobě dražší, jako jiná lepidla používané pro lepení konstrukčních materiálů ze dřeva. Z důvodu vyšší ceny polyuretanových lepidel jsou zkoumány a hledány alternativy. Březové dřevo vykazovalo v pevnosti ve smyku razantně vyšší hodnoty jak u požití polyuretanového lepidla, tak u požití lepidla izokyanátového emulzního polymerního lepidla. Jelikož zkouška naznačovala, že hodnoty jsou téměř o 125 % vyšší, než u smrkového dřeva nabízí se otázka, zda by nebylo vhodné investovat více peněz do dřeviny a zlepšit tak mechanické vlastnosti těchto panelů.

EPI lepidla jsou zkoumána z důvodu menší finanční náročnosti než PUR. Příznivá cena by mohla zmenšit finanční náročnost u panelů vyrobených z břízy, avšak u delaminační zkoušky vycházelo lepidlo u břízy prakticky nepoužitelné. Ovšem provedená delaminační zkouška je destruktivní a v reálném životě není možné, aby se panely do takovéto situace dostaly. Tento fakt otevírá možnosti pro další studie nebo vylepšení EPI lepidel, které neovlivní silně jejich cenu. Březové dřevo lepené polyuretanovým lepidlem při delaminační zkoušce mělo také horší výsledky než smrkové, ale již ne tak velké jako u EPI.

Jeden kilogram jednosložkového polyuretanového lepidla vychází na přibližně 200 Kč, oproti tomu 1 kg EPI lepidla vychází v průměru i s tvrdidlem na 140 Kč. Nyní je cena březové fošny o tloušťce 52 – 55 mm podle Wood store (2021) 13 600 Kč za m³ a smrkové o stejné tloušťce 15 000 Kč za m³. Cenové zhodnocení jednotlivých panelů je uvedené v tabulce 20.

Tabulka 20. Cenové zhodnocení panelů

Typ panelu	Cena použitého dřeva (Kč)	Cena lepidla (Kč)	Celkem (Kč)
BR – PUR	8 280,36	160	8 440,36
BR – EPI	8 280,36	128	8 408,36
SM – PUR	9 132,75	160	9 292,75
SM – EPI	9 132,75	128	9 260,75

7 ZÁVĚR

Úkolem diplomové práce byla analýza smykové pevnosti CLT panelů vytvořených z březového dřeva. Práce se také zabývala hodnotou delaminace u těchto panelů a vlivu použitých lepidel. Pro experimentální část byla vytvořena tělesa z březového a smrkového dřeva. Tato tělesa byla lepena dvěma druhy lepidel, a to lepidlem PUR a EPI. Tělesa byla následně testována na při smykových a delaminačních zkouškách.

Smyková zkouška ukázala na lepší pevnost u použití březového dřeva. Tento faktor byl také vyhodnocen pro smykovou zkoušku jako statisticky nejvýznamějším. Při porovnání průměrných pevností ve smyku dosahovaly CLT panely vyrobené z březového dřeva o téměř 125 % lepší pevnost ve smyku než panel z komerčně vyráběného smrku. Porovnání vlivu lepidel vykazovalo lepší výsledky PUR lepidlo a to o 11 % u smrkových panelů a o 15 % u panelů březových. U delaminační zkoušky mělo největší vliv použité lepidlo. U obou dřevin dopadlo hůře EPI lepidlo. Smrkové panely měly mezi lepidly rozdíl o přibližně 50 % a březové dokonce o 63 %. Dále při porovnání březových a smrkových panelů hodnoty delaminace byly u smrkových panelů v průměru o cca 25 % lepší.

V praxi je možné výsledky, ke kterým došla tato práce, využít při navrhování alternativních CLT z listnatých dřevin a také při aplikaci lepidel u CLT panelů a lepeného dřeva. Dalším bodem využití výsledků je při výběru lepidel u lepeného dřeva, které je v kontaktu s vodou anebo vysokou vlhkostí. Data mohou celkově pomoci při výběru lepidel a dřeviny pro aplikaci u stavebních konstrukcí. Jelikož má smrk špatný kořenový systém, měla by bříza v budoucnosti vyšší možnost vysazení z hlediska, že je bříza rychle rostoucí a mohla by být využívána.

Pro další výzkum by bylo možné zaměřit se na vliv střídání teplot a vlhkostí. U lepidel by byl možný výzkum vlivu tlaku při lisování na vlastnosti materiálu. Možné je doplnit výzkum i z hlediska pevnosti v tlaku u použitého materiálu.

8 POUŽITÁ LITERATURA

ADHIKARI, S., QUESADA, H., BOND, B., HAMMETT, T. (2020). Potential of Hardwood Lumber in Cross Laminated Timber in North America: A CLT Manufacturer's Perspective. *Mass Timber Construction Journal*, 3 (1), 1-9. [cit. 2021.11.14]. Dostupné z: <https://www.journalmtc.com/index.php/mtcj/article/view/20>

BAKER, M.C. (1969). Decay of wood. *National Research Council Canada*. [cit. 2021.10.17] DOI: [10.4224/40000811](https://doi.org/10.4224/40000811).

BARDET, S., BEAUCHÉNE, J., THIBAUT, B. (2003). Influence of basic density and temperature on mechanical properties perpendicular to grain of ten wood tropical species. *Ann. For. Sci.* 60 (1), 49-59. [cit. 2021.10.12] DOI: [10.1051/forest:2002073](https://doi.org/10.1051/forest:2002073).

BRANDNER, R., FLATSCHER, G., RINGHOFER, A., SCHICKHOFER, G., THIEL, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products* 74 (3), 331-351. [cit. 2021.10.17] DOI: [10.1007/s00107-015-0999-5](https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5)

COLAK, S., COLAKOGLU, G., AYDIN, I. (2004). Effects of logs steaming, veneer drying and aging on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL). *Building and Environment* 42 (1), 93 - 98. [cit. 2021.11.11] DOI: [10.1016/j.buildenv.2005.08.008](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.08.008)

CROVELLA, P., SMITH, W., BARTCZAK, J. (2019). Experimental verification of shear analogy approach to predict bending stiffness for softwood and hardwood cross-laminated timber panels. *Construction and Building Materials* 229. [cit. 2021.11.20] DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.116895](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116895).

ČSN 73 0540-2 (2021). *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

ČSN EN 14 080 (2013). *Dřevěné konstrukce: lepené lamelové dřevo*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

ČSN EN 15497 (2015). *Konstrukční rostlé dřevo spojované zubovitým spojem – Požadavky na funkční vlastnosti a minimální výrobní požadavky*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

ČSN EN 16351 ed. 2 (2021)., *Dřevěné konstrukce – Křížem vrstvené dřevo – Požadavky*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

DEKWOOD a.s. (2013). Dekwood: Stavební hranoly, *Dekwood* [online]. [cit.2021.10.13]. Dostupné z: <https://dekwood.cz/data/bshtechicky.pdf>

DI BELLA, A., MITROVIC, M. (2020). Acoustic Characteristics of Cross-Laminated Timber Systems. *Applied Sciences* 12 (14), 5612. [cit. 2021.10.20] DOI:[10.3390/su12145612](https://doi.org/10.3390/su12145612).

EHRHART, T., BRANDNER, R., SCHICKHOFER, G., FRANGI, A. (2015). Rolling Shear Properties of some European Timber Species with Focus on Cross Laminated Timber

(CLT): Test Configuration and Parameter Study. *International Network on Timber Engineering Research*. 2015, 61 – 76 [cit. 2021.11.18]. DOI: [10.3929/ethz-a-010548168](https://doi.org/10.3929/ethz-a-010548168)

FINCH, G., WANG, J. (2019). Chapter 10: Building enclosure design of cross-laminated timber construction. In KARACABEYLI, E., GAGNON, S., *Canadian CLT Handbook*. Vydání 1. Pointe-Claire, QC: FPInnovations, 2019, 517–582. ISBN 978-0-86488-592-0

FprEN 14732 (2014). Timber structures – *Structural prefabricated wall, floor and roof elements – Requirements*. European Committee for Standardization.

FRIHART, CH.R., YELLE, D.J., IBACH, R.E. (2015). Wood properties influence bond durability. In BOUFFARD, J.-F., *5th International Scientific Conference on Hardwood Processing 2015*. Vydání 1. Quebec: FPInnovations, 2015, 78-84. ISBN 978-0-86488-571-5

FU, W.-L., GUAN, H.-Y., KEI, S. (2021). Effects of Moisture Content and Grain Direction on the Elastic Properties of Beech Wood Based on Experiment and Finite Element Method. *Forests* 12 (5), 610. [cit. 2021.10.12] DOI: [10.3390/f12050610](https://doi.org/10.3390/f12050610).

GLASS, S.V., ZELINKA, S.L. (2010). Chapter 4: Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In ROSS, R.J., *Wood handbook - Wood as an engineering material*. Vydání 1. Madison : United States Department of Agriculture, 2010, 174 - 217. ISBN: 978-1892529022

GONG, M., DEBGYUN, T., LI, L., CHUI, Y.H. (2015). Planar Shear Properties of Hardwood Cross Layer in Hybrid Cross Laminated Timber. In BOUFFARD, J.-F., *5th International Scientific Conference on Hardwood Processing 2015*. Vydání 1. Quebec: FPInnovations, 2015, 85-90. ISBN 978-0-86488-571-5

GRANDMONT, J.-F., YEH, B., DAGENAIS, CH. (2019). Chapter 2: Cross-laminated timber manufacturing. In KARACABEYLI, E. a GAGNON, S., *Canadian CLT Handbook*. Vydání 1. Pointe-Claire, QC: FPInnovations, 2019, 53-103. ISBN 978-0-86488-592-0

GRYC, V., VAJRČÍK, H., KOTALÍK, O. (2009). Vybrané vlastnosti dřeva smrku pichlavého (*Picea pungens* Engelm.) Z nelesních půd. *Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun.* 57 (2), 37-44 [cit. 2021.12.16] DOI: [10.1186/s10086-019-1799-z](https://doi.org/10.1186/s10086-019-1799-z).

HE, M., SUN, X., LI, Z. (2018). Bending and compressive properties of cross-laminated timber (CLT) panels made from Canadian hemlock. *Construction and Building Materials* 185 (1), 175-183. [cit. 2021.11.08] DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.07.072](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.072).

HEMATABADI, H., MADHOUSHI, M., KHAZAEYAN, A., EBRAHIMI, G., HINDMAN, D., LOFERSKI, J. (2020). Bending and shear properties of cross-laminated timber panels made of poplar (*Populus alba*). *Construction and Building Materials* 265, 120326. [cit. 2021.11.20] DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2020.120326](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120326).

CHIRASATITSIN, S., PRASERTSAN, S., WISUTMETHANGOON, W., KYOKONG, B. (2005). Mechanical properties of rubberwood oriented strand lumber (OSL):

The effect of strand length. *Songklanakarin J. Sci. Technol* 27 (5), 1047-1055. [cit. 2021.10.13] Dostupné z: <http://rdo.psu.ac.th/sjst/journal/27-5/13-rubberwood.pdf>

KARACABEYLI, E., GAGNON, S. (2019). Chapter 1: Cross-laminated timber- Introduction to cross-laminated timber. In KARACABEYLI, E., GAGNON, S., *Canadian CLT Handbook*. Vydání 1. Pointe-Claire, QC: FPInnovations, 2019, 53-103. ISBN 978-0-86488-592-0

KHAN, S. (2017). Basic of cross laminated of tomber and optimal location for new CLT plant. Kokkola: Centria university of applied sciences. 2017, 30 s.

KIILTO Oy (2022). Technický list Kestokol WR 6040. 1 s. [online]. 01.06.2021 [cit. 2022.01.05]. Dostupné z: <https://pim.kiilto.com/kiilto-pim-api/api/pdf/download/1e9474eb-bee2-435b-855a-e6a0946b1deb>

KIILTO Oy (2022). Technický list Kestopur 1010. 1 s. [online]. 01.06.2021 [cit. 2022.01.05]. Dostupné z: <https://pim.kiilto.com/kiilto-pim-api/api/pdf/download/1e9474eb-bee2-435b-855a-e6a0946b1deb>

KOMAN, S., FEHER, S., ABRAHAM J., TASCHER, R. (2013). Effect of knots on the bending strenght and the modulus of elasticity of wood. *Wood research* 58 (4), 617 – 626. [cit. 2021.11.11] Dostupné z: <http://www.woodresearch.sk/wr/201304/11.pdf>

KOTLAREWSKI, N., MARADPOUR, P., LEE, M., NOLAN, G. (2019). Flexural performance of cross-laminated timber constructed from fibre-managed plantation eucalyptus. *Construction and Building Materials* 208 (1), 535 - 542 . [cit. 2021.11.25] DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.03.010](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.010).

KRÁSA, P. (2007). PICEA ABIES (L.) H. Karst. – smrk ztepilý / smrek obyčajný. *BOTANY* [online]. 15. 07. 2007 [cit. 2021.12.18]. Dostupné z: <https://botany.cz/cs/picea-abies/>

LAHR, F.A.R., CHRISTOFORO, A.L., CAMPOS, C.I., MORALES, E.A.M., BARBOSA, J.C., PANZERA, T.H. (2015). Evaluation of the Moisture Content in Stiffness Properties of Structural Glulam Beams. *Advanced Materials Research* 1088 (1), 676-679. [cit. 2021.10.15] DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.1088.676](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1088.676).

LI, M., LAM, F., LI, Y. (2018). Evaluating rolling shear strength properties of CLT by torsional shear tests and bending tests. *World Conference on Timber* [cit. 2021.11.05] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321551023_Evaluating_rolling_shear_strength_properties_of_CLT_by_torsional_shear_tests_and_bending_tests

LI, M., ZHANG, S., GONG, Y., TIAN, Z., REN, H., (2021). Gluing Techniques on Bond Performance and Mechanical Properties of Cross-Laminated Timber (CLT) Made from *Larix kaempferi*. *Polymers* 13 (5), 733- 743 [cit. 2022.01.20] DOI: [10.3390/polym13050733](https://doi.org/10.3390/polym13050733).

LU, Z., ZHOU, H., LIAO, Y., CHUANSHUANG, H. (2018). Effects of surface treatment and adhesives on bond performance and mechanical properties of cross-laminated

timber (CLT) made from small diameter Eucalyptus timber. *Construction and Building Materials* 161, 9-15 [cit. 2022.01.12] DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.11.027](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.027).

MOSES, D.M, PRION, H.G.L, BOEHNER, W. (2003). Composite behavior of laminated strand lumber. *Wood Science and Technology* 37 (1), 59-77. [cit. 2021.10.13] DOI: [10.1007/s00226-003-0169-5](https://doi.org/10.1007/s00226-003-0169-5).

MUÑOZ, F., TENORIO, C., MOYA, R., NAVARRO-MORA, A. (2019). CLT Fabricated with *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* Wood from Fast-Growth Forest Plantations: Physical and Mechanical Properties. *Journal of Renewable Materials* 10 (1), 1-17 [cit. 2022.01.12] DOI: [10.32604/jrm.2022.017392](https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017392).

MUÑOZ, F., TENORIO, C., MOYA, R., NAVARRO-MORA, A. (2022). CLT Fabricated with *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* Wood from Fast-Growth Forest Plantations: Physical and Mechanical Properties. *Journal of Renewable Materials* 10 (1), 1-17 [cit. 2022.01.12] DOI: [10.32604/jrm.2022.017392](https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017392).

O'CEALLAIGH, C., SIKORA, K., HARTE, A.M. (2018). The Influence of Panel Lay-Up on the Characteristic Bending and Rolling Shear Strength of CLT. *Buildings* 8 (9), 114 - 129. [cit. 2021.11.05] DOI: [10.3390/su12145612](https://doi.org/10.3390/su12145612).

OKUDA, S., CORPATAUX, L., MUTHUKRISHNAN, S., WEI, K.H. (2018). Cross-laminated timber with renewable, fast-growing tropical species in Southeast Asia. *World Conference on Timber Engineering* [cit. 2021.12.10]. Dostupné z: <https://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/155313>

OLSSON, L. (2020). Moisture safety in CLT construction without weather protection -Case studies, literature review and interviews. *E3S Web of Conferences* 172 (10001), [cit. 2021.10.17] DOI: [10.1051/e3sconf/202017210001](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017210001)

PAVLAS, M. (2016). *Dřevostavby z vrstvených masivních panelů*. 1. vyd., Praha: Grada. 2016, 96 s. ISBN 978-80-271-0055-2

POPOVSKI, M., GAGNON, S., MOHAMMAD, M., CHEN, Z., (2019). Chapter 3: Cross-laminated timber- Structural design of cross-laminated timber elements. In KARACABEYLI, E., GAGNON, S., *Canadian CLT Handbook*. Vydání 1. Pointe-Claire, QC: FPInnovations, 2019, 53-103. ISBN 978-0-86488-592-0

POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. (1993). *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd., Bratislava: Príroda. 1993, 486 s. ISBN 80-070-0600-1

RAHMAN, MD. T., ASHRAF, M., GHABRAIE, K., SUBHANI, M. (2020). Evaluating Timoshenko Method for Analyzing CLT under Out-of-Plane Loading. *Buildings* 10 (10). [cit. 2021.11.10] DOI: [10.3390/buildings10100184](https://doi.org/10.3390/buildings10100184).

ROCHA, M.F.V, COSTA, L.R, COSTA L.J., ARAÚJO A.C.C., SOARES B.CH.D. HEIN P.R.G. (2018). Wood Knots Influence the Modulus of Elasticity and Resistance to Compression. *Floresta e Ambiente* 25 (4), [cit. 2021.11.11] DOI: [10.1590/2179-8087.090617](https://doi.org/10.1590/2179-8087.090617)

SCHMIDT, E., RIGGIO, M., R. (2019). Monitoring Moisture Performance of Cross-Laminated Timber Building Elements during Construction 9 (6), 144-167. [cit. 2021.10.17] DOI: [10.3390/buildings9060144](https://doi.org/10.3390/buildings9060144)

SCHOENWALD, S., ZEITLER, B., SABOURIN, I., KING, F. (2013). Sound insulation performance of Cross Laminated Timber Building Systems. *international congress and exposition on noise control engineering*. [cit. 2021.10.20]. Dostupné z: <https://www.dora.lib4ri.ch/empa/islandora/object/empa%3A9417>

SIKORA, K., MCPOLIN, D.O., HARTE, A.M. (2018). Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear. *Construction and Building Materials* 116 (2), 141-150. [cit. 2021.11.05] DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.145).

STARK, M.N., CAI Z., (2021). Wood-Based Composite Materials: Panel Products, Glued Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood–Nonwood Composites. In ROSS, R. *Wood handbook—wood as an engineering material*. [online] Madison: Forest Products Laboratory, 2021 [cit. 2021.10.12]. Dostupné z: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/62200>

STEICO AG (2013). Steico LVL: Lepené vrstvené dřevo, *Steico: Stavební systémy z přírody* [online]. [cit. 2021.10.13]. Dostupné z: <https://web.steico.com/cz/stahnout/produkty-a-obecne-informace/>

ŠVAJLENKA, J., KOZLOVSKÁ, M., VRANAY, F., POŠIVÁKOVÁ, T., JÁMBOROVÁ, M. (2020). Comparison of Laboratory and Computational Models of Selected Thermal-Technical Properties of Constructions Systems Based on Wood. *Energies* 13 (12), 3127–3143. [cit. 2021.10.20] DOI: [10.3390/en13123127](https://doi.org/10.3390/en13123127).

TENORIO, C., MOYA, R., MUÑOZ, F. (2011). Comparative study on physical and mechanical properties of laminated veneer lumber and plywood panels made of wood from fast-growing *Gmelina arborea* trees. *Journal of Wood Science* 57 (1), 134-139. [cit. 2021.10.13] DOI: [10.1007/s10086-010-1149-7](https://doi.org/10.1007/s10086-010-1149-7).

THOMAS, R.E., BUEHLMANN, U. (2017). Using Low-Grade Hardwoods for CLT Production: A Yield Analysis. In MÖTTÖNEN, V., HEINONEN, E., (2017) *6th International Scientific Conference on Hardwood Processing: Proceedings*. Vydání 1. Latokartanonkaari: Natural Resources Institute Finland, 2017, 53-61. ISBN 9523265091

TURESSON, J., BERG, S., BJÖRNFOT, A., EKEVAD, M. (2020). Shear modulus analysis of cross-laminated timber using picture frame tests and finite element simulations. *Materials and Structures* 53 (4). [cit. 2021.11.08] DOI: [10.1617/s11527-020-01545-1](https://doi.org/10.1617/s11527-020-01545-1).

WOOD STORE (2021). WOOD STORE: truhlářské řezivo, palubky Praha Bořanovice [online]. [cit. 2022. 02. 24]. Dostupné z: <https://www.palubky-rezivo.eu/>

YANG, T.-H., WANG, S.-Y., LI, CH.-J., TSAI, M.-J. (2008). Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by

nondestructive techniques. *Construction and Building Materials* 22 (4), 487-493. [cit. 2021.10.15] DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2006.11.012](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.012).

YANG, T.-H., WANG, S.-Y., LI, CH.-J., TSAI, M.-J. (2008). Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by nondestructive techniques. *Construction and Building Materials* 22 (4), 487-493. [cit. 2021.10.15] DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2006.11.012](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.012).

YEH, B., KRETSCHMANN, D., WANG, B. (2013). Chapter 2: Cross-laminated timber- Introduction to cross-laminated timber. In KARACABEYLI, E., DOUGLAS, B., *Canadian CLT Handbook*. Vydání 1. USA: FPInnovations, 2013, 63-92. ISBN 978-0-86488-553-1

YUSOF, N.M., TAHIR, P.MD., LEE, S.H., KHAN, M.A., JAMES, R.M.S.,(2019) Mechanical and physical properties of Cross-Laminated Timber made from Acacia mangium wood as function of adhesive types. *Journal of Wood Science* 65 (1), [cit. 2021.12.16] DOI: [10.1186/s10086-019-1799-z](https://doi.org/10.1186/s10086-019-1799-z).

9 PŘÍLOHY

Seznam příloh

Příloha 1. Technický list lepidla Kestopur 1010

Příloha 2. Technický list Kestokol WR 6040

Příloha 3. Naměřené hodnoty síly u smrkových těles

Příloha 4. Naměřené hodnoty síly u březových těles

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 Kilito Cleaner. 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 ³
COLORS	Transparent, light after drying.
VISCOSITY	10000 mPas (Brookfield, RVT 20 °C)
OPEN TIME	max. 10 min (amount applied 180 g/m ² , wood moisture 15 %, temperature 20 °C, RH 50 %)
CLASSIFICATIONS AND	EN 15425 1 70 GP 0.3 AUS/NZ 4364:2010 type I
CONSUMPTION	140–180 g/m ² finger jointing 160–200 g/m ² face jointing
PRESSING TIME	From 30 min when face jointing
WORKING CONDITIONS	Temperature in the hall at least 15 °C (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.



Kestokol WR 6040



KIILTO INDUSTRIAL ADHESIVES



- Suitable for e.g. parquet manufacture
- Long pot life
- Well suited for high frequency press

AREA OF APPLICATION

Kestokol WR 6040 + Hardener M is an isocyanate emulsion polymer adhesive that has excellent resistance against climatic stress. Fulfils the requirements of EN 204/D4 water resistance durability class.

Kestokol WR 6040 + Hardener M can be used in applications that are exposed to harsh weather conditions such as garden furniture, boat gluing (not for parts below the water level) and specific glulam applications.

INSTRUCTIONS FOR USE

Add 15 weight parts of Hardener M into 100 weight parts of Kestokol WR 6040 adhesive and mix properly. If the pot-life is exceeded, the mixture starts to foam. New mixture can be added into an older mixture within the pot-life.

Check that the joints fit well. Apply adhesive one sided evenly. Assemble and press the parts together aiming at an even squeeze out for the whole length of the joint. Joints can be pressed in a cold, hot or high frequency press. Hot and high frequency presses shorten the required pressing time. 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.

Parts may need to be stored for a while before further machining to reach the necessary bond strength. The final strength and water resistance of the bond is reached within 7 days.

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 and methods will affect the product performance and result. The result is 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 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.

DENSITY/SPECIFIC WEIGHT	1.15 kg/dm
pH	6.5 - 8.0
COLORS	Light beige
MIXING RATIO	100 : 15
VISCOSITY	4000 mPas (Brookfield, RVT +20 °C)
MIXTURE VISCOSITY	11000 mPas (Brookfield RVT +20 °C) immediately after addition of hardener.
MIXTURE COLOUR	light beige
POT LIFE	The pot life of the mixture is max. 60 min (+20 °C)
OPEN TIME	11 - 24 min (consumption 150 - 250 g/m ²)
CONSUMPTION	150 - 250 g/m ²
PRESSING TIME	minimum 40 min
MINIMUM FILM FORMING	+5 °C
WOOD MOISTURE CONTENT	6-15 %
TEMPERATURE RESISTANCE	EN 14257 (Watt 91): 13.2 N/mm ²
STORAGE	In unopened containers, above +1 °C, for 6 months. After long storing, stir before use.

Příloha. 3 Naměřené hodnoty síly u smrkových těles

Pořadí	lepidlo	dřevina	číslo	F[N]
1	PUR	smrk	1	5572,60
2	PUR	smrk	2	6029,50
3	PUR	smrk	3	5927,05
4	PUR	smrk	4	3998,10
5	PUR	smrk	5	6075,35
6	PUR	smrk	6	5182,90
7	PUR	smrk	7	4782,65
8	PUR	smrk	8	4006,65
9	PUR	smrk	9	4387,55
10	PUR	smrk	10	5281,40
11	PUR	smrk	11	5672,55
12	PUR	smrk	12	5794,10
13	PUR	smrk	13	5365,40
14	PUR	smrk	14	6368,00
15	PUR	smrk	15	5942,95
16	PUR	smrk	16	5668,85
17	PUR	smrk	17	6447,40
18	PUR	smrk	18	6244,45
19	PUR	smrk	19	4968,00
20	PUR	smrk	20	5348,00
21	EPI	smrk	1	4899,65
22	EPI	smrk	2	4506,55
23	EPI	smrk	3	4958,60
24	EPI	smrk	4	5517,70
25	EPI	smrk	5	4266,00
26	EPI	smrk	6	4810,25
27	EPI	smrk	7	4997,00
28	EPI	smrk	8	5197,70
29	EPI	smrk	9	3998,95
30	EPI	smrk	10	5253,20
31	EPI	smrk	11	4630,95
32	EPI	smrk	12	4409,45
33	EPI	smrk	13	5496,05
34	EPI	smrk	14	5849,05
35	EPI	smrk	15	3786,60
36	EPI	smrk	16	4451,85
37	EPI	smrk	17	5354,85
38	EPI	smrk	18	3967,95
39	EPI	smrk	19	5685,90
40	EPI	smrk	20	5148,75

Příloha. 4 Naměřené hodnoty síly u březových těles

Pořadí	lepidlo	dřevina	číslo	F[N]
41	EPI	bříza	1	10652,55
42	EPI	bříza	2	13458,80
43	EPI	bříza	3	8784,85
44	EPI	bříza	4	12620,45
45	EPI	bříza	5	8426,45
46	EPI	bříza	6	9684,40
47	EPI	bříza	7	9988,15
48	EPI	bříza	8	11904,50
49	EPI	bříza	9	10316,05
50	EPI	bříza	10	12334,10
51	EPI	bříza	11	12377,65
52	EPI	bříza	12	10735,65
53	EPI	bříza	13	12355,70
54	EPI	bříza	14	11305,85
55	EPI	bříza	15	7096,75
56	EPI	bříza	16	13037,20
57	EPI	bříza	17	10892,50
58	EPI	bříza	18	11297,05
59	EPI	bříza	19	10679,60
60	EPI	bříza	20	6658,90
61	PUR	bříza	1	11303,30
62	PUR	bříza	2	14776,85
63	PUR	bříza	3	11871,20
64	PUR	bříza	4	11978,55
65	PUR	bříza	5	13558,75
66	PUR	bříza	6	13236,80
67	PUR	bříza	7	11874,65
68	PUR	bříza	8	11848,45
69	PUR	bříza	9	12854,20
70	PUR	bříza	10	12047,45
71	PUR	bříza	11	12226,50
72	PUR	bříza	12	12135,95
73	PUR	bříza	13	12387,30
74	PUR	bříza	14	13286,60
75	PUR	bříza	15	10926,10
76	PUR	bříza	16	14869,05
77	PUR	bříza	17	12797,25
78	PUR	bříza	18	12356,60
79	PUR	bříza	19	10780,65
80	PUR	bříza	20	13837,15