

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Vliv působení nízkých a vysokých teplot na ohybové charakteristiky
lepeného dřeva**

Diplomová práce

Autor: BcA. Doubravka Lesáková
Vedoucí práce: Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

2020

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

BcA. Doubravka Lesáková

Dřevařské inženýrství

Dřevařské inženýrství

Název práce

Vliv působení nízkých a vysokých teplot na ohybové charakteristiky lepeného dřeva

Název anglicky

Influence of low and high temperatures on flexural characteristics of glued wood

Cíle práce

Cílem práce je experimentální zkoumání fyzikálních a mechanických vlastností lepeného dřeva vystaveného střídání nízkých i vysokých teplot a následným porovnáním s dřevem bez teplotního zatížení, s důrazem na ohybové vlastnosti. Lepené dřevo bude vyrobeno z různých dřevin a více druhů lepidel určených pro konstrukční dřevěné prvky v exteriéru.

Metodika

1. Zpracování literární rešerše o fyzikálních a mechanických vlastnostech lepeného dřeva a jejich vztahu k působení nízkých a vysokých teplot, jako i změnách zapříčiněných střídavým působením nízkých a vysokých teplot. Analýza odolnosti lepidel pro dřevěné konstrukce vůči změnám teplot a vlhkosti.
2. Příprava, třídění a značení zkušebních těles.
3. Určení základních fyzikálních vlastností lepeného dřeva.
4. Experimentální zjišťování vlivu střídavého působení nízkých a vysokých teplot na ohybové charakteristiky lepeného dřeva vyrobeného z různých dřevin a lepidel. Porovnání vlastností teplotně zatěženého lepeného dřeva s vlastnostmi lepeného dřeva bez vlivu střídání teplot.
5. Statistické zpracování výsledků v textové, tabulkové a grafické podobě.
6. Diskuze a závěry.

Doporučený rozsah práce

70 – 80

Klíčová slova

nízké teploty, vysoké teploty, lepené dřevo, ohybová pevnost

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
- BODIG, J., JAYNE, B. A. Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company New York, Cincinnati, Toronto, London, Melbourne, 1982, 712 s.
- KOLLMANN, F. F. P., COTE, W. A. Jr. Principles of Wood Science and Technology: I. Solid Wood. Springer Science & Business Media, 2012, 592 s. ISBN: 978-3-64287-928-9
- NOVOTNÝ, J., TOBOLKA, Z. Stavební materiály : určeno pro stud. fak. stavební. Praha: ČVUT, 1991.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva, Bratislava: Príroda a. s., 1997, 485 s.
- ROWELL, R. M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. 2. vydání, Boca Raton: CRC Press, 2012, 703 s. ISBN: 978-1-43985-380-1
- SHIELDS, J. Adhesives Handbook. 3rd ed. rep., Butterworth & Co., 2013, 374 s. ISBN: 978-0-408-01356-7
- SMITH, I., LANDIS, E., GONG, M. Fracture and Fatigue in Wood. John Wiley & Sons Ltd., 2003, 234 s. ISBN: 978-0-471-48708-1
-

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 8. 5. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 19. 05. 2020

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Vliv působení nízkých a vysokých teplot na ohybové charakteristiky lepeného dřeva* vypracovala samostatně pod vedením Ing. Miroslava Gašparíka, PhD. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědoma, 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:

.....

Doubravka Lesáková

Poděkování

Touto formou bych ráda poděkovala svému vedoucímu Ing. Miroslavu Gašparíkovi, PhD. za ochotné jednání a odborné konzultace při psaní mé závěrečné práce. Dále bych ráda poděkovala všem, kteří mě podporovali ve mém studiu a v psaní závěrečné práce, především svým rodičům.

Abstrakt

V této diplomové práci je především zkoumán vliv nízkých ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$) a vysokých ($70\text{ }^{\circ}\text{C}$) teplot na fyzikální (vlhkost a hustota) a mechanické (ohybová pevnost, modul pružnosti) vlastnosti u smrkového a modřínového dřeva, které je lepeno PUR a EPI lepidlem. Dřevo bylo namáháno třibodovým statickým ohybem v tangenciálním směru. U dřeva se v průběhu teplotního zatěžování mrazením nepatrně zvýšila vlhkost a hustota a po ohřevu obě veličiny naopak rapidně poklesly. Ze zjištěných hodnot se teplotním zatěžováním zvýšily průměrné hodnoty mechanických vlastností o 14,5 % při zatížení $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ u smrku a 10 % u modřínu. Pro teplotní zatížení $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ byl nárůst mechanických vlastností 14 % u smrku a 9 % u modřínu. Z použitého lepidla se ukázala jako lepší varianta PUR lepidlo. EPI lepidlo mělo srovnatelné hodnoty v kombinaci s modřínovým dřevem. Ze dvou zkoušených dřevin vyšlo lépe dřevo modřínu.

Klíčová slova:

Nízké teploty, vysoké teploty, lepené dřevo, ohybová pevnost.

Abstract

In this diploma thesis is researched the impact of low (-15 °C and -25 °C) and high (70 °C) temperature on physical (humidity and density) and mechanical (MOE and MOR) qualities on spruce and larch wood, which are glued by PUR and EPI adhesives. The wood are strained by three-point bending strenght in tangential direction. The wood humidity and density increased slightly after freezing and dropped quickly after heating. The average values of mechanical qualities increased by 14,5 % under thermal load -15 °C and 70 °C for spruce and by 10 % for larch. For thermal load – 25 °C and 70 °C increased the mechanical qualities by 14 % for spruce and by 9 % for larch. From the used adhesives turned out better the PUR glue. The EPI glue had comparable values in combination with larch wood. From both type of wood turned out better the larch.

Key words:

Low temperature, high temperature, glued wood, modulus of rupture.

Obsah

Úvod	12
1 Cíl práce	13
2 Teoretický rozbor	14
2.1 Dřevo	14
2.1.1 Řezy a směry	16
2.1.2 Vady dřeva	18
2.1.3 Makroskopická struktura	19
2.1.4 Mikroskopická struktura	20
2.1.4.1 Jehličnaté dřeviny	20
2.1.4.2 Listnaté dřeviny	21
2.1.5 Chemické vlastnosti	22
2.1.6 Fyzikální vlastnosti	22
2.1.6.1 Hustota dřeva	22
2.1.6.2 Vlhkost dřeva	23
2.1.6.3 Vliv teplot na dřevo	25
2.1.7 Mechanické vlastnosti	26
2.1.8 Dřeviny použité při experimentální části	28
2.1.8.1 Smrk ztepilý	28
2.1.8.2 Modřín opadavý	29
2.1.9 Masivní dřevo	30
2.2 Lepené dřevo	31
2.2.1 Lepidla - teorie	34
2.2.1.1 Rozdělení lepidel	34
2.2.1.2 Složky lepidel	35
2.2.1.3 Aplikace lepidel na dřevo	36
2.2.1.4 Teorie lepení	36
2.2.1.5 Lepené spoje	37
2.2.1.6 Vliv vlastností dřeva na pevnost lepení	38
2.2.2 Lepidla používaná při lepení konstrukčních materiálů	38
2.2.3 Lepidla použité při experimentální části	41
2.2.3.1 Polyuretanové lepidlo (Kestopur 1030)	41
2.2.3.2 Emulzní polymer izokyanátové lepidlo (Kestokol WR 11)	42

2.2.4	Konstrukční dřevo.....	43
2.2.4.1	Lepené lamelové dřevo (BSH, Glulam).....	43
2.2.4.2	CLT	46
2.2.4.3	KVH.....	46
2.2.4.4	DUO a TRIO hranoly	47
2.2.5	Kompozitní materiály na bázi dřeva a pro nosné účely	47
2.2.5.1	Vrstvené dřevo LVL	47
2.2.5.2	Parallam PSL.....	48
2.2.5.3	LSL - Intrallam.....	49
3	Metodika	51
3.1	Příprava zkušebních těles	51
3.2	Zatěžování teplotou zkušebních těles	61
3.3	Zkouška v statickém ohybu	63
3.4	Vyhodnocení získaných dat.....	64
4	Výsledky a diskuze	67
4.1	Fyzikální vlastnosti.....	67
4.1.1	Vlhkost.....	67
4.1.2	Hustota	68
4.2	Mechanické vlastnosti	69
4.2.1	Ohybová pevnost	70
4.2.2	Modul pružnosti	75
5	Závěr.....	79
	Seznam použité literatury	81
	Přílohy.....	86

Seznam obrázků

Obr. 1: Řezy ve dřevě	17
Obr. 2: Druhy suků	18
Obr. 3: Výřez buněčné stěny a řez ztenčeninou.....	20
Obr. 4: Druhy mechanického namáhání	27
Obr. 5: Mikroskopická stavba smrkového dřeva	29
Obr. 6: Příčný řez dřevem modřínu opadavého, 600x zvětšeno, vlevo jarní tracheidy a vpravo letní tracheidy	29
Obr. 7: Rozdělení nosných lepených dřevěných výrobků podle ČSN EN 14080 ..	33
Obr. 8: Strojová nanášedka	36
Obr. 9: Základní druhy porušení lepeného spoje	37
Obr. 10: Schéma výrobního procesu LLD	45
Obr. 11: Obloukový a rovný nosník BSH.....	45
Obr. 12: KVH hranol nastavený zubovitým spojem.....	47
Obr. 13: Výroba lepeného vrstveného dřeva	48
Obr. 14: Parallam a jeho použití na nosník.....	48
Obr. 15: Schéma výroby PSL	49
Obr. 16: LSL a jeho použití na nosník.....	50
Obr. 17: Zkušební těleso s jmenovitými rozměry.....	52
Obr. 18: Formátovací kotoučová pila SCM SI 400 EP CLASS	53
Obr. 19: Tloušťkovací frézka SCM S 630 CLASS.....	53
Obr. 20: Lamely připravené pro lepení.....	54
Obr. 21: Dýchovací víceetážový lis SCM GS 6/90	55
Obr. 22: Vzorok po rozevření lisu	55
Obr. 23: Řezačka na dýhy MAYER FH2	56
Obr. 24: Zkušební tělesa	57
Obr. 25: Postupné přířezy	57
Obr. 26: Postupné dělení fošny na jednotlivé přířezy.....	58
Obr. 27: Označení 3 kusů zkušebních těles z 1 kusu hranolku.....	58
Obr. 28: Všechna popsaná zkušební tělesa připravena ke klimatizování	59
Obr. 29: Klimatizační komora	60
Obr. 30: Laboratorní váhy od firmy KERN.....	60
Obr. 31: Digitální posuvné měřítko od firmy KINEX.....	61
Obr. 32: Laboratorní mrazicí box LIEBHERR LGT 3725	62
Obr. 33: Laboratorní sušárna Binder Solid.Line, série ED-S 115	62
Obr. 34: Zkušební stroj TIRA test 2850 S E5.....	63
Obr. 35: Modřínové zkušební těleso zatížené statickým tříbodovým ohybem.....	64
Obr. 36: Zatěžovací křivka v oblasti pružné deformace podle ČSN EN 310.....	65

Seznam tabulek a grafů

Tab. 1: Specifické hodnoty pro jehličnaté a listnaté dřevo v surovém stavu a při vlhkosti 12 % podle Rowella	28
Tab. 2: Hodnoty meze pevnosti v radiálním ohybu dle Ugoleva	30
Tab. 3: Tabulka porovnání masivního dřeva a materiálů na bázi dřeva v modulu pružnosti a ohybová pevnost v statickém tříbodovém ohybu.....	30
Tab. 4: Fyzikální stav lepidla Kestopur 1030 při 20 °C	42
Tab. 5: Fyzikální stav lepidla Kestokol WR 11 při 20 °C	43
Tab. 6: Porovnání konstrukčních materiálů podle Slonka	50
Tab. 6: Minimální požadované množství smrkových zkušebních těles	52
Tab. 7: Minimální požadované množství modřínových zkušebních těles.....	52
Tab. 8: Průměrné hodnoty vlhkosti a hustoty zkušebních těles.....	68
Tab. 9: Statistické vyhodnocení ohybové pevnosti f_m	70
Tab. 10: Statistické vyhodnocení modulu pružnosti E_m	70
Tab. 11: Průměrné hodnoty ohybové pevnosti pro smrkové a modřínové dřevo..	74
Tab. 12: Průměrné hodnoty modulu pružnosti pro smrkové a modřínové dřevo ..	78
Graf 1: Závislost ohybové pevnosti na druhu dřeviny	71
Graf 2: Závislost ohybové pevnosti na teplotním zatížení	72
Graf 3: Závislost ohybové pevnosti na typu lepidla	73
Graf 4: Závislost ohybové pevnosti na současném působení všech faktorů.....	74
Graf 5: Závislost modulu pružnosti na druhu dřeviny	75
Graf 6: Závislost modulu pružnosti na teplotním zatížení.....	76
Graf 7: Závislost modulu pružnosti na typu lepidla	77
Graf 8: Závislost modulu pružnosti na současném působení všech faktorů.....	77

Úvod

Dřevo je dlouhodobě využívanou surovinou používanou v mnoha různých výrobcích. Můžeme jej použít pro výrobu nejmenších ručních nástrojů nebo doplňků. Používá se pro konstrukce nábytku, stavebně-truhlářské výrobky, stavební nosné konstrukce nebo menší exteriérové stavby. Také je hlavní složkou materiálů na bázi dřeva jako jsou aglomerované materiály (dřevotřískové desky, dřevovláknité desky, dřevoplasty atd.), papír, buničina aj.

Při výrobě dřevěných výrobků se používá mechanických a lepených spojů. Lepené spoje mají výhodu ve své čistotě a možnosti dalšího opracovávání. Díky lepeným spojům se také můžeme zbavit vad ve dřevě, a tak u dřeva lepením zlepšit jeho vlastnosti.

Vlastnosti lepených spojů se však kvůli anizotropnosti dřeva mohou měnit a ovlivňuje je mnoho faktorů. Mezi ně se zařazuje použité lepidlo, druh dřeviny, hustota, vlhkost a teplota lepeného prvku i okolí atd.

V dnešní době se výrobci snaží zmenšit emise formaldehydu u lepidel používaných pro výrobu. Některé firmy se tak snaží dodržovat nejen státní normované limity, ale mají nastaveny interní limity pro obsah formaldehydu. Mimo to někteří výrobci zařazují do výroby lepidla bez formaldehydu. Mezi tyto lepidla lze zařadit polyuretanová lepidla, izokyanáty, resorcinolfenolové, přírodní klihy atd.

V této práci se řeší mechanická pevnost v ohybu pro lepené dřevo. To lze považovat za jeden z typických moderních dřevěných materiálů ve stavebnictví. U těchto materiálů se zpravidla používají EPI a PUR lepidla, které mají nulový obsah volného formaldehydu. Zároveň tyto lepidla dosahují veliké odolnosti proti vlhkosti, což je u stavebních prvků velice důležitá vlastnost.

V průběhu životnosti stavebních konstrukcí jsou prvky vystaveny i rozdílným teplotám, což způsobují klimatické podmínky jako střídání teplejších a chladnějších ročních období. Při těchto teplotních změnách se mění i mechanická odolnost dřeva. V této části je řešeno o kolik se mění pevnost v ohybu lepeného lamelovaného dřeva při jeho zmrazení na -15 °C a -25 °C s následným ohřevem na 70 °C .

1 Cíl práce

Diplomová práce si klade za cíl experimentální zkoumání fyzikálních a mechanických vlastností lepeného dřeva vystaveného střídání vysokých i nízkých teplot a následným porovnáním s dřevem bez teplotního zatížení, s důrazem na ohybové vlastnosti. Pro potřeby měření je použito různých dřevin kombinovaných se dvěma druhy lepidel. Použité základní materiály jsou v praxi běžně využívány k lepení dřevěných konstrukčních prvků. V této experimentální práci je zahrnuto vliv faktorů zjišťování vlastností:

- druhy dřevin: smrk a modřín,
- typy lepidel: PUR a EPI,
- teplotní zatížení: referenční (20 °C), -15 °C a 70 °C, -25 °C a 70 °C,
- ohybových vlastností: ohybová pevnost, modul pružnosti v ohybu.

2 Teoretický rozbor

Mezi poměrně mladé odvětví výzkumu lze považovat oblast moderních dřevařských technologií zaměřených na lepené a aglomerované dřevo. Toto období lze pozorovat přibližně od druhé poloviny dvacátého století. Výzkum moderních dřevařských materiálů vytváří základ pro nová průmyslová odvětví pro výrobu materiálu na způsob překližek, dřevotřískových a dřevovláknitých desek, nebo masivních lepených lamelovaných materiálů. Pro výzkum v tomto oboru je nutné kombinovat znalosti v oblasti anatomii dřeva, fyziky, chemie, biologie a mechanické technologie. Díky tomuto bylo dosaženo značného pokroku v oblasti obrábění dřeva, jeho vnitřní úpravě (tepelné, chemické a mechanické úpravy), a jeho další lepení a spojování do nových materiálů (Kollmann 1968).

Zvláště za zajímavé materiály lze považovat produkty křížově laminované dřevo, glulam a LVL z listnatého dřeva, blokové lepené prvky, betonové a cementové kompozity se dřevem, nebo další lehké konstrukce často používaných v konstrukcích podlah mostů a fasád.

V oblasti spojovacích technologií je v období těchto moderních dřevařských technologií zaznamenán značný pokrok v lepených i mechanických spojih. Například samořezné vruty vytvořily předpoklad pro spolehlivé, silné a tvárné spoje, nenáročné na provedení. U lepidel, základu pro spojování moderních dřevařských materiálu, je třeba zmínit značné možnosti řešení pro konkrétní určení. To je přímo propojeno se značným rozvojem chemického průmyslu. Nejvíce využívané skupiny lepidel v dřevařském průmyslu jsou melamin-močovínové a fenolicko-resorcinolfenolové pryskyřice, jednosložkové polyuretany, emulzní izokyanátové polymery a epoxidy (Aicher a kol. 2014)

2.1 Dřevo

Dřevo lze označit za materiál organického původu, rostoucí přirozeně v přírodě. Dřevo se dále charakterizuje anizotropními vlastnostmi a svou nehomogenitou. Tvorba dřeva je obecně podmíněna působením ovzduší a půdy v jednotlivých částech stromu, tedy kmeni, kořenech a větvích. Soubor rostlinných pletiv, převážně zdřevnatělých, je všeobecnou složkou tvořící dřevní hmotu. Tato surovina je zcela neomezeným zdrojem hodnotného materiálu pro další výrobu s rozličným určením, prakticky napříč všemi průmyslovými odvětvími. Dostupnost této suroviny je tedy omezena především lidskými dovednostmi a znalostmi. Dřevo je dostupné ze dvou hlavních skupin rostlin, a to listnatých a jehličnatých dřevin, které jsou krytosemenné a nahosemenné. Další nenahraditelnou vlastností dřeva je jeho variabilita barev, kresba a přirozeně přírodní vzhled (Koželuh 1998; Gandelová a kol. 2002; Šlezingerová a Gandelová 2005; Werner a Zimmer 2009).

Výše jsou zmíněné vlastnosti dřeva, které lze nazvat vizuální originalitou a dobrou schopností přirozené obnovy. Dřevo však také nabízí skvělé tepelně izolační vlastnosti, minimální tepelnou roztažnost a elektrickou vodivost. Specifické akustické vlastnosti předurčují mnoho dřevin pro využití v tvorbě hudebních nástrojů. Dále také můžeme ve dřevě najít relativně dobrou chemickou odolnost, skvělé možnosti opracování, a možnosti dřevo spojovat mnoha různými spojovacími prostředky, ať už kovovými, nebo chemickými v podobě různých lepidel (Horáček 2008).

Díky možnostem dřeva snadného obnovení a ekologické likvidace se mezi lidmi v poslední době stává oblíbeným z pohledu ekologie, což lze pozorovat na nárůstu využití moderních materiálů tvořených ze dřeva ve stavebnictví. Naopak nevýhodu dřeva lze pozorovat v jeho hygrokopických vlastnostech. Neustálá možnost příjmů a odevzdávání vlhkosti ovlivňuje mechanické vlastnosti. V rozpětí hodnot vlhkosti 0 % až mez nasycení vláken je u dřeva pozorovatelné zhoršení mechanických vlastností s nárůstem vlhkosti. Zároveň v tomto rozpětí dochází k značným objemovým a tvarovým změnám. Dřevo přirozeně mění svou vlhkost v závislosti na vnější vlhkosti a teplotě vzduchu.

Další vlastností, kterou lze pozorovat u dřeva je jeho anizotropnost. Dřevo má tedy rozličné vlastnosti ve všech svých základních směrech.

Značnou nevýhodou dřeva lze pozorovat ve značné hořlavosti. Ta se v praxi omezuje různými chemickými látkami, případně konstrukčním řešením. U dřeva je tak důležité počítat s jeho celkovou nehomogenitou. Dřevo se vyvíjí průběžně v období moha

let a jeho přírůstek, a tak i kvalita je ovlivněna růstovými podmínkami, které se díky různým klimatickým podmínkám v čase neustále mění (Horáček 2008).

Nevýhody dřeva se v mnoha směrech dají eliminovat vhodně zvolenou úpravou. Mezi to lze řadit například termickou, popřípadě chemickou úpravu. Dále lze využít možnosti impregnace, či povrchové úpravy. Konstrukční řešení lze považovat za jedny z nejstarších možností eliminace přirozených nevýhod dřeva a často jsou i základem pro plánování kvalitních dřevěných konstrukcí. Prodloužení životnosti dřevěných konstrukcí je rovněž zajištěno vhodnou údržbou.

U dřeva získáváme značnou pevnost a pružnost a zároveň nízkou hmotnost na rozdíl od většiny jiných materiálů, které by jej mohli v některých směrech nahradit. Nízká hustota a snadnost opracování konstrukčních prvků ze dřeva nabízí snadnější výrobu a usazení na místech určení. Variabilita spojovacích elementů pro dřevo vnáší značnou originalitu v dřevěných konstrukcích (Čunderlík 2009).

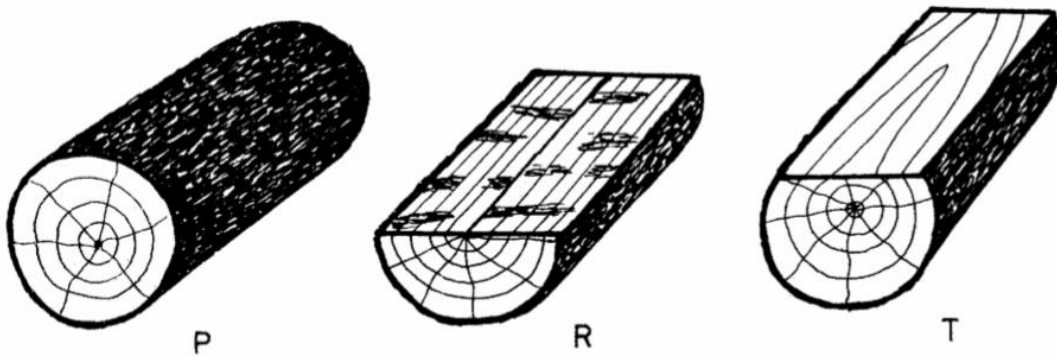
2.1.1 Řezy a směry

Zohledňování směru řezů ve dřevě je s ohledem na skutečnost, že dřevo je tvořeno rozměrově, funkčně i druhově různorodými elementy hodně důležité. Tyto elementy svým tvarem a uložením vůči podélné ose kmene ovlivňují odolnost dřeva v mechanickém namáhání (Balabán 1955).

Různé dřeviny mají dřevo tvořené rostlinnými pletivami mající různé tvary a funkce. Uspořádání pletiv ve dřevě je ovlivněno životními procesy, které se přirozeně odehrávají v rostoucím dřevině. Jejich uspořádání a morfologie přirozeně vytváří makroskopické znaky, volně pozorovatelné na ploše dřeva pouhým okem. Díky těmto poznávacím znakům, které můžeme na každém z řezu pozorovat rozdílně, lze odhadnout lepší způsob opracování s ohledem na kvalitu opracovaného povrchu. Z těchto znaků lze odvodit základní mechanicko-fyzikální vlastnosti daného dřeva. Při podélném dělení kmenového výřezu řezáním pod různými úhly vůči podélné ose kmene jsou vytvořeny řezné plochy s rozdílnými makroskopickými znaky. Soubor znaků objevující se na rovině řezu se nazývá kresba dřeva neboli textura.

Dřevem lze vést tři základní řezy (Obr. 1). Ty s ohledem na základní osu kmene a tím i jednotlivých elementů vytváří rozdílné kresby dřeva. Tyto základní řezy běžně nazýváme:

- 1) příčný řez (P),
- 2) podélně radiální řez (R),
- 3) podélně tangenciální řez (T).



Obr. 1: Řezy ve dřevě (Čunderlík 2009)

Příčný řez je zpravidla veden jako první, při zpracovávání dřeva. Jedná se o zakracovací řez. Jeho směr je kolmý na podélnou osu kmene. Na jeho řezané ploše se vyznačuje letokruhy – ročními přírůstky do šířky. Tyto nepravidelné kruhy jsou soustředěny okolo biologického středu kmene – dřeně. U jehličnatých a kruhovitě pórovitých dřev jsou jednotlivé letokruhy dobře znatelné. Zvláště u kruhovitě pórovitých dřev, kdy jarní letokruhy jsou tvořeny makro póry, zatímco letní dřevo je tvořeno menšími a hustšími mikro póry. U roztroušeně pórovitých dřevin jsou přechody mezi jednotlivými letokruhy hůře znatelné, až téměř neznatelné, jako například u dřeva břízy (Požgaj a kol. 1997; Čunderlík 2009).

Podélné řezy jsou orientovány rovnoběžně s podélnou osou kmene. Je-li podélný řez kmene veden středem kmene, jedná se o radiální řez. V případě, že podélný řez je veden mimo podélnou osu kmene, nazýváme tento řez jako tangenciální. Radiální řez se na ploše řezu projevuje především letokruhy znázorněnými jako přímky orientované podélným směrem. Opět u některých dřevin je přechod mezi těmito pruhy letokruhů výraznější než u jiných. Největší rozdílnost můžeme pozorovat u jehličnatých dřevin. U kruhovitě pórovitých dřevin se pruhy jarních letokruhů projevují výrazným rýhováním. U listnatých dřevin může dále dobře pozorovat zrcátka – lesklé plošky barevně odlišné od okolního dřeva. Jedná se o dřeňové paprsky (Šlezingerová a Gandelová 2005; Čunderlík 2009).

Tangenciální řez, vedený jako tečnicový vůči letokruhům, se projevuje výraznou kresbou, nazývanou také fládr neboli boční řez. Přirozeně kuželovitý růst stromů způsobuje nepatrný odklon ročních přírůstků od podélné osy kmene, který je patrný právě na tomto řezu svou parabolickou kresbou. Například u dřeva buku je na tomto řezu dobře pozorovatelné uložení dřeňových paprsků, což se projevuje různě dlouhými linkami v podélném směru (Požgaj a kol. 1997; Čunderlík 2009).

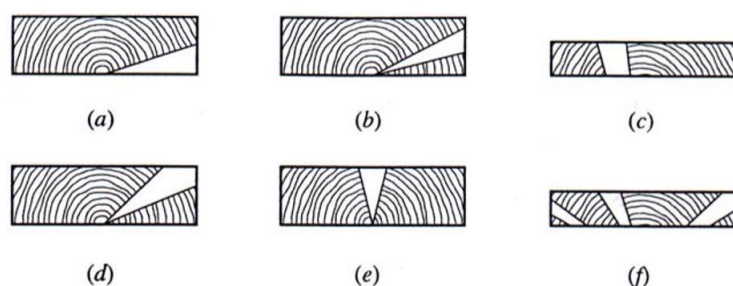
2.1.2 Vady dřeva

Vady dřeva lze definovat jako nepravidelnosti struktury dřeva a tvaru kmenu. Tyto vady znatelně snižují použití dřeva ať už z estetického hlediska, nebo mechanického.

V některých případech lze najít vady dřeva, které mohou lépe zhodnotit dřevo. Nejčastěji je to z pohledu estetického využití například u tvorby okrasných dýh. Chyby dřeva lze rozdělit do několika skupin z pohledu jejich vzniku:

- Růstové chyby – vznikající v průběhu růstu stromu,
- Manipulační chyby – vznikající v průběhu těžby, přepravy a sušení dřeva.

Růstové chyby jsou často způsobené genetikou. Typicky u dřeva šeríku dochází přirozeně k točitosti kmene. Dalšími růstovými vadami se míní křivost, sukatost (Obr. 2), trhliny, rozdvojení kmene, nebo sbíhavost. Případně se může jednat i o reakci na abiotické činitele (vítr, mráz, sníh...) a biotické činitele (dřevokazný hmyz, nebo houby).



Obr. 2: Druhy suků (Augustin a kol. 2008)

(a – křídlový suk, b – boční suk, c – procházející suk, d – hranový suk, e – plošný suk, f – skupinový suk).

Manipulační chyby lze do značné míry eliminovat správným technologickým postupem. Z toho důvodu je důležité se zaměřit na růstové vady, kterými se lze vypořádat mnohem hůře. Jako jedním ze způsobů eliminace růstových vad může být například lepené lamelované dřevo, nebo KVH hranoly (Požgaj 1997; Čunderlík 2009).

2.1.3 Makroskopická struktura

Sledování makroskopických znaků dřeva i pouhým okem nám jasně napoví, že dřevo je mezi sebou hodně rozdílné jak mezi skupinami jehličnatých a listnatých dřevin, tak i v rámci jedné konkrétní dřeviny. To můžeme snadno pozorovat například v rámci bělového a jádrového dřeva, nebo jarních a letních letokruhů, či reakčního dřeva. V tomto se odráží samotný růst a vývoj dřevěných elementů slučujících se do dřevního pletiva (Aicher a kol. 2014).

I přes možnost rozeznání makroskopických znaků dřeva okem, je doporučeno používat lupu, která zpravidla nabízí zvětšení 3krát až 5krát u pozorovaného objektu.

K základním makroskopickým znakům lze řadit:

- 1) Letokruh – jedná se o přírůstek dřeva do šířky. Kružnice jsou soustředěné okolo biologického středu kmene – dřeně. Přerušování růstu je způsobeno klimatickými podmínkami, kdy strom upadá do vegetačního klidu. Rozdílnost jednotlivých letokruhů je dána jejich dělením na jarní a letní. Podle období se vytvářejí ve dřevě různé elementy v různém poměru zastoupení.
- 2) Běl, jádro, zralé dřevo – v průběhu životnosti stromu se živé buňky postupně přeměňují a ztrácí svojí růstovou schopnost. Dřevo tak získává většinou lepší mechanické vlastnosti. U některých dřevin dochází k proměně z bělového dřeva na jádrové, nebo zralé dřevo. U jádrového dřeva většinou dochází ke značné změně barvy.
- 3) Dřeňové paprsky
- 4) Dřeňové skvrny – tento znak je tvořen parenchymatickými buňkami; řídké pletivo
- 5) Prskyřičné kanálky
- 6) Cévy – na příčném řezu se projevují jako póry. Hlavní funkce je vodivá v bělové části.

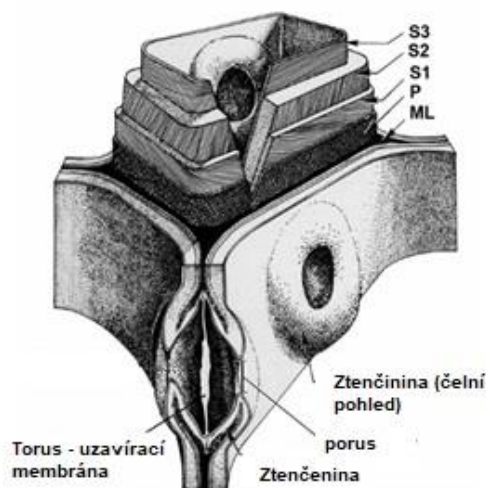
Jak uvádí autoři Požgaj a kol. (1997), Gandelová a Šlezingerová (2007), Čunderlík (2009) další rozeznávací znaky (optické, technologické atd.) dřeva, které lze využít k určování:

- 1) Barva
- 2) Tvrdost
- 3) Hustota
- 4) Lesk

2.1.4 Mikroskopická struktura

Rozdílnost typů, proporcí, orientací, skupinových uspořádání a velikostí celkově udává hlavní rozdíly mezi jednotlivými dřevinami. Tyto mikroskopické rozdíly ve stavbě určují mechanické vlastnosti, a tedy i určení dřeviny v praxi.

Na obrázku 3 můžeme pozorovat výřez buněčné stěny včetně jemných strukturálních detailů. Mezi jednotlivé části patří střední lamela značena ML, primární stěna značena P a sekundární stěna, která je dále dělena na jednotlivé vrstvy S1, S2, S3. Na jednotlivých stěnách sekundární vrstvy je dobře patrný odklon mikrofibril od podélné osy stejně jako samotná tloušťka stěn. Ve spodní části obrázku lze pozorovat ztenčeninu v řezu i čelním pohledu, která slouží k vedení živin mezi jednotlivými buňkami (Wiedenhoeften a kol. 2010).



Obr. 3: Výřez buněčné stěny a řez ztenčeninou (Rowell 2013)

2.1.4.1 Jehličnaté dřeviny

Jehličnaté dřeviny se vyznačují poměrně jednoduchou strukturou. Axiální tracheidy vytváří vertikální a axiální systém. Naopak horizontální systém je tvořen paprskovitými parenchymatickými buňkami.

Tracheidy

Tyto buňky jsou relativně dlouhé, a to až 100krát ve srovnání se svým průměrem (délka v rozmezí 1 až 10 mm). Tvoří až 90 % objemu jehličnatého dřeva. Jejich funkce je převážně vodivá a mechanická. Na příčném řezu lze tracheidy pozorovat jako nepravidelné čtvercové útvary shlukované v řadách. Středem těchto tracheid protéká voda, jelikož se tracheidy v délce mezi sebou překrývají o 20 až 30 %, je možné skrze

ztenčeniny v těchto překrytích nechat protékat vodu, která je takto vedena v celé délce stromu. Ve srovnání s vodivými buňkami listnatého dřeva jsou tracheidy poměrně neefektivní ve vedení vody. To je způsobeno malým průměrem lumenu a těžko prostupnými ztenčeninami propojující jednotlivé tracheidy (Zimmermann 1983).

Axiální parenchym a pryskyřičné kanálky

Velikostí a tvarem lze buňky axiálního parenchymu přirovnat k parenchymatickým buňkám. Jsou však podélně orientovány a uloženy na sobě tak, aby vytvářeli řetězce parenchymu. V radiálním nebo tangenciálním řezu můžeme tyto řetězce pozorovat jako delší řetězce barevně odlišené tmavší barvou oproti svému okolí. Axiální parenchym nejvíce pozorujeme u sekvojí a jalovce. Naopak se téměř vůbec nevyskytuje u dřeva borovice, smrku, nebo modřínu.

U dřeva borovice, modřínu, nebo smrku se vyskytují pryskyřičné kanálky. Tyto elementy jsou dutinami ve dřevě a obsahují pryskyřici. Ta funguje jako přirozená impregnační látka. Většina druhů jehličnatých dřev neobsahuje pryskyřici. U dřeva borovice a modřínu jsou tyto pryskyřičné kanálky často vidět i okem (Wiedenhoeften a kol. 2010).

Paprsky

Tyto elementy mají vodivou funkci v příčném směru. Jejich výška se většinou pohybuje v hodnotách okolo 15 μm , šířka 10 μm a délka v rozpětí 150 až 250 μm v radiálním směru. Na příčném řezu se projevují jako tenké čárky směřující od středu do obvodu kmenu. V radiálním pohledu vypadají dřeňové paprsky jako cihlová zeď. V protnutí dřeňového paprsku s axiálními tracheidami se vytváří prohlubně, nazývané také křížové pole, které mohou vést vodu. (Gasson a kol. 2004).

2.1.4.2 Listnaté dřeviny

Srovnáním dřeva listnatých dřevin s dřevem jehličnatých dřevin můžeme pozorovat jednoznačně složitější a hustší strukturu. V podélném směru je dřevo tvořeno především cévními prvky, různých vláknitých elementů a axiálním parenchymem v různých tvarech a hustotě seskupení. Radiální prvky ve dřevě jsou především paprsky z parenchymu, avšak ve srovnání s jehličnatými dřevy jsou většinou zřetelně hustší a větší. (Liptáková a Sedláčik 1989; Wiedenhoeften a kol. 2010).

2.1.5 Chemické vlastnosti

Z pohledů chemického složení lze říct, že na základní úrovni dřevo různých dřevin je téměř stejné. Skládá se většinou z 49 % uhlíku, 44 % kyslíku a 6 % vodíku. Zastoupení dusíku a popeloviny je v řádě desetin procenta (Shmulsky a Jones 2011).

Hlavní části organických sloučenin, tvořící dřevo, jsou lignin, hemicelulóza a celulóza. Tyto látky společně tvoří přibližně 90–97 % hmotnosti absolutně suchého dřeva.

Z těchto látek je nejvíce zastoupená celulóza (cca 50 %). Tuto látku člověk už od pradávna dokáže ze dřeva izolovat. Díky tomu si látka našla poměrně hojné využití v potřebách člověka (papír, vata, dynamit atd.). Celulózu lze v přírodě získat i v čistém stavu prostřednictvím bavlníků.

Druhé největší zastoupení najdeme u hemicelulózy, které je ve dřevě průměrně 25 % hmotnosti absolutně suchého dřeva. Jedná se o pěti až šesti uhlíkaté řetězce sacharidů.

Třetí základní složka, lignin, ve dřevě zaujímá znatelně proměnlivou část. Její zastoupení se odvíjí jak od druhu dřeviny, tak vývojem dřeva (jádrové, bělové dřevo...). Lignin je silně aromatická látka, hnědé barvy. Jejich zahrátím se stává dřevo plastickým.

Další doprovodné látky jsou tvořené sacharidy, monomery, nízkomolekulárními polymery a anorganickými látkami (Požgaj a kol. 1997; Fengel 2003; Čunderlík 2009; Rowell 2013).

2.1.6 Fyzikální vlastnosti

Jako dodatečné charakterní znaky dřeva lze brát například i barvu, lesk, tvrdost, nebo hustotu dřeva (Čunderlík 2009).

S ohledem na zaměření této práce je důležitá především hustota dřeva a vlhkost dřeva.

2.1.6.1 Hustota dřeva

Hustotu lze považovat za nejdůležitější fyzikální vlastnost. Většina dalších, zvláště mechanických vlastností přímo koreluje s objemovou hustotou dřeva a lze tak do jisté míry předvídat mechanickou odolnost na základě objemové hmotnosti (Hoadley 2000).

Při měření hustoty dřeva je velice důležité zohledňovat i jeho vlhkost. Obvyklé se hodnota hustoty udává, při konkrétní vlhkosti, pro kterou platí. V praxi se nejvíce

setkáváme s hustotou dřeva při vlhkosti 12 %. Což je přibližně vlhkost dřeva při pokojových podmínkách. Pro odborné výpočty je však více udávaná objemová hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu, tedy při vlhkosti 0 %. Pro vyjádření hustoty se využívají jednotky kg/m^3 , nebo g/cm^3 a vypočítá se následujícím vzorcem:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (1)$$

kde

ρ – symbol pro hustotu, dolním indexem se může upřesnit hodnota vlhkosti pro kterou platí konkrétní hustota [kg/m^3],

m – hmotnost měřeného zkušebního tělesa o dané vlhkosti [kg],

V – objem měřeného zkušebního tělesa při dané vlhkosti [m^3].

Hustota dřevní substance se pohybuje okolo 1530 kg/m^3 . Dřevní substancí je označována hmota buněčných stěn bez dutin, lumenů a mezibuněčných prostor. Je vyjádřena pomocí poměru hmotnosti dřevní substance a objemu, kterou hmotnost zaujímá (Horáček 2008).

Ve srovnání s jinými stavebními materiály lze dřevo považovat objemově za lehké. Navzdory tomu dřevo nabízí skvělé mechanické vlastnosti. Jinak řečeno při nízké hmotnosti dřevo dokáže přenášet značné zatížení, což je ve stavebnictví velmi ceněnou vlastností (Koželuh 1998; Augustin a kol. 2008; Kolb 2008).

2.1.6.2 Vlhkost dřeva

Díky své hygrokopické vlastnosti dřevo dovede přijímat vodu ze svého okolí, případně ji naopak odevzdávat. Dřevo má tedy neustálou snahu vyrovnat svou vnitřní vlhkost v závislosti na okolních podmínkách a dosáhnout tak rovnovážného stavu. Změnou vlhkosti dřevo mění i svou hmotnost a objem a tím i samotnou hustotu. Voda vázaná ve dřevě má rovněž velký vliv na mechanické vlastnosti dřeva. Obecně s rostoucím podílem vody vázané ve dřevě klesá mechanická odolnost (Glass a Zelinka 2010).

Vlhkost tedy lze jednoduše definovat jako obsah vody ve dřevě. Podle způsobu výpočtu lze rozdělit vlhkost dřeva na dva druhy. Těmi jsou vlhkost relevantní a vlhkost absolutní. Absolutní vlhkostí se myslí podíl hmotnosti samotné vody a absolutně suchého

dřeva. Absolutní vlhkost se nejvíce využívá k definici fyzikálních a mechanických vlastností (Horáček 2008).

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 = \frac{m_v}{m_0} * 100 \quad [\%] \quad (2)$$

kde

w_{abs} – absolutní vlhkost dřeva [%],

m_v – hmotnost vody ve dřevě (rozdíl mezi vlhkým zkušebním tělesem a vysušeným) [g],

m_0 – hmotnost absolutně suchého vzorku [g].

V případě relevantní vlhkosti se počítá s poměrem hmotností vody k mokrému dřevu. Tímto výpočtem se zjistí procentuální zastoupení dřeva. Relevantní hmotnost dřeva se využívá například při nákupu/prodeji dřeva. Výsledná hodnota nikdy nemůže přesáhnout 100 % na rozdíl od absolutní vlhkosti (Horáček 2008).

$$w_{rel} = \frac{m_v}{m_w} * 100 \quad [\%] \quad (3)$$

kde

w_{rel} – relativní vlhkost dřeva [%],

m_v – hmotnost vody ve dřevě (rozdíl mezi vlhkým zkušebním tělesem a vysušeným) [g],

m_w – hmotnost vlhkého vzorku [g].

Vlhkost dřeva lze mimo výpočtem zjistit elektrickými vlhkoměry. Ty mají obvykle rozsah 6 až 28 % vlhkosti dřeva. Jejich výhodou je snadné použití a rychlé zobrazení naměřené hodnoty. Obecně se přesnost u kvalitních vlhkoměrů pohybuje v rozmezí 2 %.

Vlhkoměry lze rozdělit do dvou skupin. Jako první skupina jsou stejnosměrné elektrické vlhkoměry značené jako DC. U těchto vlhkoměrů se měří elektrický odpor, mezi dvěma elektrodami, které jsou zaraženy do měřeného vzorku dřeva. Druhá skupina založena na střídavém proudu se nazývá AC a měří elektrické pole uvnitř dřeva vyvolané dvěma elektrodami přiloženými na povrch dřeva. Na rozdíl od předešlého způsobu nedochází k poškození povrchu dřeva a lze tak měřit vlhkost například i hotových

výrobků, nebo tvrdých materiálů, jako sěrčkových hmot ve stavebnictví. Přesnost je však u AC vlhkoměrů nižší ve srovnání s DC vlhkoměry.

Při sušení dřeva přirozeně dochází nejdříve k uvolňování vody volné ve dřevě. To je voda v kapalném stavu uvnitř dutin dřeva. Jako druhá se uvolňuje ze dřeva voda vázaná. Tato voda je ve dřevě uložena uvnitř buněčných stěn pomocí vodíkových můstků. Z tohoto důvodu je nutné na odvod vody vázané vynaložit mnohem více energie. Poslední vodou ve dřevě je voda chemicky vázaná. Tato voda je přímo navázaná na jednotlivé chemické sloučeniny a ze dřeva ji dostaneme pouze tepelným rozkladem.

Při pozorování vlhkosti ve dřevě je tedy nutné pozorovat tři stupně vlhkosti. Prvním je stupeň nulové vlhkosti, tedy absolutně suchého dřeva, které neobsahuje žádnou vodu vázanou ani volnou. Následuje stupeň bodu nasycení vláken. Tento stav nastává, když je ve dřevě minimum vody volné a maximum vody vázané. Obvykle se pak hodnota vlhkosti pohybuje v rozmezí 25 % až 30 %. Poslední stupeň nastává tehdy, jeli dřevo plně nasyceno vodou volnou i vodou vázanou a lze ho nazvat plně nasyceným stavem. Tvarové a objemové změny dřeva nastávají pouze v rozmezí vlhkosti 0 % až mez nasycení vláken. V tomto rozmezí také dochází ke změnám v mechanické pevnosti dřeva. Při zvyšování vlhkosti nad mez nasycení vláken dochází pouze ke zvyšování objemu dřeva (Augustin a kol. 2008).

2.1.6.3 Vliv teplot na dřevo

Při pozorování vlivu teplot na dřevo bylo zjištěno, že s rostoucí teplotou dojde zpravidla ke snížení mechanických vlastností, a naopak s klesající teplotou, i pod bod mrazu, se mechanická odolnost zvyšuje u dřeva.

Teploty působící na dřevo lze rozdělit na tři základní skupiny:

- nízké teploty – záporné teploty začínající na bodě mrazu,
- střední teploty – mezi bodem mrazu a teplotou při které začíná rozpad dřeva,
- vysoké teploty – od teploty rozpadu dřeva až do samotného vzplanutí.

Mimo samotné hodnoty teploty, která působí na dřevo je důležité také vnímat samotný čas působení dané teploty.

Vliv nízkých teplot

V nízkých teplotách se modul pružnosti (MOE) zvyšuje. Značný vliv nárůstu modulu pružnosti v nízkých teplotách má vlhkost dřeva. Se zvyšující se vlhkostí ve dřevě se rychleji zvyšuje modul pružnosti v nízkých teplotách. Se zvýšením vlhkosti dřeva o 1 % dochází u smrku zvýšení pružnosti o 0,13 % a u borovice dokonce o 0,34 % (Zhao a kol. 2015).

Při pozorování meze pevnosti dřeva v nízkých teplotách lze zaznamenat navýšení. Při teplotě -180 °C lze dosáhnout navýšení pevnosti o 140 až 240 % oproti své původní hodnotě měřené při pokojové teplotě. Pro dřeva borovice, dubu a břízy se hodnota pevnosti v ohybu a tlaku v podélném směru u zmrzlého dřeva s vlhkostí nad mezí hygroskopicity dochází k navýšení o 35 % ve srovnání s hodnotami při pokojové teplotě (Perelygin 1965).

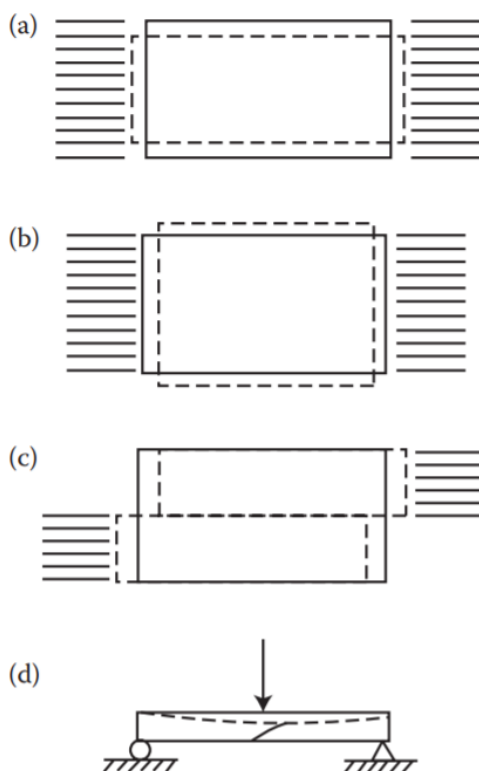
Se zvyšující se vlhkostí dřeva a klesající teplotou se zvyšuje pevnost v ohybu. Naopak u pevnosti v tahu dochází ke snížení hodnot s klesající teplotou. Největší hodnota meze pevnosti v tahu je dosažitelná při vlhkosti 10 % a teplotě v rozmezí 0 až 20 °C (Gerhards 1982).

Voda volná ve dřevě mění svůj stav na pevný při teplotě okolo -3 °C, zatímco voda vázaná ve dřevě mrzne při teplotě -10 °C (Perelygin 1965).

2.1.7 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti charakterizují chování dřeva v zatížení. Tím lze určit vhodné využití v praxi. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, pokles mechanické pevnosti můžeme pozorovat s narůstajícím množstvím vody vázané ve dřevě. Voda vnikající do buněčné stěny snižuje pevnost vodíkových můstků, držících mezi sebou buněčnou stěnu. Voda volná ve dřevě pouze zaplňuje buněčné dutiny a při namáhání je vytlačována otvory ven ze dřeva.

Například při namáhání tlakem v podélném směru je porušení způsobeno vybočením vláken. Důležitou roli zde hrají vodíkové můstky, které jsou velmi citlivé na vlhkost. Při namáhání v tahu v podélném směru dochází k narušení kovalentních vazeb odtrhnutím mikrofibril buněčné stěny. Srovnáním vlivu vlhkosti na pevnost v tlaku a tahu lze říct, že tlaková pevnost dřeva je mnohem citlivější než tahová pevnost (Augustin a kol. 2008)



Obr. 4: Druhy mechanického namáhání (Rowell 2013)
(a - tah, b - tlak, c - smyk, d - ohyb).

Při namáhání dřeva se rozlišují tři základní napětí: napětí v tahu, které lze charakterizovat jako natažení objektu – oddalování jednotlivých elementů od sebe; napětí v tlaku, které je opakem tahového napětí. Objekt se komprimuje a elementy se k sobě tak přibližují; smykové napětí, při kterém dochází k posunu jednotlivých vrstev po sobě je nejnáze vyvoláno dvěma protichůdnými silami v rozdílné rovině (Obr. 4).

Ohybové napětí lze pokládat za kombinaci všech tří základních namáhání, a tak způsobuje velmi specifické rotační zkreslení. Jednoduchý ohyb lze definovat jako tříbodový. Při ohybu na tři body je zkoušený vzorek podepřen ve dvou bodech, které jsou od sebe přesně vzdáleny. Mezi těmito body působí těleso silou tak, že dochází k ohybu měřeného vzorku. U namáhaného tělesa dochází v různých místech k různým namáháním. Na vnitřní straně ohybu dochází k namáhání tlakem. Naopak vnější ohybová strana je vystavena tahovému namáhání. Tahová část dřeva se dá celkem dobře eliminovat použitím pásnice. Jedná se zpravidla o tenký ocelový pás, na který přechází tahové napětí z namáhaného vzorku, a tak poskytující pevnou oporu. Mezi těmito vrstvami dochází ke smykovému napětí. V přesném přechodu mezi těmito vrstvami

můžeme najít rovnovážný stav dřeva – neutrální zóna namáhání nacházející se zpravidla v ose vzorku.

Elastičnost materiálů (elastická deformace) je schopnost materiálu deformace pod namáháním a opětovný návrat do původního stavu při zrušení namáhání. Jako opačnou kvalitu lze považovat viskozitu jako druh plasticity (plastická deformace). U této vlastnosti se jedná o změnu tvaru při namáhání ohybem, která se časem nevrací. Je tedy trvalá. Dosažením zlomu při namáhání prvku je dosaženo meze pevnosti (Rowell 2013).

Tab. 1: Specifické hodnoty pro jehličnaté a listnaté dřevo v surovém stavu a při vlhkosti 12 % podle Rowella (2013)

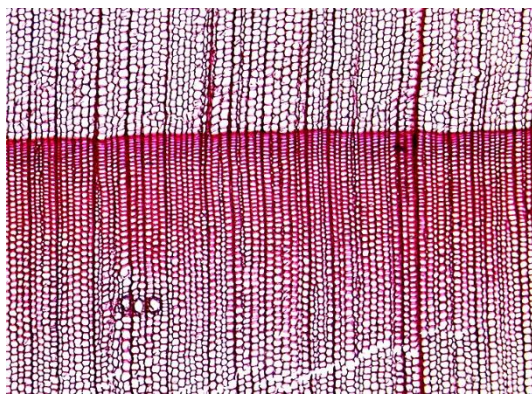
Vlastnosti	V surovém stavu		w = 12 %	
	Jehličnaté d.	Listnaté d.	Jehličnaté d.	Listnaté d.
Ohybová pevnost [MPa]	109,60	118,70	170,70	171,30
Modul pružnosti [MPa]	16 100	13 900	20 500	16 500

2.1.8 Dřeviny použité při experimentální části

2.1.8.1 Smrk ztepilý (*Picea abies* Karst.)

Smrkové dřevo patří mezi bělové jehličnany. Hustota dřeva v suchém stavu se pohybuje okolo 420 kg/m³. Dřevo obsahuje pryskyřičné kanálky. Patří mezi méně trvanlivé a odolné dřeviny vůči biotickým škůdcům (Vavrčík 2004).

V našich zemích je toto dřevo hojně využíváno ve stavebnictví, nábytkářství, chemickém průmyslu. Dřevo smrku s vysokou kvalitou se využívá i pro tvorbu hudebních nástrojů (rezonanční dřevo) (Zeidler 2012).

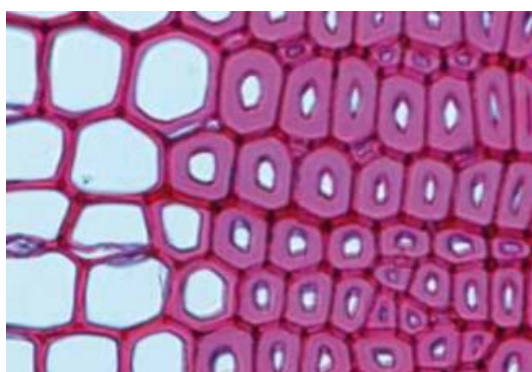


Obr. 5: Mikroskopická stavba smrkového dřeva (Vavrčík 2004)

2.1.8.2 Modřín opadavý (*Larix decidua* Mill.)

Toto dřevo je na rozdíl od smrku jádrové. Hustota při nulové vlhkosti se pohybuje okolo 560 kg/m³. Dřevo má poměrně velké množství pryskyřičných kanálek. Běl je úzká přibližně 1 až 3 cm. Modřínové dřevo má poměrně dobrou trvanlivost a odolnost vůči biotickým škůdcům. Dřevo je hůře impregnovatelné. Na příčném řezu můžeme pozorovat poměrně značný přechod mezi jarním a letním dřevem. (Vavrčík 2004)

Díky své vysoké pevnosti a odolnosti je dřevo modřínu hojně využíváno na vodní stavby a stavebně truhlářské výrobky.



Obr. 6: Příčný řez dřevem modřínu opadavého, 600x zvětšeno, vlevo jarní tracheidy a vpravo letní tracheidy (Böhm a Zeidler 2018)

Tab. 2: Hodnoty meze pevnosti v radiálním ohybu dle Ugoleva (1975 a1986)

Dřevina	w = 12 %		w = 30 %	
	Ohybová pevnost [MPa]	Modul pružnosti [MPa]	Ohybová pevnost [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
Smrk (<i>Picea abies</i>)	80	12800	44	9600
Modřín (<i>Larix decidua</i>)	112	14800	62	13500

2.1.9 Masivní dřevo

Masivní dřevo má oproti lepenému dřevu některé nevýhody, které je lepené dřevo schopné eliminovat lepenými spoji. Mezi tyto nevýhody se dají zařadit rozměry řeziva, vady dřeva, pevnost dřeva.

Tab. 3: Tabulka porovnání masivního dřeva a materiálů na bázi dřeva v modulu pružnosti a ohybová pevnost v statickém třibodovém ohybu (Wiedenhofen a kol. 2010)

Materiál	Specifická hustota [g/cm ³]	Modul pružnosti [MPa]	Ohybová pevnost [MPa]
Dub bílý (<i>Quercus alba L.</i>)	0,68	12 270	104,80
Javor červený (<i>Acer rubrum L.</i>)	0,54	11 310	92,39
Douglaska tisolistá (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	0,48	13 440	85,49
Borovice bílá západní (<i>Pinus ponderosa</i>)	0,38	10 070	66,88
Borovice dlouholistá (<i>Pinus palustris</i>)	0,59	13 650	99,97
LLD	0,4-0,6	9 000-14 500	28,6-62,6

Za značný pokrok v oblasti lepeného dřeva můžeme považovat možnost napojení na délku prostřednictvím zubovitého spoje. Tento spoj se historicky objevil v roce 1940. Délkovým napojením se dosahuje vyšší kvality z pohledu možnosti vynechání přirozených vad dřeva (Tab. 3).

Vynikající vlastnosti dřeva předurčují použití ve výrobě nosných prvků velkorozporových konstrukcí s rozpětím až okolo 100 metrů. Ruku v ruce s vývojem masivních konstrukčních lepených prvků jde i výzkum v požární odolnosti. To je značně ovlivněno prohloubením znalostí v oblasti chemických, mechanických a fyzikálních vlastností lignocelulósových materiálů (Netopilová 2004).

2.2 Lepené dřevo

Značných kvalitativních změn se v posledních desetiletích dosahuje při využití dřevní hmoty pro stavební konstrukce. Do popředí vystupují lamelové, vrstvené, aglomerované materiály a kompozitní dřevo (Netopilová 2004).

Počátek lepeného dřeva lze pozorovat v 19. století v Anglii. Zvláštní zásluhy v tomto oboru měl Otto Hetzer. Patent na tyto první lepené konstrukce byl vydán v roce 1906 a pojednával o slepení více lamel na sebe kolmo na lepenou hranu s rovnoběžnou orientací vláken. Tato konstrukce značně omezila rozměrové a tvarové změny dřeva. U této původní konstrukce se využívalo kaseinových lepidel. Ty jsou v dnešní době prakticky nevyužívaná a postupně nahrazována resorcinolformaldehydovými lepidly, melaminformaldehydovými lepidly, a nakonec lepidly bez volného formaldehydu, jako třeba různé izokyanáty a polyvinylacetáty. Tyto lepidla mnohem lépe odolávají vlhkosti ve srovnání s původně používanými lepidly.

Díky propracovanosti systému, nezávadnosti a spolehlivosti moderních lepidel lze lepené dřevo používat jak v interiéru, tak exteriéru. Současné moderní lepené konstrukční prvky se charakterizují vysokou rozměrovou a tvarovou stabilitou, odolností ohni a stejně tak i samotnou kvalitou z estetického pohledu (Matušinec 2015; Werner 2019).

U staveb s dřevěnou rámovou konstrukcí se oproti stavbám běžných konstrukcí spotřebuje o 16 až 17 % méně energie (u výroby a dopravy) a zároveň zanechávají o 26 až 31 % nižší uhlíkovou stopu než při výrobě ocelových, nebo betonových budov (Bowyer a kol. 2005).

Základní rozdělení materiálů na bázi dřeva podle Böhma a kol. (2012):

1. Desky z masivního dřeva
 - a. Deskové řezivo
 - b. Spárovky (jednovrstvé desky z rostlého dřeva)
 - c. Biodesky (třívrstvé desky z rostlého dřeva)
2. Překližované desky
 - a. Překližky
 - b. Laťovky
3. Desky z plochých třísek
 - a. Waferboard

- b. OSB
 - c. Multifunkční desky
- 4. Dřevotřískové desky (DTD)
- 5. Modifikované třískové desky
 - a. Protipožární desky Grenamat
 - b. Ohýbatelná dřevotřísková deska Recoflex
 - c. Funkčně modifikované dřevotřískové desky
- 6. Dřevoplastové kompozity (WPC)
 - a. Plastové imitace dřeva
- 7. Dřevovláknité desky (DVD)
 - a. Měkké dřevovláknité desky (hobra)
 - b. Středně husté dřevovláknité desky (MDF)
 - c. Tvrdé dřevovláknité desky (HDF)
- 8. Desky spojené minerálními pojivy
 - a. Desky z dřevité vlny a cementu
 - b. Desky z velkých třísek a cementu (cementoštěpkové desky)
 - c. Desky z jemných třísek a cementu (cementotřískové desky)
 - d. Desky z vláken a cementu (cementovláknité desky)
 - e. Desky z vlákna a sádry (sádrovláknité desky)
- 9. Vylehčené deskové materiály
 - a. Voštinové desky
 - b. Materiály se sendvičovou konstrukcí
- 10. Kompaktní desky
- 11. Kompozitní materiály na bázi dřeva a pro nosné účely
 - a. Vrstvené dřevo (LVL)
 - b. Parallam (PSL)
 - c. Intrallam (LSL)
 - d. DeltaStrand (TSL)
- 12. Konstruktivní dřevo

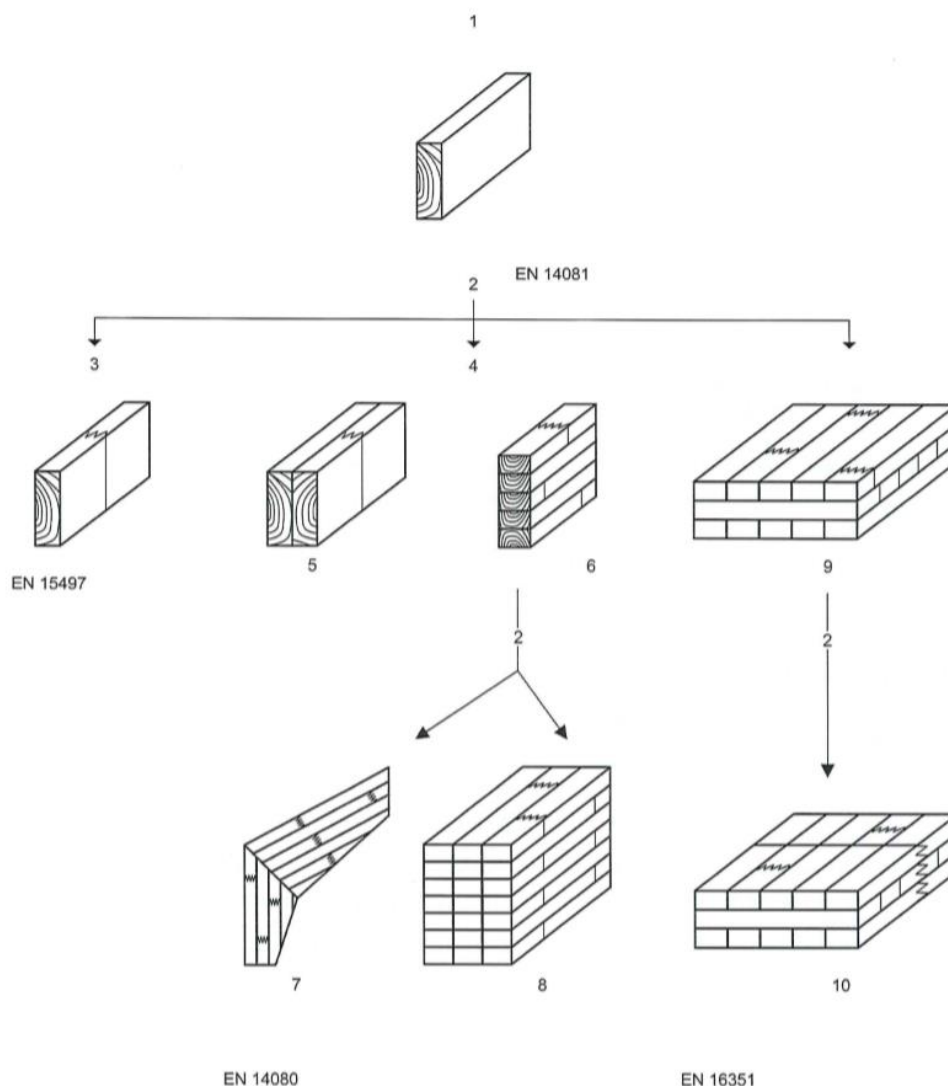
- a. Konstrukční dřevo nastavované zubovitým spojem (KVH)
- b. Dvou a tří vrstvé konstrukční dřevo (Duo-Trio hranoly)

13. Lepené lamelované dřevo

14. Speciální dřevěné nosníky

- a. I-nosníky
- b. Vyztužované nosníky

Podle obrázku 7 můžeme rozdělit nosné lepené dřevěné výrobky.



Obr. 7: Rozdělení nosných lepených dřevěných výrobků podle ČSN EN 14080 (2013)

Základním prvkem pro tyto lepené výrobky je prkno-lamela (1). Z toho se pomocí cinkového spoje vyrábí délkově napojený KVH hranol (3), při následném spojení v ploše vzniká lepené rostlé dřevo-Duo a Trio hranol (5). Tyto výrobky řadíme mezi konstrukční

dřevo. Při napojení více ploch mluvíme o lepeném lamelovém dřevě (6). Při dalším napojení tohoto výrobku můžeme mluvit o lepeném dřevě s velkými zubovitými spoji (7) nebo o blokově lepeném dřevě (8). Z lamel můžeme také lepit nejen podélně ale i křížem, Takový výrobek se vyrábí pod názvem CLT nebo X-lam (9). Křížové lamelové dřevo můžeme také napojovat velkým zubovitým spojem (10).

2.2.1 Lepidla – teorie

Lepidla mohou být tvořena jak syntetickými látkami, tak čistě přírodními. Tyto látky vytvářejí nekovový spoj. U lepidel pro dřevo se zpravidla vyhledávají nejvíce vlastnosti jako jsou pružnost, pevnost, neviditelnost spoje a podle místa určení i například odolnost vůči vlhku, nebo jiné specifické vlastnosti. V čase lepení jsou lepidla v kapalném stavu. V poslední době se velmi rozmohla snaha výroby dřevěných materiálů, které nezatěžují životní prostředí a jsou plně recyklovatelné. Příkladem je nutnost kontroly emisí volného formaldehydu z lepidel MUF a UF, nebo různých těkavých látek. Tento trend zvýšené kontroly nezávadnosti výrobků z lepeného dřeva může dobře pozorovat například na zkušební normě ČSN EN 16 516 (2018), která nastavuje přísnější způsob zjišťování volného formaldehydu v dřevěných lepených výrobcích dodávaných na německý trh.

2.2.1.1 Rozdělení lepidel

Lepidla lze dělit podle různých kritérií. Za hlavní kritéria lze považovat původ, formu skupenství a reakci na teplo. Podrobnější rozdělení lze pozorovat v následujícím přehledu (Boublík 1966; Kamenický 1990).

Podle původu

Přírodní

- a. Živočišná – klihy (glutinové, kasiňové, albuminiové)
- b. Rostlinná – mouky, škroby, přírodní pryskyřice, přírodní kaučuk, pektiny aj.
- c. Minerální – vodní sklo, sádra, cementy

Syntetická

- a. Polykondenzační – aminoplasty – močovinoformaldehydová (UF)
melaminoformaldehydová (MF)
– fenoloplasty – fenolformaldehydová (PF)

rezorcinformaldehydová (RF)

- b. Polyadiční – polyuretanové (PUR), epoxidové, emulzní-polymer-izokyanátové
- c. Polymerizační – polyvinylacetátová, kaučuková

Podle formy skupenství při zpracování

- a. Kapalná
- b. Prášková
- c. Fólie

Podle způsobu dosažení pevnosti spoje

- a. Vysušením – odpařením vody (škroby, klihy, latex, vodní sklo)
odpařením organického rozpouštědla (PVAC, roztoky gumy)
- b. Chemickou reakcí
- c. Změnou tlaku, teploty

Podle způsobu vytvrzení

- a. Termoreaktivní – nevratné
- b. Termoplastická – při znovu použití tepla, lepidlo měkne

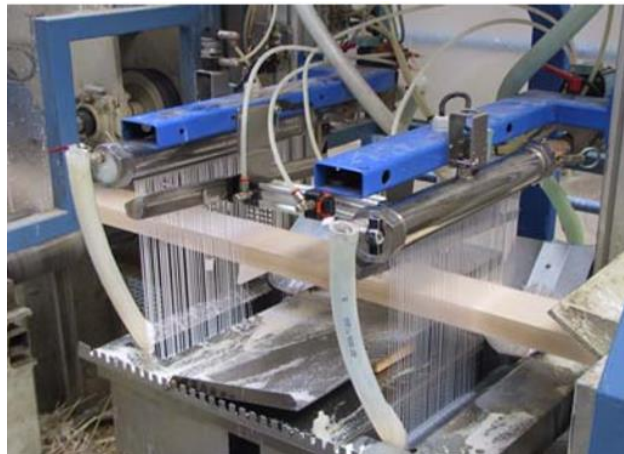
2.2.1.2 Složky lepidel

Makromolekulární látky, hlavní lepící částí lepidel, zpravidla do kapalného stavu skrze rozpouštění nebo rozptýlením ve vodě, acetonu, popřípadě alkoholu. Mezi hlavní přísady k dosažení určitých vlastností lepidel patří (Kamenický 1990; Muzikář a kol. 2008):

- a. Plniva – jemně měkké, mleté, tuhé látky, nemají lepidivé účinky (křída, kaolín, dřevěná moučka, vlákna), snižují ekonomické náklady
- b. Nastavovadla – jemně měkké, bobtnavé látky, mají lepidivé účinky (mouka, škrob), snižují ekonomické náklady
- c. Zušlechťovací přísady – aditiva zlepšující vlastnosti lepidel (barviva, fungicidní látky)
- d. Tvrdidla – látky zrychlující reakci lepidel – tvrdnutí
- e. Stabilizátory – pomáhají prodloužit dobu zpracovatelnosti lepidla (Pot life), při zachování vlastností lepidla

2.2.1.3 Aplikace lepidel na dřevo

Malé plochy můžeme nanášet ručně štětci, kartáči, stěrkami hladkými, ozubenými nebo ručními válečkové nanašečky se zásobníkem pro lepidlo. Nanášečky musí být řešeny tak, aby se daly snadno rozebírat a byly tak snadno čistitelné. Nanášečky s nádobou o obsahu 1,5 kg a pogumovaným válcem, kde se vrstva lepené spáry ovlivňuje množstvím vylitého lepidla před roztírací válec. U novějších válcových nanašeček se množství lepidla reguluje buď dávkovacími válci, nebo stíracími lištami.



Obr. 8: Strojová nanášečka (Augustin a kol. 2008)

Ve výrobních provozech se uplatňují především strojové nanašečky (Obr. 8). Ty fungují na obdobném principu válcových nanašeček nebo se uplatňují licí (clonové) nanašečky. Původně fungovaly pro nanášení nátěrových hmot. Někde se také uplatňuje nanášení stříkáním (Král 1960; Eisner 1966).

2.2.1.4 Teorie lepení

Faktory ovlivňující pevnost lepeného spoje:

- a. Adheze
- b. Koheze
- c. Smáčivost
- d. Pevnost lepeného materiálu
- e. Povrchové napětí lepidla

Adheze se dá vysvětlit jako schopnost lepidla přilnout k lepenému povrchu bez zřetelného pohybu.

Koheze je definovatelná jako vnitřní soudržnost lepidla. Jedná se o síly mezi molekulami, držící částice hmoty lepidla pevně k sobě.

Smáčivost lepeného povrchu je vyhodnocena změřením kontaktního úhlu mezi kapkou a smáčeným povrchem. Jeli uhel smáčení ostrý, je smáčivost horší. Při úhlu smáčivosti 180° nebo 0° lze říct, že je dosaženo dokonalé smáčivosti.

Pevnost lepeného materiálu nám určuje, zda lepidlo nanesené na lepený povrch nebude vytrženo i s podkladovým materiálem. V případě nízké pevnosti lepeného materiálu lze provést impregnaci za účelem její zvýšení.

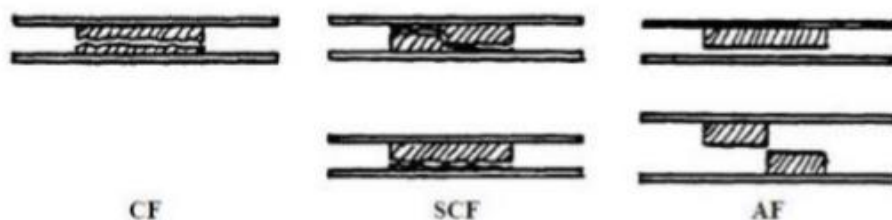
Povrchové napětí lepidla nám definuje smáčivost lepeného podkladu (Král 2011).

2.2.1.5 Lepené spoje

Výsledný lepený spoj je ovlivněn mnoha činiteli. Ty Trávník (2007) rozděluje do tří skupin:

- a. fyzikální vlastnosti lepeného dřeva (hustota, vlhkost, opracování povrchu aj.)
- b. chemické a fyzikální vlastnosti lepidla (obsah sušiny, viskozita, doba vytvrzování, doba schnutí, doba životnosti aj.)
- c. podmínky při lepení (nános lepidla, čas sestavení dílců, lisovací tlak, teplota, rychlost uzavření lisu aj.)

Na obrázku 9 jsou vidět tři případy, ve kterých dochází k porušení lepeného spoje. Adhezivní lom nastává při oddělení podkladu lepeného materiálu od lepidla. Při kohezním lomu vzniká trhlinka v lepeném spoji z důvodu vyšší pevnosti lepeného spoje s lepeným podkladem, než je pevnost samotné lepící směsi. Smíšený lom je kombinace předešlých dvou způsobů lomu, jejichž zastoupení se udává v procentech (Havelka 2011).



Obr. 9: Základní druhy porušení lepeného spoje (Havelka 2011)

(CF – Kohezní lom, SCF – Kohezní lom na hranici substrátu, AF – Adhezní lom)

U lepeného konstrukčního dřeva rozděluje Augustin a kol. (2008) několik spojů. Řadí se mezi ně průběžný (podélný) spoj, kterým se plošně lepí lamely. Spoje, kterými se spojují koce přířezů – spoj na tupo, šikmý spoj a klínový spoj (cinkový, zubovitý). U některých výrobků se také používá křížový spoj (CLT).

2.2.1.6 Vliv vlastností dřeva na pevnost lepení

Při požadavcích na výsledný lepený spoj je rovněž nutné zohledňovat vlastnosti lepeného materiálu. Ve dřevě se mimo základních složek, zmíněných v chemické stavbě dřeva, vyskytují i další doprovodné složky, které mají na výsledný lepený spoj značný vliv. Patří mezi ně například bílkoviny, škroby, tuky, cukry a anorganické soli.

U našich jehličnatých dřevin se můžeme setkat se zvýšeným obsahem pryskyřic a éterických olejů.

U listnatých dřevin se naopak mnohem více setkáváme s výrazným zastoupením tříslovin, jako například u dubu nebo akátu. Výrazná kyselost nebo zásaditost může mít negativní vliv na lepený spoj u dřeva. Dochází zde totiž k narušení celulózy a hemicelulózy obsažené jako hlavní složky ve dřevě. To má ve výsledku dopad na mechanické vlastnosti dřeva.

Jako další důležitou vlastností lepeného dřeva je jeho hustota. U dřev s vysokou hustotou je nutné použít vyššího lisovacího tlaku než u měkkých dřev. U těch může vyšším tlakem dojít snadno ke komprimaci lepených těles (Král 2011).

2.2.2 Lepidla používaná při lepení konstrukčních materiálů

U lepeného dřeva se můžeme setkat s několika druhy lepidel. Podle normy ČSN EN 14080 (2013) se mohou použítá lepidla omezovat podle tříd provozu a dále také mohou být omezeny národními ustanoveními platnými v místě použití. Mezi možné lepidla se dají rozdělit tři druhy:

Fenolická a aminová lepidla

Mezi tyto lepidla patří například MF, MUF, PRF, UF.

Jednosložková polyuretanová lepidla – PUR

Tyto lepidla jsou rozšířena prakticky napříč všemi průmyslovými odvětvími. Jejich výhodou je poměrně dobrá smáčivost lepeného povrchu stejně jako jednoduchá příprava pro lepení (nevyžadují míchání s tvrdidly a jinými přídatnými složkami).

Polyuretanová lepidla velmi snadno tvoří vodíkové můstky pevné kovalentní vazby s OH skupinami celulózy. Velmi snadno pronikají hluboko do pórů lepených materiálů.

PUR lepidla vytvrzují na základě vlhkosti z okolního prostředí. Měkké segmenty vytvrzeného lepeného spoje zajišťují poměrně vysokou elasticitu. Tvrdé segmenty vytváří pevné uretanové vazby.

Základní mechanické vlastnosti spoje, který je vytvrzený, se odvíjí od těchto tvrdých a měkkých segmentů, vzájemné interakci mezi nimi a na jejich vazbách. Další vazby v polymerní síti jsou vodíkové můstky. Ty mezi karboxylovými a aminovými skupinami výrazně posilují kohezi polymerů (Bragole 1973).

Emulzní polymer izokyanáty – EPI

EPI lepidla lze řadit mezi dvousložková termoplastická polymerní disperzní lepidla. Jako druhá složka je izokyanátové tvrdidlo poskytující termosetové vlastnosti. Lepidla jsou komplexní vícefázový systém, s procesy fyzikálních a chemických reakcí probíhající současně v průběhu vytvrzování lepidla. Mezi hlavní přednosti EPI lepidel se řadí krátká lisovací doba, možnost vytvrzení i při nižších teplot ve srovnání například s PVAC lepidly, nebo dobrá odolnost proti vlhkosti a teplotě. EPI lepidla mají dobré lepidivé účinky prakticky na kterýkoliv z běžných materiálů. Lepí tedy dobře prakticky jakékoliv dřevo. Toto lepidlo je využíváno prakticky po celém světě.

Plniva v EPI lepidlech se používají ke snížení nákladů na výsledný lepidlý produkt, zvýšení obsahu pevných látek a lepší schopnost vyplnit mezery. Nejčastěji se jako plnivo využívá uhličitan vápenatý (CaCO_3). Jako další plniva mohou být použity různé anorganické a organické materiály, jako například dřevní vlákna, mouky, jíly nebo mastek.

U plniva je důležitá velikost částic jejich schopnost usazovat se. Tato schopnost by měla být co nejmenší, aby tak došlo k homogenosti lepidla i při uskladnění a zároveň by měly být všechny částice lepidla co nejvíce stejně velké k zajištění hladkého a stabilního lepidlového filmu. Tvrdidlo by nemělo vytvářet až příliš tvrdý film, který by způsoboval značné otupování nástrojů při opracování lepeného dílce. Obsah plniv v EPI lepidlech se zpravidla pohybuje v rozmezí 0 až 50 %.

Doba zpracování se může lišit podle poměru lepidla a izokyanátového tvrdidla. Pokud máme ve směsi více tvrdidla, poskytuje směs vyšší počáteční viskozitu a díky tomu může být delší čas zpracování. Takové směsi, ale vykazují lepší vlastnosti u odolnosti vůči vlhkosti. V případě že ve směsi je naopak menší zastoupení činidla je

manipulace s ním snadnější. U směsi s malým zastoupením izokyanátu je rychle dosaženo bodu, kdy je množství nezreagovaného izokyanátu příliš nízké na ad-váhavé aplikace, kde je vyžadována vysoká odolnost proti vlhkosti. Z tohoto důvodu je doba zpracovatelnosti bude kratší, než kdyby byla použita větší množství izokyanátu (Krystafíok a kol. 2003).

Náchylnost k teplé až vroucí vodě je značně ovlivněno zvyšujícím se poměrem zesíťovacího činidla – tvrdidla. Testováním se prokázalo, že ideální poměr tvrdidla v adhezivním roztoku 15 až 20 % vytvořil nejlépe odolný film pro namáhání vlhkým teplem. Jednoznačně nejlepších výsledku v odolnosti vlhkému teplu bylo dosaženo za pomoci emulzní složky na bázi tri-kopolymerního latexu a 20 % vodného emulgovatelného izokyanátu.

Rychlost vytvrzení EPI lepidla je poměrně rychlá i při pokojové teplotě oproti jiným druhům lepidel. Závislost reaktivity lepidla se odráží například od druhu dřeviny. Jde u ní například o hustotu, nasákavost nebo i hodnota pH u některých druhů dřevin. Například lepení husté dřeviny nebo materiálu se špatnou nasákavostí budou vyžadovat delší dobu tuhnutí. Stejně tak i vyšší dávka lepidla bude potřebovat delší dobu pro tuhnutí než tenký film lepidla. Také pokud je ve směsi vyšší obsah pevných látek bude mít za následek kratší dobu tuhnutí.

Krátká doba montáže u EPI lepidel může být problém při lepení velkých souborů nebo při velkých plochách. Možný způsob řešení je použití tzv. blokováných izokyanátů, které se aktivují použitím vyšší teploty. EPI lepidla s touto technologií mohou mít dobu trvanlivosti a montáže prodlouženy až na 8 hodin. Přestože je potřeba k „odblokování“ potřeba tepla, jde o menší hodnoty než při vytvrzování MUF nebo PF lepidel.

U aplikování EPI lepidel může působit problémy jejich vynikající přilnavost k materiálům jako jsou kovy, plasty a pěny. EPI lepidlo je tedy vhodné k jejich kombinování s dřevěnými prvky. Musí se ovšem zohledňovat jejich použití při výrobním procesu kdy mohou lepené kusy ulpívat na lisovacích deskách. Tento problém se dá řešit pomocí povrchových úprav lisovacích desek.

EPI lepidla poskytují lepenou spáru s vyšší odolností proti teplu a vlhkosti oproti lepidlům PVAc. Tato skupina se používá například u okenních rámců.

V Evropě jsou nejpoužívanějšími druhy dřevěných podlah dvou až třívrstvé sendvičové parkety. V tomto odvětví jsou EPI lepidla konkurenceschopná s UF lepidly. Takto vyráběné parkety se lisují pomocí radiofrekvenčních lisů s krátkými doby cyklu,

v závislosti použitých dřevěných materiálech. Výhoda parket lepených EPI lepidlem oproti UF, je jeho odolnost proti teple při použití u vytápěných podlah.

Při výrobě laminovaných nosníků se využívá poměr 100 dílů adhezivní složky k 15 dílům pMDI činidla. Tato směs vytváří dobré výkonné vlastnosti pro finální lepenou spáru a přiměřenou dobu pro výrobu nosníků v Evropě. Zařízení k nanášení lepidel fungují většinou na principu pásového rozprašovače nebo se také používají válečkové nanášečky. Pro výrobu se používá emulgované pMDI na vodní bázi.

Montážní čas se dá také prodloužit až o 50 % nanesením vodního postřiku na povrch dřeva 10-15 %, počítáno na množství lepidla již naneseného na povrchu dřeva (Grøstad a Pedersen 2010).

2.2.3 Lepidla použitá při experimentální části

2.2.3.1 Polyuretanové lepidlo (Kestopur 1030)

Toto jednosložkové lepidlo, které vytvrzuje pomocí vlhkosti je určeno pro lepení dřevěných materiálů. V složení lepidla jsou vlákna pro lepší pevnost lepeného spoje. Lepidlo má povolení k použití ve výrobě lepených nosníků označených CE dle normy ČSN EN 14080 (2013) stejně jako délkově nastaveného dřeva dle normy ČSN EN 15497 (2015) a křížového lamelového dřeva CLT, a tedy splňuje i požadavky normy ČSN EN 15425 (2017).

Díky vysoké odolnosti lepeného spoje proti vlhkosti se toto lepidlo dá dobře využít i pro lepení jiných, stavebně truhlářských konstrukcí.

Lepidlo Kestopur 1030 neobsahuje žádný volný formaldehyd, ani rozpouštědla a tím jsou výrobky lepené tímto lepidlem zcela nezávadné k prostředí, tedy splňují klasifikaci emisí M1 pro stavební materiály.

Pracovní postup:

Na očištěné a srovnané povrchy je nanášeno lepidlo na jednu, nebo obě k sobě slepované plochy, v závislosti na povaze lepeného materiálu. Při práci s lepidlem je doporučeno použít ochranné rukavice. Při aplikaci lepidla ve vyšších teplotách je nutné použít ochranu dechovou masku. Přebývajícím nevytvrzeným lepidlem lze odstranit suchou látkou a acetonem. Vytvrzené přebývajícím lepidlem lze odstranit pouze mechanicky.

Výrobce garantuje vysokou kvalitu svých výrobků. Při skladování i použití je nutné dbát pokynů výrobce, obsažených v technickém listě (Kiilto Oy 2017).

Tab. 4: Fyzikální stav lepidla Kestopur 1030 při 20 °C (Kiilto Oy 2017)

Stav	Kapalina
Barva	Krémová
Bod varu při atmosférickém tlaku	100 °C
Vapour pressure at 20 °C	2350 Pa
Vapour pressure at 50 °C	12381 Pa
Hustota	1,2 kg/dm ³
Viskozita	7000 mPa (brookfield RVT)
Otevřený čas	Maximálně 30 min
Lisovací čas	Od 90 min
Aplikační teplota	18 – 30 °C
Spotřeba	140 – 180 g/m ² zubový spoj 160 – 200 g/m ² plošný spoj

2.2.3.2 Emulzní polymer izokyanátové lepidlo (Kestokol WR 11)

Lepidlo Kestokol WR11 je nutné smíchat ve správném poměru s tvrdidlem Hardener WR. Jako polymerní izokyanátové lepidlo se vyznačuje skvělou odolností vůči klimatickým podmínkám. Vyznačuje se skvělou odolností na působení vroucí vody a řadí se do kategorie lepidel D4. Díky těmto vlastnostem je toto lepidlo používáno na výrobcích, které jsou vystaveny působení často se měnících povětrnostních podmínek.

Před nanášením lepidla probíhá samotná příprava. Tím se rozumí smíchání lepidla s tvrdidlem v poměru 100:15. Pokud se stane, že je překročena otevřená doba lepidla, dochází k pění. V rámci doby zpracovatelnosti je možné novou směs spojit se starou směsí lepidla. Lepené plochy musí být srovnané a očištěné. Nanášení lepidla se provádí rovnoměrně po celé lepené ploše dílce. Vždy se nanáší lepidlo pouze na jednu ze spojovaných ploch. Po sestavení celého souboru dochází k lisování. Působením teploty lze lisovací čas znatelně zkrátit. Po vytvrzení spojů a odstranění lisovacího tlaku je nutné výrobek nechat klimatizovat, aby mohlo lepidlo zcela dozrát. Tento proces klimatizace trvá zpravidla do 7 dnů.

Výrobce garantuje vysokou kvalitu lepeného spoje za předpokladu dodržení postupu pro lepení tímto lepidlem. Výrobce neručí za konečný výsledek lepených souborů pro nemožnost kontroly správného postupu. Při aplikaci lepidla je doporučeno používat ochranné rukavice (Kiilto Oy 2017).

Tab. 5: Fyzikální stav lepidla Kestokol WR 11 při 20 °C (Kiilto Oy 2017)

Stav	Kapalina
Barva	Mírně béžová
Bod varu při atmosférickém tlaku	100 °C
Míchací poměr	100:15
Čas zpracovatelnosti	Směs zpracovatelná do 20 min. (+20 °C)
Hustota	1,15 kg/dm ³
Viskozita	3500 mPa (brookfield RVT) 5000 mPa (brookfield RVT) ihned po přidání tvrdidla
Otevřený čas	7 – 120 min
Lisovací čas	Od 20 min
Aplikační teplota	Min +5 °C
Spotřeba	160 – 200 g/m ²

2.2.4 Konstrukční dřevo

2.2.4.1 Lepené lamelové dřevo (BSH, Glulam)

Toto dřevo je zhotoveno lepením jednotlivých částí – lamel v předepsaných podmínkách. Lamely jsou k sobě orientované tak, že podélná vlákna lamel jsou shodné s podélným směrem výsledného prvku. Tento způsob je tedy přímo v rozporu s křížovým pravidlem skládání vrstev v případě překližovaných desek.

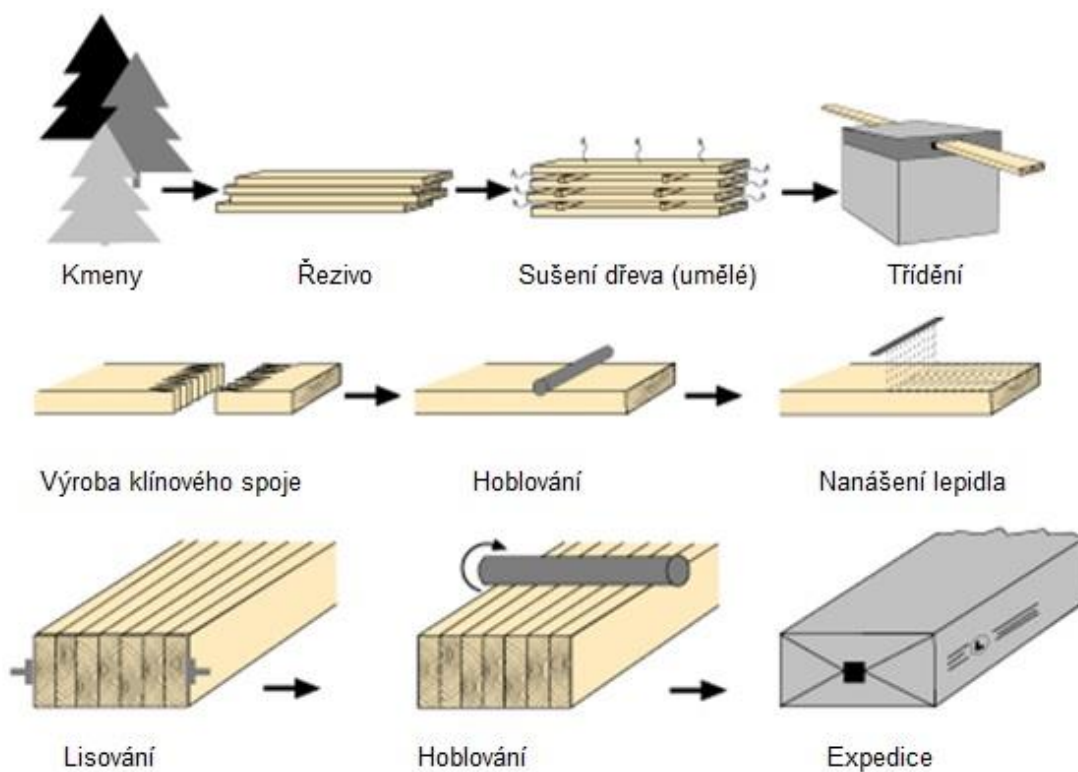
Výroba lepeného lamelového dřeva v kombinaci s moderními technologiemi lepení nabízí skvělý stavební materiál s vysokou kvalitou a jedinečnými vlastnostmi. Ve srovnání s rostlým dřevem dosahuje takto vyráběný materiál znatelně vyšších hodnot pevnosti a může být vyroben ve značném délkovém rozpětí a téměř jakémkoliv tvaru.

Od počátku výroby těchto moderních lepených lamelovaných dřevěných materiálů je pozorován značný nárůst v použití ve stavebnictví a tím i výrobě.

Proces výroby lepeného lamelovaného dřeva se dá celosvětově označit za velmi podobný. Na obrázku 10 můžeme pozorovat jednoduché schématické znázornění výrobního procesu LLD:

- Lepené lamelované dřevo lze vyrábět prakticky z jakékoliv dřeviny, pro kterou existuje vhodné lepidlo. V praxi se většinou pro výrobu lepeného lamelovaného dřeva používá měkkých jehličnatých dřevin jako je smrk.

- Desky, nebo lamely s průměrnou tloušťkou v rozmezí 40–50 mm a délky 1,5 až 5 m jsou dovezeny ze skladu. Na zahnuté nosníky jsou zpravidla používány tenčí lamely – 20 až 30 mm.
- Lamely jsou vysušeny na stejnou vlhkost, která se pohybuje v rozmezí 8 až 15 %. Rozdíl vlhkosti dvou sousedních lamel by měl být co nejmenší, přičemž největší povolený rozdíl je 5 %. Běžně používaná lepidla dovolují maximální vlhkost dřeva 15 %. S nižší vlhkostí dřeva se zvyšuje nasákavost dřeva lepidlem a tím se zvyšuje pevnost lepeného spoje. Ideální je udržovat vlhkost lepeného spoje na stejné hodnotě, jako bude vlhkost konstrukce v místě určení, čímž se předchází vzniku trhlin a tvarových změn.
- Vysušené lamely se třídí do pevnostních tříd zpravidla na základě optického posouzení. Použití lamel stejné pevnostní třídy zajišťuje vyšší homogenitu vyrobeného prvku. V praxi je pro využití širšího pevnostního rozsahu lamel dodržováno pravidlo, kdy jsou lamely s vyšší pevností použity na okrajové části, kde dochází k velkému namáhání tlakem/tahem. To však vyžaduje větší skladovací prostory.
- V délce jsou lamely napojeny pomocí cinkovaného spoje. Na plochu jednotlivých klínů cinkovaného spoje je nanášeno lepidlo, které vytvrzuje pod tlakem po dobu minimálně dvou sekund. Lamela je následně zakráčena na požadovanou délku. Takto připravená lamela je následně uložena po dobu minimálně 8 hodin bez další manipulace za účelem klimatizace a úplného vytvrzení lepidla ve spojích.
- Po vytvrzení dochází k hoblování lamely za účelem srovnání nerovností a tloušťkové egalizace.
- Na horní plochy lamel je nanášeno lepidlo a následně jsou jednotlivé lamely vrstveny na sebe do požadovaného tvaru.
- Slepené lamely jsou následně lisovány. Samotné lisování musí proběhnout vždy před počátkem vytvrzování lepidla. To je zpravidla maximálně 1 hodina.
- Po vytvrzení lepidla dochází k uvolnění lisovacího tlaku. Slepené prvky se hoblují po bocích – plocha slepeného nosníku. Následuje vrtání otvorů pro spojovací prostředky a případné oříznutí přesného tvaru výšky nosníku. Po zapravení případných vad a ofrézování hran se aplikuje ochranný, nebo barevný nátěr. Po dokončení se prvek zabalí a umístí do expedičního skladu, odkud je přepraven na místo určení.



Obr. 10: Schéma výrobního procesu LLD (Augustin a kol., 2008)

Teoreticky není pro výrobu lepených lamelovaných nosníků omezení. Prakticky je tato výroba omezena možnostmi výrobních prostorů, přepravy a strojním zařízením výrobce (Augustin a kol. 2008).



Obr. 11: Obloukový a rovný nosník BSH (DEK a.s.)

V současnosti lze v rámci ČR pozorovat mnoho zajímavých staveb z lepeného lamelovaného dřeva jako třeba různé lávky, mosty, nebo výrobní a sportovní haly. Díky své délkové neomezenosti a mnohem stálejší vlastnostem odsunul běžné rostlé dřevo na

vedlejší kolej u velkorozpětových konstrukcí a značně nahradil dříve tolik využívané kovové a betonové konstrukce (Koželuh 1998).

2.2.4.2 CLT

Jedná se o velkoformátový systém využívaný ve stavebnictví, který je vyráběný z vrstveného, křížem skládaného masivního dřeva. CLT panely jsou omezeny výrobními kapacitami a možnostmi transportu a montáží. Vyrábí se vždy z lichého počtu vrstev. Nejčastěji z tří, výjimečně i pěti až sedmi vrstev s tloušťkou v rozmezí 50 až 500 mm. Obvykle jsou panely o rozměrech maximálně 3 m do šířky a 16 m do délky. Při potřebě větších rozměrů panelů se využívá velkého zubového spoje. Hustota CLT prvků je okolo 500 kg/m³ při vlhkosti v rozmezí 8 – 12 %. Díky své konstrukci vykazuje tento materiál velice dobrou tvarovou stabilitu.

Šířky jednotlivých prken se pohybují v rozmezí 80 až 240 mm, tloušťka od 10 do 45 mm. Šířka k tloušťce je většinou v poměru 4: 1. Zpravidla se k výrobě využívá dřeva jehličnatých dřevin. Jednotlivá prkna se skládají do plochy, které jsou na sebe kladeny křížovým pravidlem, vždy v lichém počtu vrstev (Kuklík 2005).

Tento materiál se dobře hodí ve stavebnictví jak pro nosné, tak i pro nenosné stěny. Tento materiál je pro svou univerzálnost velice dobře použitelný v kombinaci s jinými stavebními materiály. Tyto materiály zároveň pro svojí tuhou konstrukci skvěle přenáší zatížení. Z těchto důvodů je tento materiál žádaný a jeho využití se stále navyšuje (Sovák 2012).

2.2.4.3 KVH

Tyto konstrukční hranoly jsou jednodušší obdobou lepeného lamelového dřeva. Jedná se o konstrukční hranol z jednotlivých hranolů napojovaných na cinkový spoj v délce. Tím je dosaženo, ve srovnání s rostlým dřevem, vyšší tvarové stability a kvality díky možnosti vymanipulování přirozených vad dřeva. Délky těchto hranolů se často pohybují až do 18 m. Jako materiál pro výrobu se většinou volí měkké, jehličnaté dřevo, jako například smrk. Spleení cinkovaných spojů je docíleno prostřednictvím PUR lepidel. Nejčastěji se využije KVH hranolů ve stavebnictví, a to i jako pohledové trámy v interiéru (Böhm a kol. 2012).



Obr. 12: KVH hranol nastavený zubovitým spojem (DEK a.s.)

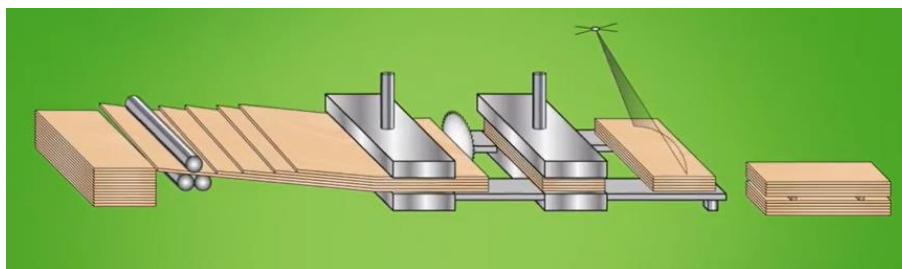
2.2.4.4 DUO a TRIO hranoly

Konstrukčně tyto hranoly vycházejí z KVH hranolů. Po sestavení délkově nastavených hranolů pomocí cinkovaných spojů dochází k rozříznutí hranolů na dva, nebo tři díly. Po jejich srovnání dochází opět k jejich slepení do jednoho celku. Tímto postupem se uvolní napětí vznikající přirozeně v rostlém dřevě při snižování vlhkosti. Dochází tedy k ustálení tvaru hranolů a minimalizaci trhlin. Důležitou podmínkou při lepení je, složení dílců levou stranou k sobě – pravou stranou ven. Tyto hranoly se zpravidla využívají ve stavebně truhlářském odvětví. Velké uplatnění lze tedy hledat u stropních nosníků a skeletových staveb, bez rozdílu, zda se jedná o pohledové konstrukce, nebo ne (Böhm a kol. 2012).

2.2.5 Kompozitní materiály na bázi dřeva a pro nosné účely

2.2.5.1 Vrstvené dřevo LVL

U tohoto materiálu je jako hlavní surovina pro výrobu použita dýha o tloušťce od 2,5 do 4,5 mm a šířce v rozpětí 680 až 1370 mm. Dýhy jsou získány loupáním a následným vysušením. Ty jsou většinou vyráběny z dřeva douglasky a borovice. Jednotlivé dýhy jsou k sobě naplocho vrstveny a spojovány vodotěsnými lepidly v podélném směru. Takto slepené bloky dých jsou využity jako dřevěné nosníky ve stavebnictví. Tyto materiály zvládají přenášet značné zatížení. To může být zajištěno i možností eliminace přirozených vad ve dřevě, jako jsou suky. Ty jsou rozprostřeny v ploše, čímž dochází k minimalizaci vlivu těchto vad (Canadian Wood Council 2020).



Obr. 13: Výroba lepeného vrstveného dřeva (Steico 2019)
(lepení> lisování> kontrola> krácení> stohování)

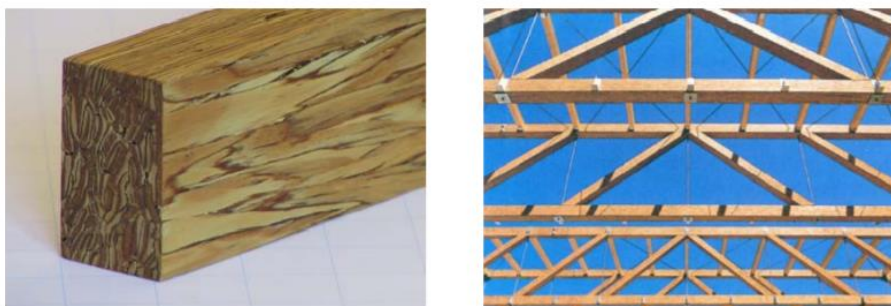
Tento materiál zaznamenal poprvé své praktické využití v průběhu druhé světové války. V té době se z tohoto materiálu začali vyrábět letadlové vrtule. Ve stavebnictví pro tvorbu nosníku byl využíván přibližně od roku 1970. Ve srovnání s rostlým dřevem je zde možnost využití výřezu o nižší kvalitě a zároveň hotové nosníky využívají znatelně vyšší tvarovou a rozměrovou stabilitu (Canadian wood council 2020).

Příkladem jsou nosníky Kerto, vyráběné ze smrkových, borovicových a jedlových dýh. Výsledný nosník je zpravidla o rozměru 21 x 90 mm a na délku 1,8 nebo 2,5 m.

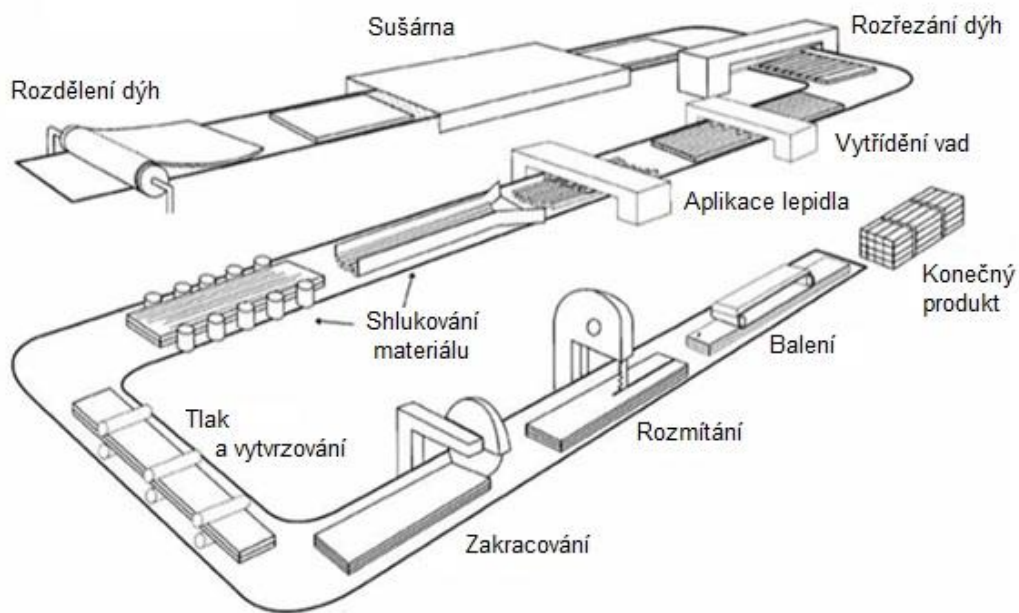
2.2.5.2 Parallam PSL

Tento stavební prvek se vyrábí z dýhových pásek o průměrné šířce 20 mm a tloušťce do 3 mm při délce 2 m. Paralelně s vlákny naskládané pásky do bloku jsou spojeny lepidlem do pevného bloku. Při lisování se nejvíce u této technologie využívá mikrovlnný ohřev, díky kterému dochází k vytvrzení zevnitř. Tento materiál objevující se v roce 1966 v Kanadě se postupně rozšiřuje nejen do USA. (Štefka 2002; Böhm 2010)

Panely jsou zpravidla v rozměrech 14,5 cm na výšku, 45 cm na šířku a až 21 m do délky. Dýhy použité ve výrobě jsou zpravidla z dřeva douglasky, případně borovice. Tyto panely lze opracovávat podobně jako rostlé dřevo (Štefka 2002; Mudra 2011).



Obr. 14: Parallam a jeho použití na nosník (Augustin a kol. 2008)



Obr. 15: Schéma výroby PSL (Wiedenhoften a kol. 2010)

2.2.5.3 LSL – Intrallam

Tento materiál z vrstvených třísek se dá připodobnit OSB deskám. Základním materiálem pro výrobu jsou dřevěné třísky o délce cca 300 mm a tloušťce okolo 4 mm. Minimální požadavky na surovinu nabízí možnost značného využití dřevěné kulatiny. U LSL jsou třísky orientovány pouze jedním směrem a to podélným (Engineered Wood Products 2020).

Primární surovinou je plochá tříska vyrobená z odkorněných výřezů. Ta je následně roztříděna dle rozměrů. U vybraných třísek následně probíhá jejich vysušení v bubnové sušárně. Odtud jsou suché třísky transportovány do válcové nanáščky lepidla. Po nanesení lepidla jsou třísky podélně navrstveny na sebe na lisovací pás, po kterém je navrstvený koberec dopraven do vyhřátého lisu. Lisování probíhá za vysokého tlaku a teploty. Po vytvrzení následuje formátování na požadovaný rozměr a tvar.

Příkladem tohoto dřevěného stavebního prvku je Timberstrand[®], který se vyznačuje tím, že jako použitá dřevina pro výrobu třísek použitých ve výrobě Timberstrand[®] jsou rychle rostoucí topoly (Engineered Wood Products 2020; Weyerhaeuser 2020).



Obr. 16: LSL a jeho použití na nosník (Augustin a kol. 2008)

Tab. 6: Porovnání konstrukčních materiálů podle Slonka (2006)

Způsob namáhání	KVH	Duo a Trio	BSH	Kerto S	Kerto Q	Microllam	Parallam	Intrallam
Ohyb (MPa)	10	10	11	19	15	19	20	15,5
Modul pružnosti (MPa)	10 000	11 000	11 000	13 000	10 000	14 500	14 500	10 300
Hustota (Kg/m ³)	420-560	420-560	420-560	510	470	670-720	670-720	640

3 Metodika

Tato část pojednává o průběhu experimentální práce. Díky této kapitole by mělo být možné zreprodukovat provedenou experimentální zkoušku. Základními částmi této kapitoly jsou:

- zhotovování zkušebních těles
- kódování zkušebních těles
- klimatizování zkušebních těles a určení hustoty zkušebních těles
- teplotní zatěžování zkušebních těles
- stanovení ohybových charakteristik
- ověření vlhkosti zkušebních těles
- statistické vyhodnocení naměřených dat

Vstupní materiál

Dřeviny

Pro experimentální zkoušku bylo stanoveno několik podmínek. Byly vybrány dva druhy jehličnatých dřevin: smrk a modřín. Smrk pro jeho hojné využívání v daném průmyslu. Je nejpoužívanější dřevinou pro nosné konstrukce, kvůli dostatku a ceně dřeviny. Modřín je sice dražší, ale byl zvolen pro jeho lepší vlastnosti oproti smrku.

Lepidla

Dále byly vybrány dva druhy lepidel, které se používají pro konstrukční lepené dřevo. Konkrétně Polyuretanové lepidlo Kestopur 1030 armované vlákny pro větší pevnost a emulzní polymer izokyanátové lepidlo Kestokol WR 11.

3.1 Příprava zkušebních těles

Vzájemnou kombinací dřevin a lepidel vznikly skupiny, kde byl stanoven minimální počet zkušebních těles na 20 kusů (Tab. 7 a 8). Bylo vyrobeno přibližně o 25 % zkušebních těles víc, kvůli možným chybám vzniklým v průběhu výroby nebo vadám rostlého dřeva. Pro experimentální zkoušku byl stanoven celkový počet zkušebních těles na 240 kusů. Konkrétní přehled skupin je uveden v tabulkách níže.

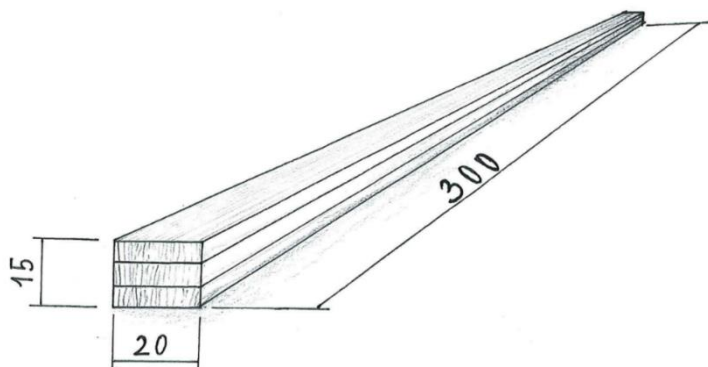
Tab. 7: Minimální požadované množství smrkových zkušebních těles

Smrk		
Zatížení teplotou	Lepidlo	
	PUR	EPI
Referenční zk. tělesa	20 ks	20 ks
- 15 °C a 70 °C	20 ks	20 ks
- 25 °C a 70 °C	20 ks	20 ks

Tab. 8: Minimální požadované množství modřínových zkušebních těles

Modřín		
Zatížení teplotou	Lepidlo	
	PUR	EPI
Referenční zk. tělesa	20 ks	20 ks
- 15 °C a 70 °C	20 ks	20 ks
- 25 °C a 70 °C	20 ks	20 ks

Zkušební tělesa obou dřevin byla vyrobena ve jmenovitých rozměrech 15 x 20 x 300 mm (Obr. 17). Jejich rozměr je odvozen od platné normy ČSN 49015 (1979), normy ČSN EN 310 (1995) a normy ČSN EN 14080 (2013). Z nich vychází, že by délka zkušebního tělesa měla být 15 - 20ti násobek tloušťky. Na výrobu zkušebních tělísek se použilo primárně radiální řezivo a jádrové dřevo u modřínu.



Obr. 17: Zkušební těleso s jmenovitými rozměry

Prvotní materiál pro výrobu vzorků byly fošny, u kterých se nejprve odstranila dřevěná část a také se odstranily okraje s oblou stranou. Byly použity fošny do délek čtyř metrů. Z každé fošny se nařezaly metrové výřezy. Tyto díly se vymanipulovaly pomocí formátovací kotoučové pily na hranoly (Obr.18).



Obr. 18: Formátovací kotoučová pila SCM SI 400 EP CLASS

Každý hranol byl opracován srovnávací frézku (Obr. 19) po dvou sousedních stranách. Tento krok se provedl pro srovnání a získání pravého úhlu u dvou sousedních ploch.

Dále byly takovéto hranoly opracovány tloušťkovací frézku na požadovanou velikost průřezu.



Obr. 19: Tloušťkovací frézka SCM S 630 CLASS

Hranoly se poté ještě rozmítaly na čtyři lamely. Každá lamela byla znovu opracována pomocí tloušťkovací frézky. Tento krok byl použit nejen pro sjednocení rozměrů lamel, ale také pro srovnání povrchu pro následné lepení.



Obr. 20: Lamely připravené pro lepení

V každém mezikroku byly přířezy značeny kódem, aby bylo následně možné určit polohu jakéhokoliv zkušebního tělesa.

Lepení

Lepené vzorky se vždy skládaly ze tří slepených lamel (Obr. 20). Lamely, které byly dohromady spojeny, byly vždy tloušťkově sousední. To znamená, že ze čtyř možných lamel byla vynechána buď krajní lamela nebo ta, která obsahovala vadu dřeva.

Lepilo se dvěma lepidly z toho jedním jednosložkovým PUR lepidlem Kestopur 1030 a druhým dvousložkovým EPI lepidlem Kestokol WR 11. U obou lepidel bylo doporučené množství naneseného lepidla do 200 g/m².

Dvousložkové lepidlo se míchalo těsně před aplikací. Poměr mísení u lepidla Kestokol WR 11 je 100 dílů lepidla a 15 dílů tvrdidla. Doba zpracovatelnosti po smíchání se udává 20 minut.

Aplikace lepidla probíhala litím dostatečného množství lepidla na lepené plochy. Dodatečně se ještě lepidlo rozetřelo po ploše pro stejnoměrný film. Lepidlo se vždy aplikovalo na dvě ze tří lamel na jednu plochu.

Po nanesení lepidla se soubor lamel složil do vzorku a byl přenesen do lisovacího stroje (Obr. 21). Vzorky se skládaly vedle sebe tak aby při vytečení nadbytečného lepidla nemohlo dojít k slepení dvou vzorků k sobě. Lisovací dýchovací stroj od italské firmy SCM na obrázku byl nastaven dle požadavků technických listů konkrétních lepidel. Výhodou tohoto lisu je jeho samostatné dotlakovávání v průběhu lisování na nastavené hodnoty.



Obr. 21: Dýchovací víceetážový lis SCM GS 6/90

U dvousložkového lepidla byl minimální doporučený lisovací čas 20 minut. Celkový vytvrzovací čas zahrnuje otevřený čas a lisovací čas. U polyuretanového lepidla byl celkový vytvrzovací čas přibližně 2 hodiny. V případě EPI lepidla byl tento čas přibližně 40 minut. Lis byl vybaven časovačem a tak po uplynutí lisovacího času došlo k jeho automatickému otevření. (Obr. 22).



Obr. 22: Vzorčky po rozevření lisu

U čerstvě slepených prvků se vždy ponechala určitá doba na vyvrání lepidla, teprve poté bylo se vzorky dále manipulováno.

Dělení na jmenovitý rozměr

Každý vzorek měl určitou nadmíru pro následné dělení na jmenovitý rozměr zkušebních těles. Další důvod pro nadmíru byla možnost posunu zkušebního vzorku při výskytu vady lepeného vzorku.

Po vytvrzení vzorků bylo přistoupeno k rozdělení na zkušební tělesa. Při průmyslové výrobě se využívá pro egalizaci bočních ploch lepeného dřeva frézka. U našich vzorků byl použit řezací stroj na dýhy (Obr. 23). Tento stroj dělí dýhy pomocí pilového kotouče a následně zarovnáva řezanou plochu hoblovacím válcem. Obráběný dílec je pevně upnut a do řezu je ručně tlačena obráběcí hlava stroje vedena po vodících lištách. Díky elektrickému hoblíku je konečný povrch dobře začištěn a připraven na další zpracování.



Obr. 23: Řezačka na dýhy MAYER FH2

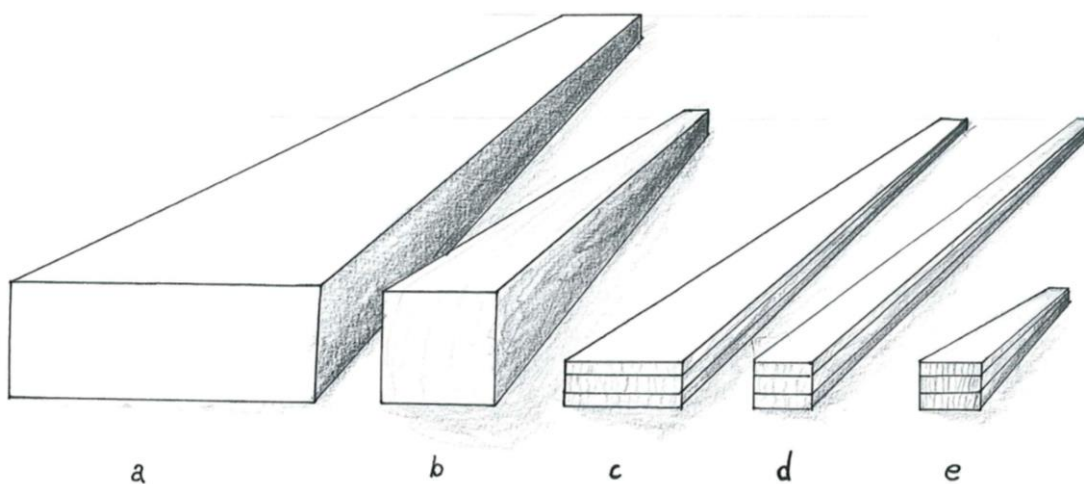
Takto připravený vzorek byl dále rozřezán na formátovací kotoučové pile. Na pile se nejprve na přebytku ověřil správný řezný rozměr a až následně se začaly rozřezávat vzorky. Jako první se řezalo podélně, což nám vytvořilo od každého vzorku dva hranolky, které mají šířku a tloušťku zkušebního tělesa.

Z jednoho hranolku se pak při stejném způsobu nastavení rozměru jako u předešlého kroku, příčně nařezaly zkušební tělesa (Obr. 24).

Na obrázku 25 je vidět postupné dělení přířezů od fošny až ke zkušebnímu tělesu.



Obr. 24: Zkušební tělesa



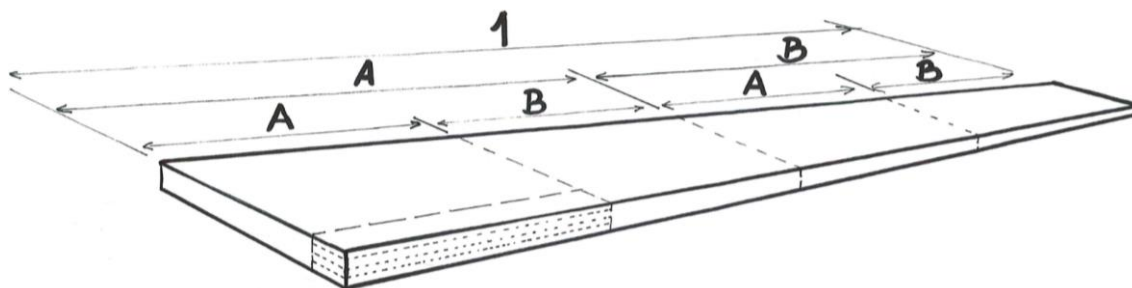
Obr. 25: Postupné přířezy

(a – fošna, b – hranol, c – lamely/vzorek, d – hranolek, e – zkušební těleso)

Kód na zkušebních tělesech

Jak již bylo výše řečeno, po každé operaci se označoval kód použitý k značení zkušebních těles. Kód zkušebních těles se skládal z číselného a písmenného označení. Ten byl rozdělen na popis před lepením a popis konečných zkušebních těles.

Před lepením, za lomítkem, je složen z čísel a písmen, která ukazují polohu hranolu ve fošně. První číslo označuje fošnu, která byla použita. Písmeno A a B označují první nebo druhou polovinu fošny. Další číslo označuje hranol od kraje řeziva. Druhé písmenné označení určuje čtvrtinu fošny. Každý hranol byl ještě tloušťkově rozdělen na 4 díly, to však pro určení polohy zkušebních těles nemá význam, jelikož byly tři z těchto čtyřech dílů následně slepeny do vzorku. Značení do této části znázorňuje obrázek 26.



Obr. 26: Postupné dělení fošny na jednotlivé přířezy

Vzorky byly před lepením rozděleny na dvě poloviny od každé dřeviny. Byla snaha o to, aby sousední hranolky byly vždy rozděleny mezi obě poloviny, aby se tak zajistilo stejných podmínek pro zkušební tělesa všech skupin. Ne vždy to bylo možné, kvůli chybám ve dřevě musely být některé lamely vyřazeny. Jedna z polovin byla připravena pro lepení polyuretanovým lepidlem a druhá pro lepení emulzním polymerizokyanátem. Po slepení se u každého vzorku předepsala značka použité dřeviny, číslo hranolku, v dané kombinaci dřeviny a lepidla, a použité lepidlo. Vzorky byly rozděleny na hranolky.

Při posledním dělení, kdy se z jednoho hranolku vytvořily tři zkušební tělesa, se psalo pořadové číslo hranolku a poslední zakroužkované číslo kódu udává polohu v hranolku i číslo skupiny pro teplotní zatěžování (Obr. 27). Díky tomu zůstává paralelnost výsledků s ostatními skupinami.



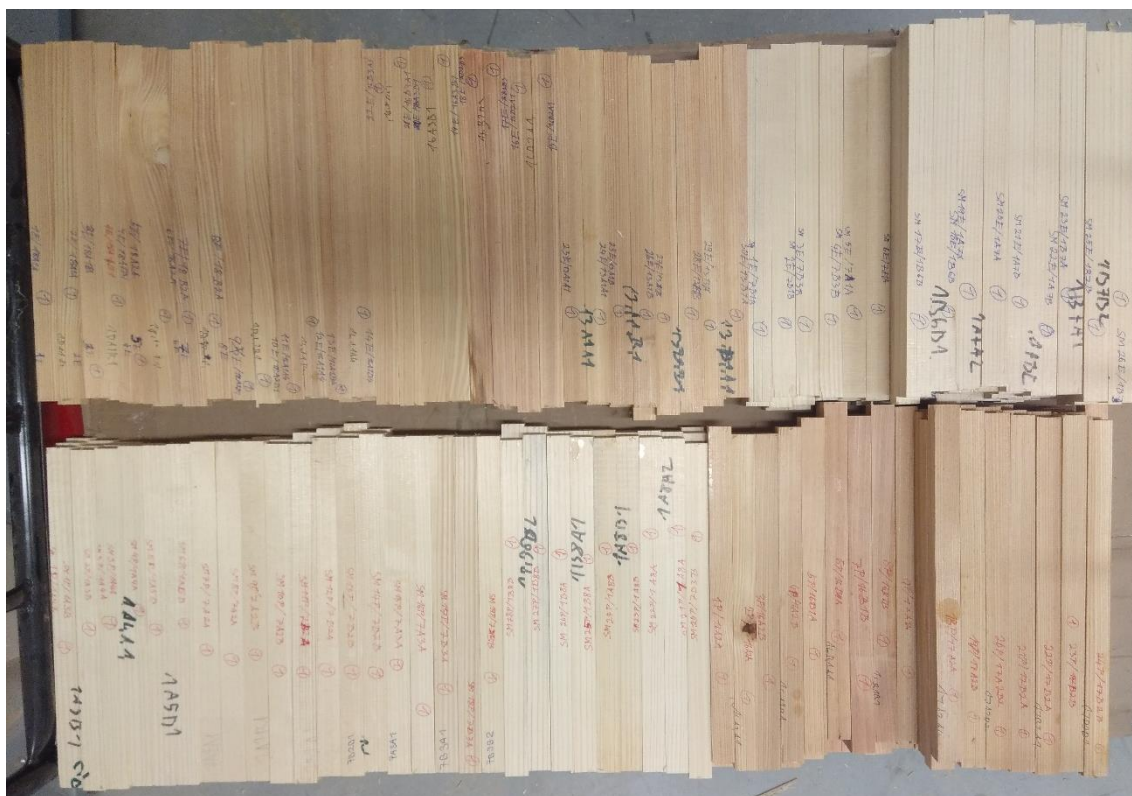
Obr. 27: Označení 3 kusů zkušebních těles z 1 kusu hranolku

Skupiny pro teplotní zatížení:

1. Skupina: -25 °C a 70 °C,
2. Skupina: -15 °C a 70 °C,
3. Skupina: Referenční zkušební tělesa.

Každá skupina tedy pro konečné posouzení výsledků obsahuje 80 kusů zkušebních těles. Z toho 20 kusů od každé možnosti kombinace dřeviny a lepidla.

Pro snadnější přehlednost byly kódy psány dvěma barvami popisovačů což je patrné na obrázku 28. Pro EPI lepidlo byl použit modrý popisovač a pro PUR lepidlo popisovač červený.



Obr. 28: Všechna popsaná zkušební tělesa připravena ke klimatizování

Klimatizování zkušebních těles

Po označení byly zkušební tělesa přemístěna do klimatizační komory Memmert, GmbH. HPP 750 uvedené na obrázku 29. Tělesa se klimatizovala na vlhkost 12 % v prostředí při podmínkách relativní vlhkost 65 ± 5 % a teploty 20 ± 2 °C, nastavených na klimatizační komoře.



Obr. 29: Klimatizační komora (Verkon s.r.o. 2020)

Podle normy ČSN EN 310 (1995) platí, že pokud se při dvou váženích hmotnosti, po sobě jdoucích v intervalu 24 hodin, neobjeví rozdíl hmotnosti tělesa větší než 0,1 %, je těleso považováno za ustálené na požadované vlhkosti. V klimatizační komoře se klimatizovala všechna zkušební tělesa a postupně se vždy odebírala skupina k dalšímu kroku experimentu.

U klimatizovaných těles se zjišťovala hmotnost a rozměry konkrétních těles. Zjišťování naměřených hodnot u zkušebních těles se provádělo na laboratorní váze KERN PCB 2500-2 (Obr. 30), která ukazuje hodnoty s přesností na setiny gramu. Přesné rozměry se stanovily pomocí posuvného měřítka od firmy KINEX Measuring model IP67 na obrázku 31. Toto posuvné měřítko má přesnost na jednu setinu milimetru. Tloušťkové a šířkové hodnoty těles se vždy měřily přibližně ve středu tělesa, kde byl předpoklad porušení tělesa vlivem zatížení ohybem při zkoušce.



Obr. 30: Laboratorní váhy od firmy KERN



Obr. 31: Digitální posuvné měřítko od firmy KINEX

Všechny naměřené veličiny byly zadávány ke konkrétnímu tělesu v programu Microsoft Excel 2016. V programu se podle vzorce 1 vypočítaly hodnoty hustoty při vlhkosti 12 %.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (1)$$

ρ – hustota,

m – hmotnost [kg],

V – objem [m³].

Po tomto kroku se podle konkrétních skupin liší další úkony.

3.2 Zatěžování teplotou zkušebních těles

Jak již bylo výše zmíněno zkušební tělesa byla rozdělena do tří skupin po 80 kusech. Skupina referenčních vzorků nebyla určena k teplotnímu zatěžování. Další dvě skupiny prošly zatížením teplotou. Skupina číslo 3. byla zatížena teplotou - 25 °C a následným ohřevem na 70 °C. Skupina číslo 2. byla zatížena teplotou - 25 °C a následným ohřevem na 70 °C.

Zatížení mrazem se provádělo v laboratorním mrazicím boxu od firmy Liebherr, typ LGT 3725 (Obr. 32). Rozdílné hodnoty mrazení se vždy nastavovaly s dostatečným předstihem. Zkušební tělesa byla podrobena působení mrazu po dobu 12 hodin. Po uplynutí doby mrazení se tělesa vyndala z laboratorního mrazicího boxu a byla zvážena hmotnost a změřeny rozměry těles pomocí laboratorní váhy a digitálního posuvného měřítka s přesností na setiny.



Obr. 32: Laboratorní mrazicí box LIEBHERR LGT 3725

Po přeměření se tělesa přesunula do sušárny Binder (Obr. 33) o objemu 118 litrů, kde byla podrobena ohřátí na $70 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 12 hodin. Po uplynutí času byla opět tělesa zvážena a změřena stejně jako v předchozím kroku.



Obr. 33: Laboratorní sušárna Binder Solid.Line, série ED-S 115

Zvážená a změřená tělesa byla uskladněna přibližně 10 hodin v nepropustné nádobě. Pak byla tělesa podrobena zkoušce v ohybu.

3.3 Zkouška v statickém ohybu

Všechny tři skupiny byly podrobeny zkoušce při použití metody třibodového statického ohybu. Pomocí této zkoušky byly u zkušebních těles zjišťovány hodnoty maximálního zatížení (F_{\max}) při porušení zkušebního tělesa a výpočet napětí při tomto zatížení. Z údajů získaných při zkoušce tělesa v ohybu vypočteme pevnost v ohybu a modul pružnosti. Vypočítaný modul pružnosti je zdánlivá hodnota, kvůli zatížení tělesa v ohybu totiž vzniká v tělesu nejen ohyb ale i smyk.

Minimální počet vzorků pro tuto zkoušku, aby byla relevantní, byl stanoven na 10 kusů od každé kombinace. V reálu se stanovil minimální počet vzorků na 20 kusů + 25 % na chybné vzorky od každé kombinace.

Podle normy ČSN 49 0115 (1979) byl použit zkušební stroj s maximální přípustnou chybou měření 1 %. Pro zkoušku byl použit zkušební trhací stroj TIRA test 2850 S E5 (Obr. 34) který má poloměr zaoblení zatěžovacích trnů 15 mm. Ovládání trhacího stroje zajišťoval software TIRA test na připojeném stolním počítači.



Obr. 34: Zkušební stroj TIRA test 2850 S E5

Na stroji byla podle normy ČSN 49 0115 (1979) nastavena rovnoměrná rozteč od středu mezi podpěrami. Pomocí zkušebního softwaru byly nastaveny výchozí údaje pro provedení zkoušky. Nastavením výchozí polohy byla získána možnost vložení zkušebních těles na podpěrné trny. Rychlostí $V_0 = 90$ mm/min bylo dosaženo dosedací síly nastavené na $F_0 = 10$ N. Po dosažení dosedací síly byla rychlost posunu automaticky

přepnuta na zkušební rychlost $V_1 = 5 - 7 \text{ mm/min}$, dle zkoušeného typu dřeviny. Touto rychlostí pokračovala zatěžovací hlava až do poklesu síly o 20 % čímž se zkouška ukončila. Rychlost posunu musela být taková, aby celková doba zatížení, od začátku zatěžování po porušení tělesa, odpovídala rozptylu mezi 60 až 90 sekundami. Na obrázku 35 je zachycen průběh zatížení. Po ukončení zatížení se hlava trhacího stroje vrátila do výchozí polohy, aby bylo možné vyjmout a vložit další zkušební těleso.



Obr. 35: Modřínové zkušební těleso zatížené statickým tříbodovým ohybem

Zkušební vzorky byly zkoušeny střídavě rubovou radiální plochou nahoru a lícovou radiální plochou nahoru.

3.4 Vyhodnocení získaných dat

Naměřené výsledky byly zapsány do programu Microsoft Excell 2016, pokaždé ke konkrétnímu zkušebnímu tělesu. V programu se následně, pro každé konkrétní těleso, vypočítaly hodnoty pro modul pružnosti E_m (N/mm^2) a pevnost v ohybu f_m (N/mm^2) podle vzorce 4 a 5. Pro případ potřeby přepočítat výsledek pevnosti v ohybu na pevnost při 12 % vlhkosti, by byl použit vzorec 6.

$$E_m = \frac{l_1^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

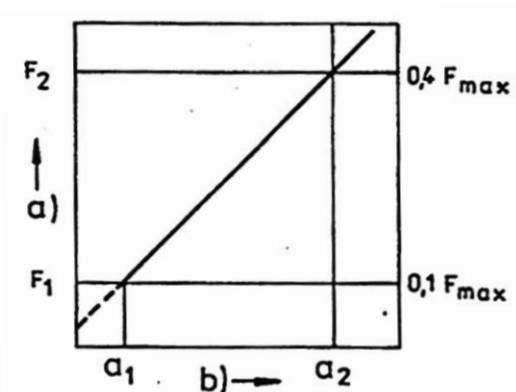
l_1 – vzdálenost mezi středy podpěr [mm],

b – šířka zkušebního tělesa [mm],

t – tloušťka zkušebního tělesa [mm],

$F_2 - F_1$ – přírůstek zatížení v přímkové části zatěžovací křivky [N] (Obr. 36). F_1 musí být přibližně 10 % a F_2 přibližně 40 % z maximálního zatížení,

$a_2 - a_1$ – přírůstek průhybu ve středu délky zkušebního tělesa (odpovídající $F_2 - F_1$).



Obr. 36: Zatěžovací křivka v oblasti pružné deformace podle ČSN EN 310 (1995)

$$f_m = \frac{3F_{max}l_1}{2bt^2} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

F_{max} – lomové zatížení [N],

l_1 – vzdálenost mezi středy podpěr [mm],

b – šířka zkušebního tělesa [mm],

t – tloušťka zkušebního tělesa [mm].

$$f_{12} = f_m [1 + a(w - 12)] \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

a – opravný vlhkostní koeficient [0,4 pro všechny dřeviny],

w – vlhkost dřeva [%].

Ověření vlhkosti zkušebních těles

Po dokončení testování zkušebních těles v statickém ohybu bylo vybráno od každé kombinace dřeviny, lepidla a teplotního zatížení 4 zkušební tělesa. Celkem bylo pro ověření vlhkosti připraveno 48 těles (3 x 16). Tyto tělesa byly vloženy do sušárny a vysušeny při teplotě 105 °C (± 2 °C) na 0% vlhkost. Následně byla tělesa zvážena a změřena. Naměřené hodnoty byly zapsány do programu Microsoft Excel 2016, kde společně s hodnotami ostatních hmotnostních a rozměrových ukazatelů použita ve vzorci 2 pro zjištění vlhkosti. Výpočty ověřili úspěšnou klimatizaci těles na vlhkost 12 % a dodatečně stanovily vlhkosti zkušebních vzorků v průběhu tepelného zatěžování.

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 = \frac{m_v}{m_0} * 100 \quad [\%] \quad (2)$$

w_{abs} – absolutní vlhkost dřeva,

m_w – hmotnost mokrého dřeva [g],

m_0 – hmotnost absolutně suchého dřeva [g],

m_v – hmotnost vody ve dřevě[g].

Vyhodnocení získaných dat

Průběžně získané a naměřené hodnoty byly shromažďovány v excelové tabulce softwaru Microsoft Excel 2016. Ze získaných dat byly pomocí vzorků 1 až 6 vypočítány hodnoty pro fyzikální a mechanické vlastnosti jednotlivých zkušebních těles. Konkrétně šlo o vlhkost, hustotu, ohybovou pevnost a modul pružnosti zkušebních těles. Veškeré tyto data byla následně vyhodnocena statisticky pomocí programu Statistica 14, spravovaných společností Tibco Inc. Zde bylo s využitím F testu použito vícefaktorové analýzy rozptylu ANOVA.

Tímto způsobem byla data vyhodnocena s maximálně 5 % chybovostí. To znamená, že hladina statistické významnosti je 0,05. Za předpokladu hodnot nižších než 0,05 lze považovat hodnocený soubor za významný. V opačném případě je tento soubor statisticky nevýznamný. Tuto hodnotu můžeme pozorovat v tabulkách ve sloupci „Hladina významnosti“.

4 Výsledky a diskuze

Výsledky diskuze jsou rozděleny do dvou částí. Pro fyzikální a mechanické vlastnosti.

Všechny zjištěné přesné hodnoty jsou uvedeny v jednotlivých tabulkách (Tabulka 1 až 13) v kapitole Přílohy.

4.1 Fyzikální vlastnosti

4.1.1 Vlhkost

Vlhkost se zjišťovala pomocí dřeva vysušeného na absolutní vlhkost. Pro každý soubor kombinací byly vysušeny na nulovou vlhkost 4 zkušební tělesa. Z těchto těles vidíme v tabulce 9 vypočítané průměrné hodnoty vlhkosti v průběhu experimentu.

Podle tabulky 9 můžeme říci, že vlhkost po mrazení zůstala prakticky nezměněná. Největší rozdíl byl u smrkového dřeva s polyuretanovým lepidlem zatíženým při teplotě -25 °C a to 1,61 %. Nejmenší rozdíl byl naopak u modřínového dřeva se stejným lepidlem zatěžovaným mrazením při teplotě -15 °C a to 0,06 %. Vyšší nárůst vlhkosti byl průměrem dán u smrkového dřeva, a naopak u modřínového dřeva byl nárůst vlhkosti pouze v řádech desetin procent. Mírný nárůst vlhkosti může být zapříčiněn vysrážením vzdušné vlhkosti na zkušebních tělesech.

U modřínového dřeva naměřil Vebr (2019) zvýšení vlhkosti mrazením při -15 °C o 3 % a u dřeva mrazeného při -25 °C zvýšení o 8,2 %. V našem výzkumu bylo tedy dosaženo menšího průměrného nárůstu vlhkosti o 0,35 %.

Naopak při ohřevu dřeva v laboratorní sušárně na teplotu 70 °C je pokles vlhkosti již znatelný. Největší rozdíl vznikl u smrkového dřeva, především v kombinaci s polyuretanovým lepidlem. Konkrétně největší rozdíl vznikl u smrkového dřeva s polyuretanovým lepidlem zatíženým mrazením na -15 °C . Tento rozdíl byl 9,93 % vlhkosti, z průměrné vlhkosti po mrazení tedy vlhkost poměrově klesla o 73,6 %. Nejmenší rozdíl vlhkosti po mrazení a vlhkosti po ohřevu byl u modřínového dřeva s polyuretanovým lepidlem zatíženým mrazením při -15 °C . Tento rozdíl byl 5,49 %, z poměru vlhkosti před ohřevem a po ohřevu klesla vlhkost o 46 %. Pokles vlhkosti je důsledek zvýšené teploty, díky níž se ze dřeva odpařovala voda.

U Hlaváčka (2019), který používal obdobné zatížení teplotou (mrazení při -25 °C) u smrku, se vlhkost dřeva po mrazení zvýšila přibližně o 2,5 % oproti hodnotám původní vlhkosti. Po ohřevu se vlhkost dřeva zmenšila přibližně o 70 % oproti dřevu po mrazení.

Tab. 9: Průměrné hodnoty vlhkosti a hustoty zkušebních těles

Dřevina	Typ lepidla	Teplota (°C)	Vlhkost			Hustota		
			W_p (%)	W_m (%)	W_k (%)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)
Smrk	PUR	reference	11,69	-	-	465,99	-	-
Smrk	PUR	-15	11,70	11,85	3,54	460,85	460,40	448,53
Smrk	PUR	-25	11,88	13,49	3,56	463,51	467,26	448,50
Smrk	EPI	reference	12,32	-	-	450,43	-	-
Smrk	EPI	-15	12,43	12,60	4,73	446,00	446,15	434,39
Smrk	EPI	-25	12,43	13,72	4,76	445,36	447,40	431,20
Modřín	PUR	reference	11,55	-	-	713,08	-	-
Modřín	PUR	-15	11,81	11,87	6,38	705,33	706,73	688,02
Modřín	PUR	-25	12,11	12,72	6,67	705,85	712,48	689,11
Modřín	EPI	reference	11,71	-	-	684,39	-	-
Modřín	EPI	-15	12,15	12,31	6,80	666,73	667,20	651,76
Modřín	EPI	-25	12,36	13,11	6,78	690,05	692,58	672,11

W_p – počáteční vlhkost zkušebních těles po klimatizaci na 12 %,

W_m – vlhkost zkušebních těles po mrazení na teplotu -15 °C/ -25 °C,

W_k – konečná vlhkost zkušebních těles po ohřevu na teplotu 70 °C,

ρ_p – počáteční hustota zkušebních těles po klimatizaci na 12 %,

ρ_m – hustota zkušebních těles po mrazení na teplotu -15 °C/ -25 °C,

ρ_k – konečná hustota zkušebních těles po ohřevu na teplotu 70 °C.

4.1.2 Hustota

Co se týká hustoty dřeva při 12% vlhkosti dosahují průměrné hodnoty u smrku s polyuretanovým lepidlem hodnot okolo 463,5 kg/m³, u smrku s emulzním polymerním izokyanátovým lepidlem je průměrná hodnota 447,3 kg/m³. Pro modřínové dřevo s PUR lepidlem je průměrná hustota při 12 % vlhkosti 708,1 kg/m³ a pro modřínové dřevo s EPI lepidlem 680,4 kg/m³. U obou dřevin tedy vidíme rozdíl přibližně 25 kg/m³ mezi PUR lepidlem a EPI lepidlem.

Podle Vavrčíka (2004) dosahuje hustota masivního dřeva při 12 % vlhkosti hodnot okolo 420 kg/m³ pro smrk a okolo 560 kg/m³ pro modřín. Například Szmotku a

kol. (2012) udává hodnoty hustoty pro smrkové dřevo 410 kg/m^3 . Naopak podle Horáčka (2008) se udává hustota modřínu 590 kg/m^3 . V experimentální práci uvádí Sviták a kol. (2014) průměrnou počáteční hustotu smrkového dřeva 414 kg/m^3 .

Z toho plyne, že použité dřeviny neodpovídají hmotností hodnotám uváděným v odborné literatuře. Za předpokladu, že všechna tělesa obsahují přibližně stejný obsah lepidla, by tedy vyplývalo, že tělesa byla vyrobena u smrku z dřeva o menší hustotě a u modřínu naopak z dřeva o větší hustotě. Rozdíly jsou způsobené přidáním lepidla, které navýšilo hustotu zkušebních těles. Další důvod je také originalita každého dřeva, mohly být právě pro použitou dřevinu rozdílné vlastnosti od specifických vlastností dřeviny.

Po mrazení byla rozměrová změna dřeva téměř nulová a hustota dřeva vzrostla minimálně. Jediný zajímavý nárůst proběhl u modřínového dřeva s polyuretanovým lepidlem zatěžovaným při $-25 \text{ }^\circ\text{C}$, kde byl rozdíl mezi hustotou před a po mrazení $6,63 \text{ kg/m}^3$. Celkově byl nárůst patrnější u modřínových těles.

Vebr (2019) ve svém výzkumu mrazil dřevo modřínu při $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ a $-25 \text{ }^\circ\text{C}$. Jeho hodnoty hustoty vzrostly minimálně, rozdíl byl jen kolem 1 kg/m^3 , dokonce u modřínu mrazeném na $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ došlo k poklesu hustoty o 1 kg/m^3 . Oproti tomuto výzkumu jsou tedy naše hodnoty vyšší.

Při ohřevu došlo k poklesu hustoty u obou dřevin. Důvodem je ohřev při teplotě $70 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, který podněcuje vypařování vody ze dřeva a sesychání. Díky tomu se zmenšily rozměry dřeva o několik desetin milimetru. Největší poměr poklesu hustoty oproti hodnotám před ohřevem, byl u smrkového dřeva s polyuretanovým lepidlem zatěžovaným při $-25 \text{ }^\circ\text{C}$, a to 4 %. Naopak nejmenší pokles byl přepočten u modřínového dřeva s EPI lepidlem, zatěžovaným při $-15 \text{ }^\circ\text{C}$, a to 2,3 %. Podobné teplotní zatěžování jako v této práci použil i Hlaváček (2019) na smrkové dřevo, které následně zatěžoval statickým třibodovým ohybem. Jeho hodnoty konečné hustoty poklesly o 4,6 % proti hustotě před ohřevem. Smrk v tomto experimentu má tedy nižší pokles hustoty. To může být zapříčiněno použitím lepeného dřeva, které má větší stabilitu.

4.2 Mechanické vlastnosti

Z mechanických vlastností byly posuzovány ohybová pevnost a modul pružnosti. Z hodnot zpracovaných statistickým programem byly zpracovány tabulky 10 a 11. Na nich vidíme statické významnosti jednotlivých posuzovaných faktorů na zjišťované mechanické vlastnosti.

Pro ohybovou pevnost jsou statisticky významnými faktory druh dřeviny, postup teplotního zatížení a typ použitého lepidla. Všechny faktory dohromady však nejsou statisticky významné.

Pro modul pružnosti jsou statisticky významné faktory druh dřeviny a typ teplotního zatížení. Naopak typ lepidla není statisticky významný a stejně tak i kombinace všech faktorů je nevýznamná jako u ohybové pevnosti.

Tab. 10: Statistické vyhodnocení ohybové pevnosti f_m

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F – Test	Hladina významnosti
Intercept	2832332	1	2832332	8927,860	0,000000
Dřevina	81357	1	81357	256,447	0,000000
Teplota	19715	2	9858	31,072	0,000000
Typ lepidla	2092	1	2092	6,595	0,010863
Dřevina * Teplota * Typ lepidla	376	2	188	0,592	0,553826
Chyba	72332	228	317		

Tab. 11: Statistické vyhodnocení modulu pružnosti E_m

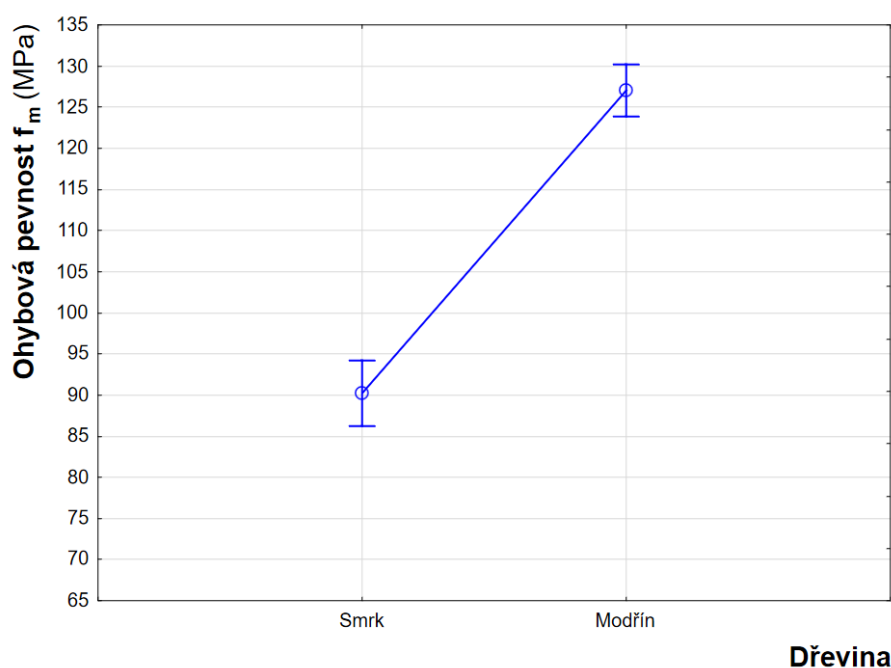
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F – Test	Hladina významnosti
Intercept	40622406566,6	1,0	40622406566,6	7993,662	0,000000
Dřevina	258918681,3	1,0	258918681,3	50,950	0,000000
Teplota	88320270,7	2,0	44160135,3	8,690	0,000231
Typ lepidla	1689452,4	1,0	1689452,4	0,332	0,564789
Dřevina * Teplota * Typ lepidla	466634,0	2,0	233317,0	0,046	0,955135
Chyba	1158656473,5	228,0	5081826,6		

Intercept = hodnota závislé proměnné, pokud jsou všechny ostatní vysvětlující proměnné hypoteticky nulové

4.2.1 Ohybová pevnost

Na dalších grafech jsou zobrazeny průměrné hodnoty závislosti na určitých faktorech pro ohybovou pevnost.

Na grafu 1 je zobrazena závislost pro dřevo smrku a modřínu. Je evidentní že u modřínu je dosaženo vyšších hodnot. Může to být zapříčiněno odlišnou hustota dřeva, která se podle předešlých výsledků tohoto měření liší mezi dřevem smrku a dřevem modřínu o 240 kg/m^3 . U dřeva smrku bylo dosaženo průměrné hodnoty ohybové pevnosti $90,2 \text{ MPa}$. Modřínové dřevo dosáhlo průměrné hodnoty $127,05 \text{ MPa}$. Dle Ugoleva (1986) jsou hodnoty ohybové pevnosti u smrku 80 MPa a u modřínového dřeva 112 MPa . Dosažení vyšších hodnot ve srovnání s rostlým dřevem je způsobeno povahou lepeného lamelového dřeva. Kdy lepením z jednotlivých dřevěných lamel mohou být lépe odstraněny přirozené vady dřeva (Matušinec 2015; Werner 2019).



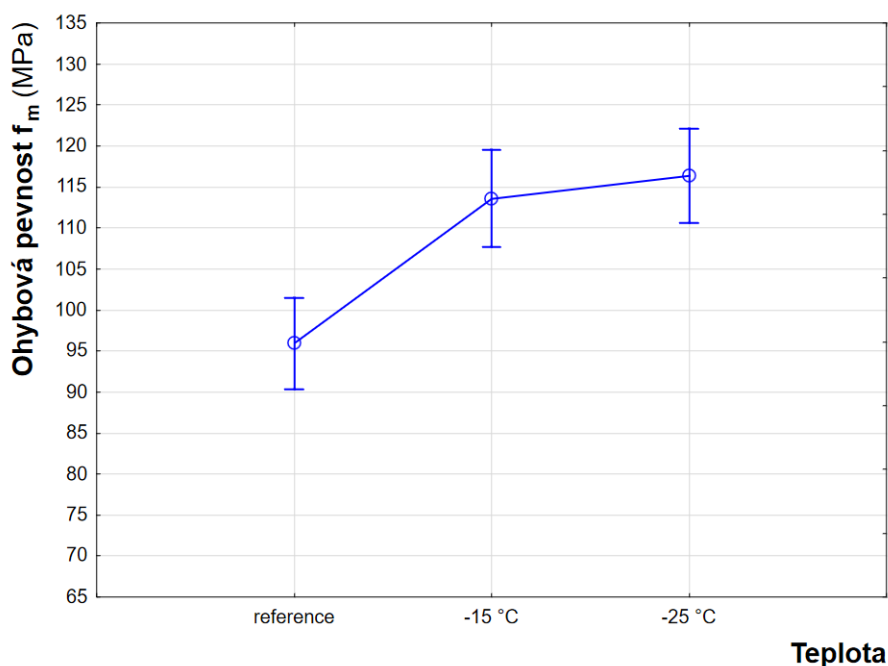
Graf 1: Závislost ohybové pevnosti na druhu dřeviny

Budeme-li brát v potaz pouze teplotní zatížení dřeva, jsou hodnoty zobrazeny v grafu 2. Z něj jasně vyplývá, že průměrná hodnota ohybové pevnosti pro referenční skupinu dřeva bez teplotního zatížení, tzn. pro dřevo při 12 % vlhkosti, je $95,9 \text{ MPa}$. Dřevo, které bylo zatíženo $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ a následně ohřevem $70 \text{ }^\circ\text{C}$ s hodnotou průměru parametru $113,6 \text{ MPa}$ má velký nárůst oproti referenční skupině, konkrétně jde o nárůst 18,5 %. U skupiny zatížené $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ a ohřevem na $70 \text{ }^\circ\text{C}$ je průměrná hodnota parametru $116,4 \text{ MPa}$. Oproti skupině se zatížením $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ atd. jde o nárůst 2 %, pro referenční skupinu platí nárůst o 21,4 %.

Podle Gerhardse (1982) dochází při mrazení na $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ ke zvýšení pevnosti v ohybu o 35 %, pokud bylo dřevo ustáleno na 11–15 % vlhkosti. Hlaváček (2019) uvádí

ve svém výzkumu po zmrazení na $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následném ohřevu na $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ u smrku nárůst hodnot ohybové pevnosti o 36 % oproti dřevu bez zatížení. Průměr u jeho masivních smrkových zkušebních těles je 95,39 MPa.

Při snižování vlhkosti se zvyšuje ohybová pevnost. Vlivem mrazení také mohlo být uvolněno napětí mezi molekulami, a tak byly zvýšeny hodnoty ohybové pevnosti. Zároveň má ale i mrazení za následek vznik trhlinek ve dřevě a díky tomu následné porušení prvku. Tento stav by byl patrný například při několika cyklických zatíženích.



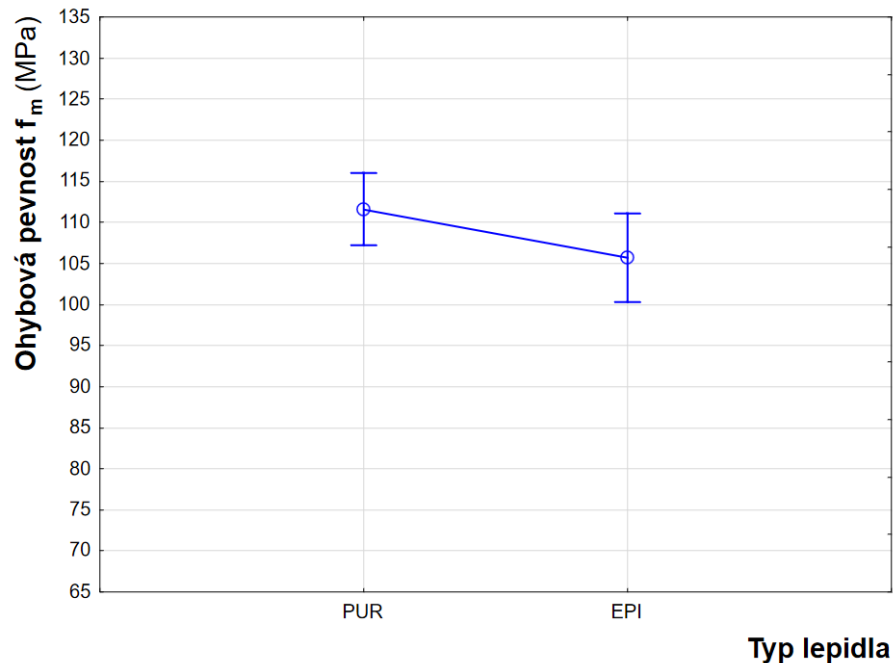
Graf 2: Závislost ohybové pevnosti na teplotním zatížení

U následujícího grafu 3 je patrné, že polyuretanové lepidlo má lepší hodnoty než emulzní polymer izokyanát. Rozptyl získaných charakteristických hodnot je také menší oproti EPI lepidlu. Což může být zapříčiněno vlastnostmi testovaných dřevin, možnými chybami při lepení, ale pravděpodobně hlavně tím, že má PUR lepidlo lepší vlastnosti než EPI lepidlo.

V práci, od autorů Sviták a kol. (2014), v které bylo zkoumáno smrkové dřevo lepeno PUR lepidlem (Kestopur 1030) v klínovém spoji, byly hodnoty ohybové pevnosti průměrně 42 MPa a modul pružnosti 8 500 MPa pro referenční skupinu. Gáborík a kol. (2016) ve svém experimentu porovnávali lepidlo PUR, UF, PVAc a kombinací posledních dvou při použití na vrstvené – lamelové dřevo. U PUR lepidla byla hodnota pevnosti v ohybu o 12 % vyšší oproti masivnímu dřevu. U PVAc lepidla bylo dosaženo o 23 %, a u modifikovaného PVAc o 14,6 % menší hodnota pevnosti v ohybu oproti

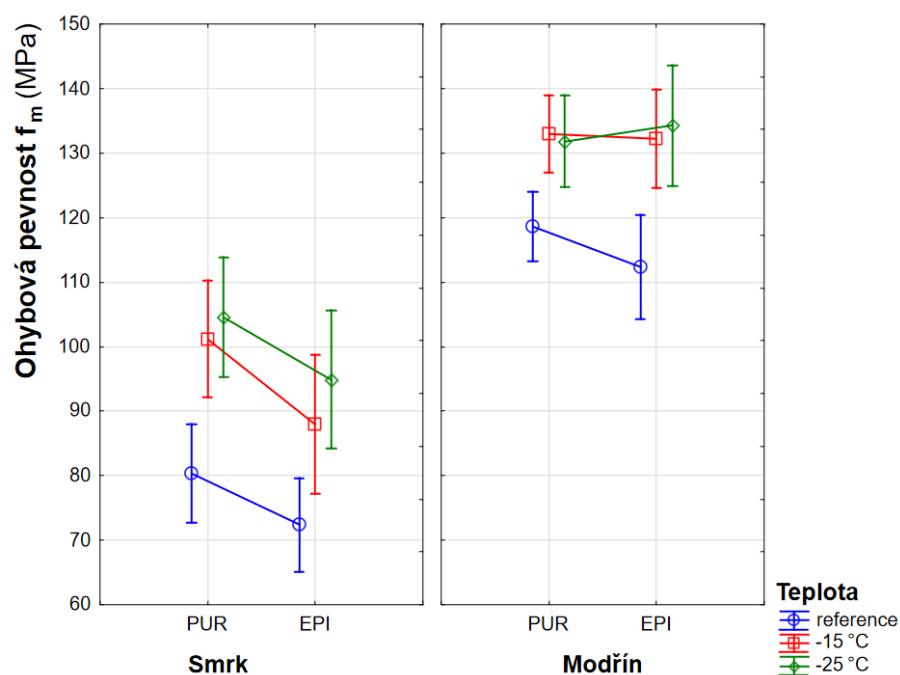
masivnímu dřevu. Karastergiou a Ntalos (2005) porovnávaly PVA a PUR lepidlo při použití na smrk evropský, kde u PUR lepidla vyšly vyšší hodnoty.

Obecně je tedy patrné, že PUR lepidlo má vždy lepší výsledky jak ve srovnání s ostatními lepidly, tak s rostlým dřevem. Tato skutečnost se potvrdila i v mých výsledcích.



Graf 3: Závislost ohybové pevnosti na typu lepidla

Z grafu 4 vyplývá, že u smrkového dřeva byly dosaženy nejvyšší výsledky v případě zatížení $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ s lepidlem PUR. Celkově má dřevo modřínu lepší výsledné průměrné hodnoty ohybové pevnosti u všech možností oproti smrku. Pro modřín vyšla jako nejvyšší kombinace $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro EPI lepidlo, avšak hodnoty pro PUR lepidlo s $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a PUR i EPI lepidlo s $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou vzdálené pouze jen průměrně o 2 MPa. Z toho vyplývá že u modřínového dřeva jsou výsledky obou lepidel i obou teplotních zatížení pro ohybovou pevnost srovnatelné. O použití druhu lepidla by tedy v případě modřínového dřeva rozhodovala cena.



Graf 4: Závislost ohybové pevnosti na současném působení všech faktorů

Podle Rowella (2013) je pro smrkové dřevo o vlhkosti 12 % průměrnou hodnotou pevnosti v ohybu 85 MPa.

Výsledné průměrné hodnoty pro ohybovou pevnost u každé kombinace jsou zaznamenány v tabulce 12.

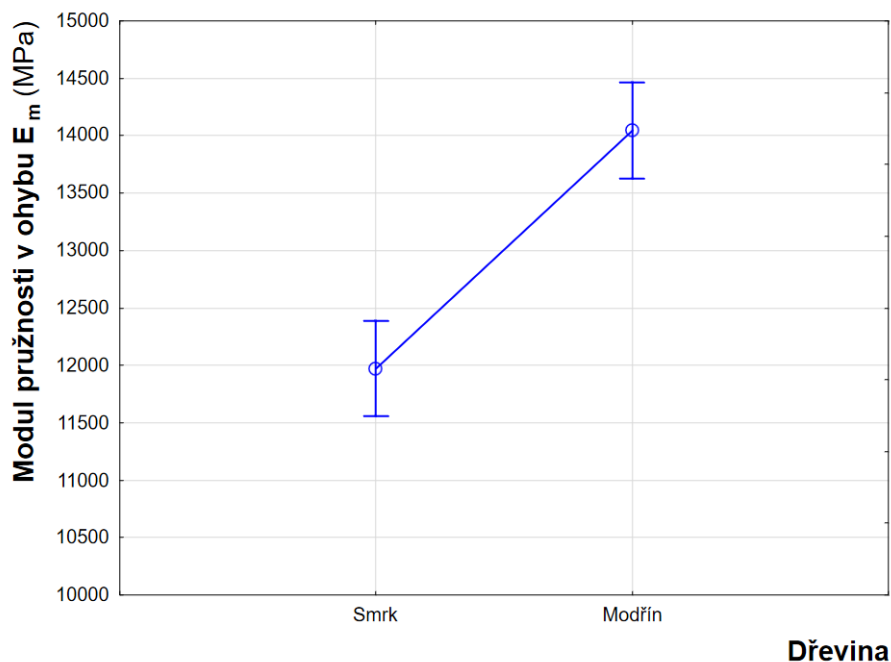
Tab. 12: Průměrné hodnoty ohybové pevnosti pro smrkové a modřínové dřevo

Dřevina	Typ lepidla	Teplota (°C)	Ohybová pevnost f_m				
			průměr (MPa)	min. (MPa)	max. (MPa)	směrodatná odchylka	standardní chyba – SE
Smrk	PUR	reference	80,4	57,6	114,2	16,261	3,64
Smrk	PUR	-15	101,2	74,9	141,8	19,360	4,33
Smrk	PUR	-25	104,6	77,3	143,7	19,802	4,43
Smrk	EPI	reference	72,3	57,2	106,5	15,356	3,43
Smrk	EPI	-15	88,0	43,2	136,4	23,080	5,16
Smrk	EPI	-25	94,9	65,8	149,4	22,875	5,11
Modřín	PUR	reference	118,6	92,6	143,8	11,477	2,57
Modřín	PUR	-15	133,0	106,2	169,9	12,837	2,87
Modřín	PUR	-25	131,8	107,4	161,7	15,129	3,38
Modřín	EPI	reference	112,3	81,9	143,8	17,215	3,85
Modřín	EPI	-15	132,3	116,4	170,4	16,252	3,63
Modřín	EPI	-25	134,3	115,9	178,4	19,952	4,46

4.2.2 Modul pružnosti

Stejně jako u ohybové pevnosti jsou průměrné hodnoty zaznamenány do grafů i u modulu pružnosti.

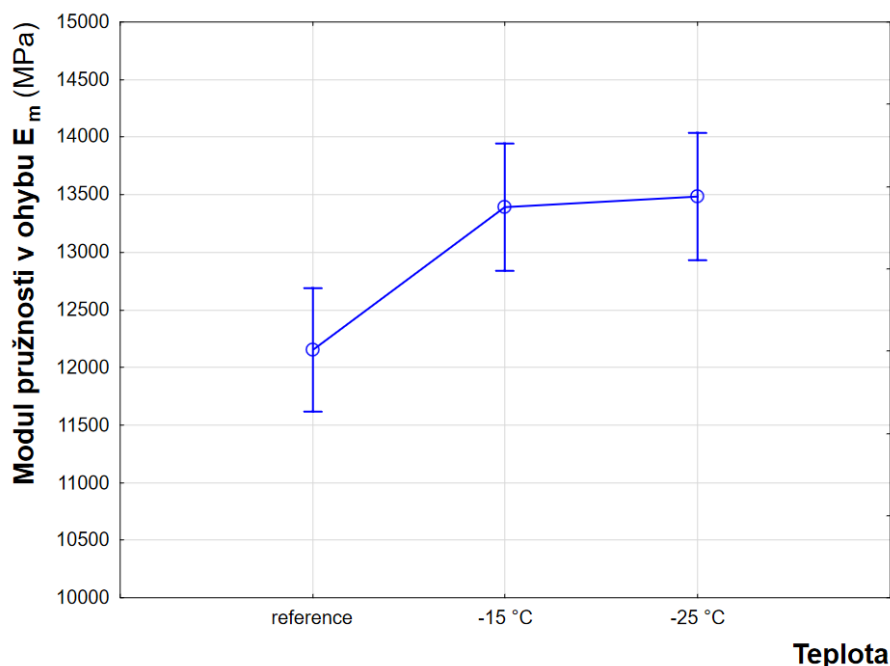
Na grafu 5 je znázorněna závislost výsledků na dřevině. Průměrná hodnota modulu pružnosti pro dřevo smrku je 11 971,4 MPa a pro dřevo modřínu 14 048,7 MPa. Dřevo modřínu v modulu pružnosti dosahuje vyšších hodnot. Je to zapříčiněno povahou lepeného lamelového dřeva. Lepením z jednotlivých dřevěných lamel mohou být lépe odstraněny přirozené vady dřeva a tím dřevo dosahuje lepších mechanicko-fyzikálních vlastností. Dle Ugoleva (1986 a 1975) jsou hodnoty modulu pružnosti u smrku 12 800 MPa a u modřínového dřeva 14 800 MPa.



Graf 5: Závislost modulu pružnosti na druhu dřeviny

Na grafu 6 pro modul pružnosti je patrné, že je zde velmi podobný nárůst hodnot jako u ohybové pevnosti. Z následujícího grafu vyplývá, že průměrná hodnota modulu pružnosti pro referenční skupinu dřeva bez teplotního zatížení je 12 153,7 MPa, tedy pro dřevo při 12 % vlhkosti. Dřevo, které bylo zatíženo $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následně ohřevem $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ s hodnotou průměru parametru 13 393,3 MPa má nárůst oproti referenční skupině. Konkrétně jde o nárůst 10,2 %. U skupiny zatížené $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a ohřevem na $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ je průměrná hodnota parametru 13 483,1 MPa. Oproti skupině se zatížením $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a ohřevem $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ jde o zanedbatelný nárůst 0,67 %. Pro referenční skupinu platí nárůst o 10,94 %.

Dle Hlaváčka (2019) vzrostl modul pružnosti u smrku, pro dřevo zmrazené na - 25 °C a ohřevu na 70 °C, o 12,3 % oproti referenčnímu smrku. Tento vzrůstající trend je tedy potvrzen i v této práci. Modul pružnosti je u dřeviny smrku mírnější než přeměna ohybové pevnosti. Z jeho výzkumu vyplývá že se snižující se vlhkostí dřeva se modul pružnosti zvětšuje.

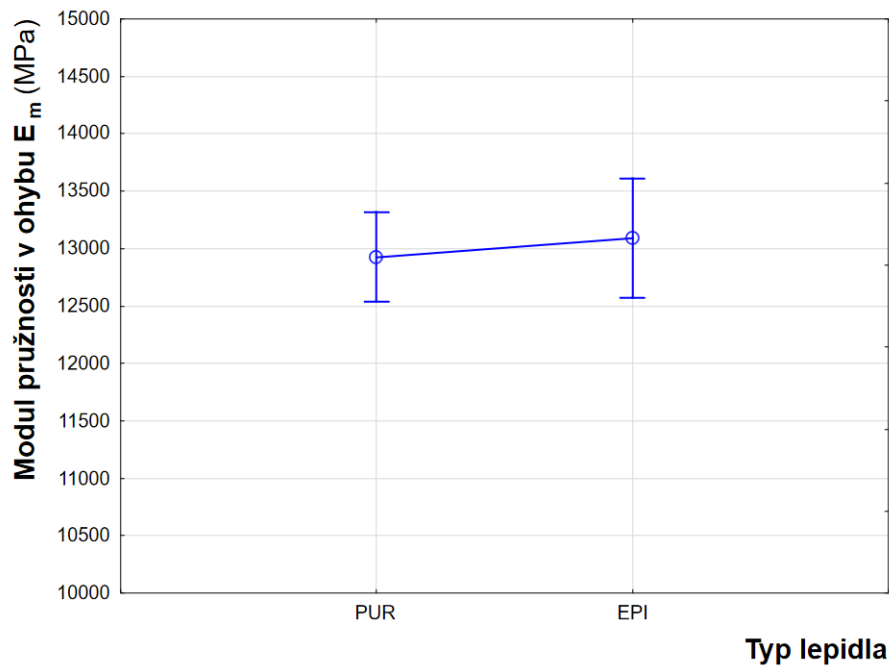


Graf 6: Závislost modulu pružnosti na teplotním zatížení

Podle grafu 7 je vidět že EPI lepidlo má lehce vyšší hodnoty pro modul pružnosti. Je tedy pružnější než PUR lepidlo. Jeho rozptyl hodnot je však širší a dá se tedy říct že více záleží i na jiných vlastnostech, jako je druh dřeviny, než u PUR lepidla kde je rozptyl hodnot 1 918,5 MPa.

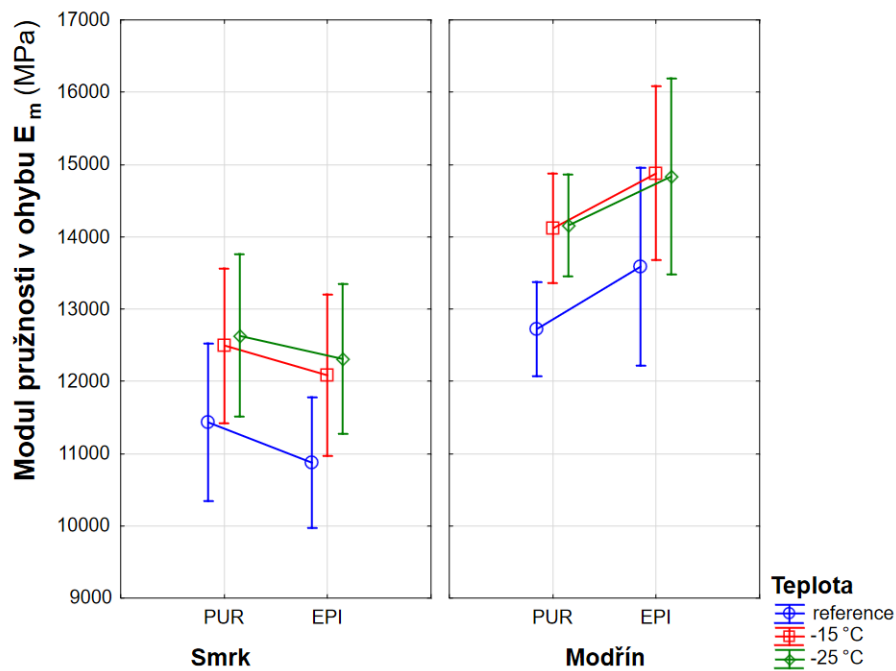
Gáborík a kol. (2016), kteří porovnávali lepidlo PUR, UF, PVAc a kombinací posledních dvou zjistili u lepidla PUR hodnotu modulu pružnosti o 22 % vyšší než u masivního dřeva. U modifikovaného PVAc byl výsledek lehce nad hodnotami masivního dřeva. U obyčejného PVAc byly hodnoty zhruba o 20 % nižší než u masivního dřeva.

U našich výsledků má EPI lepidlo srovnatelné hodnoty s PUR lepidlem. Následné použití lepidla pro konkrétní dřevinu závisí na požadovaných vlastnostech pro lepené dřevo.



Graf 7: Závislost modulu pružnosti na typu lepidla

Podle grafu 8 pozorujeme, že u smrkového dřeva jsou vyšší hodnoty u modulu pružnosti s polyuretanovým lepidlem. Naopak u modřínového dřeva bylo dosaženo vyšších hodnot modulu pružnosti s emulzním polymerním izokyanátem. U modřínových zkušebních těles je výsledek u obou teplotních zatížení prakticky srovnatelný.



Graf 8: Závislost modulu pružnosti na současném působení všech faktorů

Podle Rowella (2013) je pro smrkové dřevo o vlhkosti 12 % průměrnou hodnotou modulu pružnosti 13 400 MPa.

Výsledné průměrné hodnoty pro modul pružnosti u každé kombinace jsou zaznamenány v tabulce 13.

Tab. 13: Průměrné hodnoty modulu pružnosti pro smrkové a modřínové dřevo

Dřevina	Typ lepidla	Teplota (°C)	Modul pružnosti v ohybu E_m				
			průměr (MPa)	min. (MPa)	max. (MPa)	směrodatná odchylka	standardní chyba – SE
Smrk	PUR	reference	11436,8	8006,0	15165,7	2326,2	520,15
Smrk	PUR	-15	12490,4	9728,7	16946,4	2283,6	510,63
Smrk	PUR	-25	12633,3	9808,6	16874,5	2394,3	535,39
Smrk	EPI	reference	10874,0	8597,3	15345,3	1941,4	434,12
Smrk	EPI	-15	12084,8	8047,8	17140,7	2375,0	531,06
Smrk	EPI	-25	12308,8	8502,9	17378,1	2218,8	496,13
Modřín	PUR	reference	12718,9	10506,0	16005,3	1394,6	311,84
Modřín	PUR	-15	14120,3	11968,6	17902,3	1614,1	360,93
Modřín	PUR	-25	14156,9	11501,8	17200,9	1498,4	335,05
Modřín	EPI	reference	13585,0	9379,7	17933,1	2922,5	653,49
Modřín	EPI	-15	14877,5	11385,5	19044,7	2571,4	574,98
Modřín	EPI	-25	14833,4	10171,8	19755,4	2888,3	645,84

5 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá působením nízkých a vysokých teplot na lepené dřevo. Mezi zjišťovanými hodnotami byly fyzikální a mechanické vlastnosti v statickém tříbodovém ohybu. V rámci experimentu byly použity dřeviny smrku a modřínu v kombinaci s PUR a EPI lepidly. Lepené dřevo bylo zatěžováno teplotou $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následně $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, a druhým typem teplotního zatěžování $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následně na $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Každé zatěžování bylo nastaveno na 12 hodin mrazení a 12 hodin ohřevu. Ke skupinám zatíženými teplotou byla ještě referenční skupina, která byla pouze klimatizována na 12 % vlhkost.

Z naměřených dat je patrné že dřevo po mrazení mělo lehce větší vlhkost, kde největší rozdíl od původní vlhkosti byl 1,6 %. Ohřevem dřeva poklesla vlhkost průměrně o 57,3 %, oproti hodnotám po mrazení. U hustoty byl vliv tepelného zatěžování obdobný jako u vlhkosti.

Při zkoušce statického ohybu byly zjišťovány hodnoty ohybové pevnosti a modulu pružnosti. Nejprve byla zkoumána referenční skupina. S tou se pak porovnávaly teplotně zatížené skupiny. Při teplotním zatěžování se zvyšovaly hodnoty mechanických vlastností u dřeva zatížených $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ u smrku o 14,5 % a u modřínu o 10 %. U skupiny zatěžované $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ bylo zvýšení 14 % pro smrk a 9 % u modřínu. Lze tedy předpokládat, že při použití cyklického zatěžování by materiál postupně snižoval svou odolnost, a tak by byly hodnoty menší. To by bylo zapříčiněno následky degradace dřeva, které přirozeně vzniká při cyklickém zatížení. Těmi jsou například mrazové a výsušné trhliny. V celkovém porovnání materiálů vychází lépe dřevo modřínu a polyuretanové lepidlo. U modřínového dřeva by bylo možné uvažovat i o použití emulzního polymerního izokyanátu, kvůli velmi podobným hodnotám u zatěžovaných těles.

Výsledky zjištěné tímto výzkumem mohou být užitečné pro praxi. Především v prostředí střídání teplot, kdy může v chladnějších oblastech klesnout teplota v noci pod uvedené teploty mrazu, a naopak ve dne kdy jsou dřevěné prvky na oporu slunce může teplota povrchu vystoupat na vysoké teploty. Výsledky by mohly pomoci v navrhování konstrukčních prvků. Důležitým hlediskem je porovnání ceny vůči použití. To znamená, že v případě použití méně kvalitního dřeva, v tomto případě smrku, je nutné kombinovat jej s kvalitními lepidly, kde byl nárůst mechanických vlastností výraznější. Naopak díky svým dobrým ohybovým vlastnostem, které modřím přirozeně nabízí jako rostlé dřevo,

postačí použít EPI lepidlo, které je jednodušší na technologický postup a zpravidla vychází ekonomicky výhodněji. Vhodnou kombinací dřeva a lepidla je tedy možné při zachování požadovaných mechanických vlastností ovlivnit ekonomické náklady.

Pro lepší přesnost získaných dat by bylo možné výzkum rozšířit ještě o měření mechanických vlastností po mrazení nebo lepené dřevo po teplotním zatěžování znovu vložit do klimatizační komory a před mechanickým namáháním je ustálit na původní hodnotu vlhkosti. Dále by se dalo ještě pro posouzení vzájemné závislosti vytvořit stejná zkušební tělesa pouze z masivního dřeva bez použití lepidla a daná tělesa zatěžovat stejným způsobem jako lepené dřevo v této diplomové práci.

Seznam použité literatury

AICHER a kol., *Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology*. Dordrecht: Springer, 2013; 2014. ISBN 9789400778108; 9400778104.

AUGUSTIN a kol., M. *Timber structures-Handbook 1 of Educational materials for designing and testing of timber structures: TEMTIS*. Leonardo da Vinci Pilot Project No. CZ/06/B/F/PP/168007. Ostrava, Czech Republic: VSB-Technical University of Ostrava, 2008. 240 s.

BALABÁN, K., *Nauka o dřevě. 1. část, Anatomie dřeva*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1955. 216 s.

BÖHM a kol., *Materiály na bázi dřeva*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, 2012. 183 s. ISBN 978-80-213-2251-6.

BÖHM, M. a ZEIDLER, A. *Zajímavosti ze stavby dřeva – jak stavba dřeva ovlivňuje jeho vlastnosti*, Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce, 2018 [online]. [cit. 2020-6-7]. Dostupné z WWW:
http://silvarium.cz/sklad/Zajimavosti_stavby_dreva_2018.pdf

BOUBLÍK, V., *Lepidla a jejich příprava. 2. nezměň. vyd.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 189 s.

BOWYER, J. a kol. *Life cycle environmental performance of renewable materials in the context of building construction*. Consortium for Research on Renewable Industrial Materials, 2005.

BRAGOLE, R., *Process for coating polymeric surfaces*. U.S. Patent No 3,764,370, 1973.

CANADIAN WOOD COUNCIL, *Engineered wood products 2020* [online]. [cit. 2020-6-10]. Dostupné z WWW: <https://cwc.ca/?s=ENGINEERED+WOOD+PRODUCT>

ČSN 49 0115, *Dřevo. Zist'ovanie medze pevnosti v statickom ohybe*, 1979.

ČSN EN 14 080, *Dřevěné konstrukce: lepené lamelové dřevo*, 2013.

ČSN EN 15 425, *Lepidla: jednosložková polyurethanová lepidla pro nosné dřevěné konstrukce*. Klasifikace a základní požadavky, 2017.

ČSN EN 15 497, *Konstrukční rostlé dřevo spojované zubovitým spojem – Požadavky na funkční vlastnosti a minimální výrobní požadavky*, 2015.

ČSN EN 16 516, *Stavební výrobky – Posuzování uvolňování nebezpečných látek – Stanovení emisí do vnitřního ovzduší*, 2018.

ČSN EN 310, *Desky ze dřeva. Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu*, 1995.

ČUNDERLÍK, I. *Štruktúra dřeva*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. 135 s. ISBN 978-80-228-2061-5.

DEK a.s., *DEKWOOD, produkty*, 2020 Dekwood [online]. [cit. 2020-6-8]. Dostupné z WWW: <https://dekwood.cz/produkty>

EISNER a kol., K., *Příručka lepení dřeva 2. přepracované vydání*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966, 287s.

ENGINEERED WOOD PRODUCTS, *Engineered wood products and an introduction to timber structural systems* 2020 [online]. [cit. 2020-6-10]. Dostupné z WWW:

<http://www.structuraltimber.co.uk/assets/InformationCentre/timberframeeb2.pdf>

FENGEL, D., *Gerd Wegener. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Reprint der Originalausgabe (ehem. de Gruyter). München: Kessel, 2003. ISBN 3935638396.

GÁBORÍK, J., GAFF, M., RUMAN, D., ZÁBOROVSKÝ, V., KAŠÍČKOVÁ, V., SIKORA, A., *Adhesive as a Factor Affective the Properties of Laminated Wood*, BioResources , 2016. 10565 - 10574 s. DOI 10.15376/biores.11.4. 10565-10574.

GANDELOVÁ, L.; HORÁČEK, P.; ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. 2.vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2002. 176 s. ISBN 80-7157-577-1.

GASSON, P.E. a kol., The IAWA Committee, *IAWA list of microscopic features for softwood identification*, Published for the International Association of Wood Anatomists at the Nationaal Herbarium Nederland, Leiden, The Netherlands 2004. IAWA Journal 25 (1): 1–70, str 20 [online]. [cit. 2020-6-8]. Dostupné z WWW: https://www.iawa-website.org/uploads/soft/Abstracts/01_IAWA-Softwood_List.pdf

GERHARDS, CC., *Effect of the moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects*. Wood Fiber, 1982. 14(1):4–36.

GLASS, S. V., ZELINKA, S. L., *Moisture relations and Physical Properties of Wood*. In Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Madison: U.S. Dept of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. s. 80-99.

GRØSTAD, K., PEDERSEN, A., *Emulsion Polymer Isocyanates as Wood Adhesive: A Review*, Journal of Adhesion Science and Technology, 2010. 24:8-10, 1357-1381, DOI: 10.1163/016942410X500981, ISSN: 0169-4243 (Print) 1568-5616 [online]. [cit. 2020-5-21]. Dostupné z WWW: <https://www.tandfonline.com/loi/tast20>

GRUBER, N.J., POWELL, C.E. *Aqueous hydroxyl-acrylic latex and water dispersible multi-isocyanate adhesive composition*. U.S. Patent No 4,609,690, 1986.

HAVELKA, Š., *Lepení sendvičových střešních panelů při výrobě autobusů v podmínkách SOR Libchavy*. 2011. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.

HLAVÁČEK, J. *Mechanické vlastnosti dřeva vystaveného teplotnímu zatížení*, Praha, 2019. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta lesnická a dřevařská. Katedra zpracování dřeva a biomateriálů. Vedoucí práce Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

HOADLEY, R. B., *Understanding wood: A craftsman's guide to wood technology*. 1. vyd. Newtown: The Taunton Press, 2000. 280 s. ISBN 1-56158-358-8

HORÁČEK, P., *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. 2. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.

KAMENICKÝ, J. a RIZMANOVÁ, M., *Materiály pro 1. až 3. ročník SOU učebních oborů zpracování dřeva*, Třetí nezměněné vydání, Praha SNTL 1990. 115 s. ISBN 80-03-00388-1

KARASTERGIOU S. a NTALOS G., *Bending strength properties of scarf jointed european spruce wood (Picea excelsa)*, Technological Education Institute of Larissa, Karditsa Branch, Dept. of Wood & Furniture Design, Oct. 2005. p. 15-17.

KIILTO Oy, *Technický list Kestokol WR 11*, 2017. 1 s. [online]. [cit. 2020-5-21]. Dostupné z WWW: <https://www.kiilto.com/fi/>

KIILTO Oy, *Technický list Kestopur 1030*, 2017. 1 s. [online]. [cit. 2020-5-22]. Dostupné z WWW: <https://www.kiilto.com/fi/>

KOLB, J., *Systems in Timber Engineering: Loadbearing Structures and Component Layers*. Basilej: Birkenhäser, 2008. 317 s. ISBN 978-3-7643-8689-4

KOLLMANN, F. F. P., COTE, W. A., Jr. *Principles of Wood Science and Technology: I. Solid Wood*. Springer Science & Business Media, 2012, 592 s. ISBN 978-3-64287-928-9

KOŽELUH, B., *Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5, STEP 1: Navrhování a konstrukční materiály*. 1. vyd. Zlín: Bohumil Koželuh, 1998. 456 s. ISBN 80-238-2620-4.

POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M., *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vyd. Bratislava: Príroda a. s., 1997. 488 s. ISBN 80-07-00960-4.

SHMULSKY, R., JONES, P. D., *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. 6. vyd. Wiley-Blackwell, 2011. 496 s. ISBN 978-0-8138-2074-3

KRÁL, J. *Lepené dřevěné střešní konstrukce: stručný popis: učební obor tesař*. 1. vyd. Praha: Práce, 1960. 31 s.

KRÁL, P., *Dýhy, překližky a lepené materiály*. doc. Dr. Ing. KRÁL, P. Mendelova univerzita v Brně, 2011. 241 s. ISBN 978-80-7375-552-2.

KRYSTOFIAK a kol., T., *Forestry Wood Technol*, 2003. 214–217s.

KUBOJIMA, Y., a TONOSAKI, M., Young's and shear moduli of glued laminated timber composed of different species obtained by a flexural vibration test. *Holzforschung*. 2012, vol. 66, no. 7, s. 871-875. ISSN 0018-3830.

KUKLÍK, P., *Dřevěné konstrukce. Vyd. 1. České vysoké učení technické v Praze. Stavební fakulta*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005. 188 s. ISBN 8001033104;9788001033104;.

LIPTÁKOVÁ, E. a SEDLIAČIK M., *Chémia a aplikácia pomocných látok v drevárskom priemysle*. Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava, 1989. 520 s. ISBN 80-05-00116-9.

MATUŠINEC, L., *Posouzení procesu delaminace lepených materiálů*, Bakalářská práce, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2015, 131 s.

MUDRA, F., *Materiály na bázi dřeva pro nosné účely*, Bakalářská práce, Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta lesnická a dřevařská. Katedra zpracování dřeva a biomateriálů. Vedoucí práce Ing. Martin Böhm, 2011, 52 s.

MUZIKÁŘ a kol., *Materiály II pro učební obor Truhlář*, Praha, INFORMATORIUM, 2008. 175 s. ISBN 978-80-7333-061-3

NETOPILOVÁ, M., *Stavební materiály*, Doc. Ing. Miroslava Netopilová, CSc. Učební texty pro posluchače Fakulty bezpečnostního inženýrství Netopilová M., Ostrava, 2004 ISBN: 80-86634-27-2

PERELYGIN, L. M., *Náuka o dreve*. 2. vyd. Bratislava: SVTL, 1965. 444 s.

- ROWELL, R. M., *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. 2. vydání, Boca Raton: CRC Press, 2012, 703 s. ISBN 978-1-43985-380-1
- SLONEK, M., *Porovnání vybraných typů lepených konstrukčních hranolů pro použití v dřevostavbách*, Bakalářská práce, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2006, 51 s.
- SOVÁK, Z., *Posouzení vlastností vrstvených masivních desek*, Bakalářská práce, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2012, 66s.
- STEICO SK, *STEICO LVL – Výroba lepeného vrstveného dřeva*, 2019 [online]. [cit. 2020-6-8]. Dostupné z WWW: https://www.youtube.com/channel/UC3Kn0f1h3zon1x_srPa8lfQ
- SVITÁK, M., *Heat Resistance of Glued Finger Joints in Spruce Wood Constructions*. Bioresources. 2014, vol. 9, no. 4, s. 7529-7541. ISSN 1930-2126.
- SZMUTKU, M., CAMPEAN, B., LAURENZI, M., *Wilhelm. Influence of cyclic freezing and thawing upon spruce wood properties*. *Pro Ligno*, 2012, 35 - 43 s. Vol. 8 Issue 1.
- ŠLEZINGEROVÁ, J. a GANDELOVÁ, L. *Stavba dřeva*. Dotisk 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2005. 187 s. ISBN 80-7157-636-0.
- ŠTEFKA, V., *Kompozitné drevné materiály Část 2: Technologí aglomerovaných materiálů*, Technická univerzita vo Zvolene, 2002.
- ŠUSTÁČEK, J., *Odolnost lepené spáry dřeva proti vyšším teplotám*. Brno, 2016. 58 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
- TRÁVNÍK, A., *Technologické procesy výroby nábytku*. Vyd. 1. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2007. ISBN 9788073750565;8073750562;.
- UGOLEV, B. N. *Wood science and basis of commodity science*. Lesnaja promislennostj, Moscow, 1986.
- UGOLEV, B. N. *Wood Science with Basics of Forest Merchandising*. 1975.
- VAVRČÍK, H., *Anatomická stavba dřeva: Lexikon dřeva*, Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2004 [online]. [cit. 2020-6-7]. Dostupné z WWW: https://ldf.mendelu.cz/unod/multimedia/stavba_dreva/lexikon/index.htm

VEBR, V., *Vliv nízkých teplot na tvrdost dřeva*. Praha, Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta lesnická a dřevařská. Katedra zpracování dřeva a biomateriálů. Vedoucí práce Ing. Miroslav Gašparík, PhD., 2019.

VERKON s.r.o., verkon.cz, *klimatizační komory memmert hpp s peltierovými clanky*, [online]. [cit. 2020-6-1]. Dostupné z WWW: <https://www.verkon.cz/komora-klimatizacni-memmert-hpp-s-peltierovymi-clanky/>

WERNER, G. a ZIMMER, K., *Holzbau 1: Grundlagen DIN 1052 (neu 2008) und Eurocode 5*. 4. vyd. Berlín: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 370 s. ISBN 978-3-540-95859-8.

WERNER, M., *Mechanické chování lepeného spoje masivního a tepelně upraveného dřeva*, Bakalářská práce, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2020, 76 s.

WEYERHAEUSER, *Wood products*, 2020 [online]. [cit. 2020-6-10]. Dostupné z WWW: <https://www.weyerhaeuser.com/woodproducts/>

WIEDENHOFTEN a kol., A, *Structure and Function of Wood, Wood Handbook Wood as an Engineering Material Forest Products Laboratory*. Wood handbook—Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010. 508 s. [online]. [cit. 2020-6-1]. Dostupné z WWW: www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf

ZEIDLER, A. *Lexikon dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2012, 61 s. [online]. [cit. 2020-6-7]. Dostupné z WWW: <https://docplayer.cz/4041658-Ceska-zemedelska-univerzita-vpraze-fakulta-lesnicka-a-drevarska-lexikon-dreva.html>

ZHENG, J.; PAYTON, E.; REED, C.; G. NIECKARZ, *PCT WO 2007/056357* (2007)

ZIMMERMAN, M. H.: *Xylem Structure and the Ascent of Sap*. Berlin - Heidelberg: Springer -Verlag, 1983, 146 s. ISBN 0-540-12268-0

Přílohy

Seznam příloh

Tabulka 1: Získané hodnoty pro referenční smrková zkušební tělesa s PUR lepidlem	2
Tabulka 2: Získané hodnoty pro referenční smrková zkušební tělesa s EPI lepidlem	3
Tabulka 3: Získané hodnoty pro referenční modřínová zkušební tělesa s PUR lepidlem	4
Tabulka 4: Získané hodnoty pro referenční modřínová zkušební tělesa s EPI lepidlem	5
Tabulka 5: Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa zatížená teplotami -15 °C a 70°C s PUR lepidlem	6
Tabulka 6: Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa zatížená teplotami -15 °C a 70°C s EPI lepidlem	7
Tabulka 7: Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa zatížená teplotami -15 °C a 70°C s PUR lepidlem	8
Tabulka 8: Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa zatížená teplotami -15 °C a 70°C s EPI lepidlem.....	9
Tabulka 9: Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa zatížená teplotami -25 °C a 70°C s PUR lepidlem	10
Tabulka 10: Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa zatížená teplotami -25 °C a 70°C s EPI lepidlem.....	11
Tabulka 11: Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa zatížená teplotami -25 °C a 70°C s PUR lepidlem	12
Tabulka 12: Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa zatížená teplotami -25 °C a 70°C s EPI lepidlem.....	13
Tabulka 13: Průměrné hodnoty vlhkosti a hmotnosti	14

Tabulka 1: Získané hodnoty pro referenční smrková zkušební tělesa s PUR lepidlem

Kód					Dřevina	Lepidlo	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	P_k (kg/m ³)	F_{max} (N)	F_x (N)	a (mm)	E_m (MPa)	f_m (MPa)
1	1	A	3	B	SM	PUR	Ref.	379,9	-	-	762,9	228,1	1,4	8006,01	57,64
2	1	A	3	B	SM	PUR	Ref.	409,0	-	-	876,1	262,7	1,4	9318,42	66,62
3	1	A	4	A	SM	PUR	Ref.	432,9	-	-	925,0	277,4	1,3	10511,33	72,31
4	1	A	4	A	SM	PUR	Ref.	408,7	-	-	818,2	245,2	1,3	9647,22	64,04
7	7	A	2	A	SM	PUR	Ref.	518,3	-	-	1225,9	367,7	1,3	14029,93	95,09
8	7	A	2	A	SM	PUR	Ref.	575,7	-	-	1387,3	415,9	1,4	15165,70	108,17
9	7	A	2	B	SM	PUR	Ref.	535,8	-	-	1268,8	380,6	1,3	14344,87	98,47
10	7	A	2	B	SM	PUR	Ref.	549,4	-	-	1246,3	373,4	1,3	14590,63	98,00
11	7	B	2	A	SM	PUR	Ref.	445,6	-	-	1017,4	305,2	1,3	11886,97	79,07
12	7	B	2	A	SM	PUR	Ref.	561,0	-	-	1463,7	438,4	1,4	15141,07	114,15
13	7	B	2	B	SM	PUR	Ref.	549,9	-	-	1332,7	399,1	1,4	14425,81	102,59
14	7	B	2	B	SM	PUR	Ref.	454,9	-	-	1046,4	313,1	1,3	11767,53	79,82
15	7	A	3	A	SM	PUR	Ref.	436,5	-	-	936,4	280,9	1,3	10162,79	70,95
17	7	B	3	A	SM	PUR	Ref.	439,0	-	-	983,9	294,9	1,3	11326,81	76,33
18	7	B	3	A	SM	PUR	Ref.	435,5	-	-	954,3	286,6	1,4	10600,92	74,69
21	1	A	8	A	SM	PUR	Ref.	445,8	-	-	948,2	284,5	1,4	10068,66	74,10
22	1	A	8	A	SM	PUR	Ref.	433,4	-	-	932,5	279,5	1,4	9854,00	71,83
23	1	A	8	B	SM	PUR	Ref.	453,1	-	-	883,9	264,1	1,4	9323,54	69,09
24	1	A	8	B	SM	PUR	Ref.	440,2	-	-	889,6	266,7	1,5	9168,02	69,78
25	1	B	8	A	SM	PUR	Ref.	415,2	-	-	839,3	251,7	1,3	9395,21	65,09

Tabulka 2: Získané hodnoty pro referenční smrková zkušební tělesa s EPI lepidlem

Kód		Dřevina	Lepidlo	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	P_k (kg/m ³)	F_{max} (N)	F_x (N)	a (mm)	E_m (MPa)	f_m (MPa)
1	7 B 1 B	SM	EPI	Ref.	544,5	-	-	883,3	264,5	1,1	12473,37	70,80
2	7 B 1 B	SM	EPI	Ref.	600,5	-	-	1279,1	383,4	1,3	15345,33	102,65
3	7 B 3 B	SM	EPI	Ref.	523,6	-	-	1065,3	319,9	1,5	11250,72	85,20
4	7 B 3 B	SM	EPI	Ref.	531,6	-	-	1119,5	335,9	1,3	13060,32	89,07
5	7 A 1 A	SM	EPI	Ref.	588,0	-	-	1359,5	408,0	1,4	14833,94	106,50
6	7 A 1 A	SM	EPI	Ref.	576,4	-	-	1223,1	366,6	1,4	13354,37	97,38
9	1 B 3 A	SM	EPI	Ref.	430,7	-	-	919,3	276,3	1,3	10823,62	72,85
10	1 B 3 A	SM	EPI	Ref.	421,9	-	-	885,0	265,6	1,3	10565,76	71,67
11	1 A 6 A	SM	EPI	Ref.	390,2	-	-	781,8	234,1	1,3	9693,82	62,55
12	1 A 6 A	SM	EPI	Ref.	415,2	-	-	846,4	253,8	1,2	10661,73	67,68
14	1 A 6 B	SM	EPI	Ref.	406,5	-	-	797,9	239,2	1,3	9409,67	62,49
15	1 B 6 A	SM	EPI	Ref.	401,4	-	-	729,0	218,1	1,1	9844,77	57,35
16	1 B 6 A	SM	EPI	Ref.	385,9	-	-	761,1	227,7	1,2	9667,87	60,33
17	1 B 6 B	SM	EPI	Ref.	396,4	-	-	716,9	215,2	1,1	9961,45	57,15
18	1 B 6 B	SM	EPI	Ref.	385,1	-	-	755,4	226,7	1,2	9403,29	60,26
19	1 A 7 A	SM	EPI	Ref.	402,0	-	-	799,0	239,9	1,3	9604,40	64,57
20	1 A 7 A	SM	EPI	Ref.	419,0	-	-	886,4	266,0	1,3	10638,00	70,85
21	1 A 7 B	SM	EPI	Ref.	401,8	-	-	773,6	232,4	1,4	8765,42	62,03
22	1 A 7 B	SM	EPI	Ref.	413,1	-	-	800,4	240,2	1,3	9524,05	64,06
25	1 B 7 B	SM	EPI	Ref.	375,1	-	-	766,1	229,9	1,4	8597,30	61,34

Tabulka 3: Získané hodnoty pro referenční modřínová zkušební tělesa s PUR lepidlem

Kód					Dřevina	Lepidlo	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	P_k (kg/m ³)	F_{max} (N)	F_x (N)	a (mm)	E_m (MPa)	f_m (MPa)
1	16	A	2	A	MD	PUR	Ref.	686,6	-	-	1612,6	483,7	1,5	14012,34	115,51
3	16	A	2	B	MD	PUR	Ref.	642,4	-	-	1580,8	474,1	1,4	14289,86	112,37
4	16	A	2	B	MD	PUR	Ref.	630,1	-	-	1641,1	493,0	1,5	14279,97	116,60
5	16	B	1	A	MD	PUR	Ref.	673,4	-	-	1772,5	531,2	1,7	13537,22	126,28
6	16	B	1	A	MD	PUR	Ref.	699,1	-	-	1778,6	533,3	1,8	12798,24	127,28
7	16	B	1	B	MD	PUR	Ref.	751,9	-	-	1534,7	460,1	1,8	11145,25	108,41
8	16	B	1	B	MD	PUR	Ref.	687,5	-	-	1599,4	481,2	1,8	10974,64	111,45
9	17	A	1	A	MD	PUR	Ref.	737,1	-	-	1784,3	535,5	1,9	12012,74	126,20
10	17	A	1	A	MD	PUR	Ref.	717,6	-	-	1333,7	400,2	1,3	12504,66	92,58
12	17	A	1	B	MD	PUR	Ref.	786,4	-	-	2011,0	604,0	1,9	13909,96	143,81
13	17	B	1	A	MD	PUR	Ref.	724,5	-	-	1435,9	430,2	1,6	11491,40	102,38
14	17	B	1	A	MD	PUR	Ref.	673,5	-	-	1467,6	440,5	1,7	11571,86	104,50
15	17	B	1	B	MD	PUR	Ref.	700,2	-	-	1723,2	517,6	1,7	13635,36	123,52
17	17	A	2	A	MD	PUR	Ref.	760,9	-	-	1808,9	543,0	1,9	12330,25	126,31
18	17	A	2	A	MD	PUR	Ref.	716,9	-	-	1699,7	509,8	1,8	12030,66	121,60
19	17	A	2	B	MD	PUR	Ref.	751,1	-	-	1751,8	525,5	2,0	11476,35	123,64
20	17	A	2	B	MD	PUR	Ref.	777,3	-	-	1702,9	511,2	2,0	10506,01	118,28
21	17	B	2	A	MD	PUR	Ref.	720,0	-	-	1881,4	563,7	1,5	16005,27	132,24
22	17	B	2	A	MD	PUR	Ref.	702,5	-	-	1671,1	500,9	1,7	12386,96	116,72
24	17	B	2	B	MD	PUR	Ref.	722,9	-	-	1792,9	536,9	1,6	13479,43	123,12

Tabulka 4: Získané hodnoty pro referenční modřínová zkušební tělesa s EPI lepidlem

Kód					Dřevina	Lepidlo	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	P_k (kg/m ³)	F_{max} (N)	F_x (N)	a (mm)	E_m (MPa)	f_m (MPa)
1	18	A	1	A	MD	EPI	Ref.	661,0	-	-	1549,4	465,5	1,5	13578,33	109,04
2	18	A	1	A	MD	EPI	Ref.	650,2	-	-	1420,1	425,9	1,5	12054,46	101,10
3	18	A	1	B	MD	EPI	Ref.	656,5	-	-	1522,6	456,6	1,6	12332,53	109,11
4	18	A	1	B	MD	EPI	Ref.	630,2	-	-	1318,8	395,6	1,6	10820,69	96,64
5	18	A	2	A	MD	EPI	Ref.	671,1	-	-	1111,3	333,4	1,2	12875,48	81,92
6	18	A	2	A	MD	EPI	Ref.	674,1	-	-	1404,1	420,9	1,5	12619,24	102,43
7	18	B	2	A	MD	EPI	Ref.	727,0	-	-	1905,3	571,2	1,5	16749,99	134,82
8	18	B	2	A	MD	EPI	Ref.	680,5	-	-	1763,9	529,0	1,5	14951,01	123,88
15	16	B	2	A	MD	EPI	Ref.	617,1	-	-	1468,0	439,1	1,8	11182,76	106,94
16	16	B	2	A	MD	EPI	Ref.	657,1	-	-	1454,8	435,9	1,8	10743,56	105,75
17	16	B	2	B	MD	EPI	Ref.	651,3	-	-	1436,9	431,2	1,8	10213,37	102,31
18	16	B	2	B	MD	EPI	Ref.	685,7	-	-	1349,8	404,1	1,9	9379,71	98,52
21	16	B	3	A	MD	EPI	Ref.	672,2	-	-	1307,7	392,0	1,9	9529,10	96,13
22	16	B	3	A	MD	EPI	Ref.	685,2	-	-	1606,5	482,3	1,7	12749,13	118,19
23	13	A	1	A	MD	EPI	Ref.	733,6	-	-	1373,7	411,9	1,3	15066,48	104,36
24	13	A	1	A	MD	EPI	Ref.	723,3	-	-	1357,7	408,0	1,3	15705,46	103,53
25	13	A	1	B	MD	EPI	Ref.	711,1	-	-	1786,4	535,1	1,5	17805,36	142,54
26	13	A	1	B	MD	EPI	Ref.	704,4	-	-	1589,7	476,6	1,4	17740,78	127,14
27	13	B	1	B	MD	EPI	Ref.	742,1	-	-	1843,5	553,0	1,6	17669,31	143,78
28	13	B	1	B	MD	EPI	Ref.	754,1	-	-	1772,1	531,5	1,5	17933,07	137,88

Tabulka 5: Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa zatížená teplotami -15 °C
a 70°C s PUR lepidlem

Kód				Dřevina	Lepidlo	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	F_{max} (N)	F_x (N)	a (mm)	E_m (MPa)	f_m (MPa)	
1	1	A	3	B	SM	PUR	-15	387,7	390,2	377,1	980,8	294,5	1,6	9728,70	79,57
2	1	A	3	B	SM	PUR	-15	404,8	407,1	395,3	1027,2	307,8	1,5	10531,83	82,38
3	1	A	4	A	SM	PUR	-15	429,0	424,9	414,7	1022,9	306,7	1,5	10820,61	84,67
4	1	A	4	A	SM	PUR	-15	404,7	406,7	390,6	916,5	274,9	1,5	10124,95	74,91
5	1	A	5	B	SM	PUR	-15	383,1	381,4	369,7	986,5	295,6	1,6	9939,60	81,99
6	1	A	5	B	SM	PUR	-15	408,2	410,0	396,0	1097,2	328,8	1,7	10938,07	91,57
8	7	A	2	A	SM	PUR	-15	580,0	575,6	566,7	1539,9	461,6	1,5	16946,38	128,96
9	7	A	2	B	SM	PUR	-15	529,0	531,5	517,6	1441,0	432,4	1,5	15318,88	119,75
10	7	A	2	B	SM	PUR	-15	549,4	546,8	534,3	1456,4	437,3	1,5	15556,11	120,95
11	7	B	2	A	SM	PUR	-15	454,7	455,6	441,6	1261,1	377,7	1,7	12319,80	104,20
12	7	B	2	A	SM	PUR	-15	566,6	571,6	554,1	1707,7	512,7	1,7	16323,34	141,75
13	7	B	2	B	SM	PUR	-15	554,1	555,0	545,0	1650,6	495,5	1,7	15739,58	134,41
14	7	B	2	B	SM	PUR	-15	456,0	454,9	443,7	1287,9	386,7	1,5	13447,66	105,43
15	7	A	3	A	SM	PUR	-15	421,4	413,6	407,5	1058,3	317,8	1,5	11032,93	85,88
16	7	A	3	A	SM	PUR	-15	454,9	451,0	441,7	1360,0	408,8	1,8	12461,21	111,25
17	7	B	3	A	SM	PUR	-15	444,7	446,0	430,2	1122,9	336,3	1,6	11355,18	92,76
18	7	B	3	A	SM	PUR	-15	436,7	439,1	427,8	1146,1	344,1	1,7	11255,22	95,51
19	7	B	3	B	SM	PUR	-15	462,5	464,4	451,1	1240,0	371,6	1,6	12873,98	102,47
20	7	B	3	B	SM	PUR	-15	441,3	438,7	429,2	1091,8	328,4	1,6	11580,56	91,11
21	1	A	8	A	SM	PUR	-15	448,3	443,8	436,7	1126,5	338,1	1,6	11513,29	94,04

Tabulka 6: Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa zatížená teplotami -15 °C
a 70°C s EPI lepidlem

Kód				Dřevina	Lepidlo	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	P_k (kg/m ³)	F_{max} (N)	F_x (N)	a (mm)	E_m (MPa)	f_m (MPa)	
1	7	B	1	B	SM	EPI	-15	559,2	556,3	543,8	1135,8	340,6	1,4	15237,77	101,71
2	7	B	1	B	SM	EPI	-15	602,7	604,0	590,6	1311,4	394,2	1,3	17140,65	114,06
3	7	B	3	B	SM	EPI	-15	512,3	506,1	501,0	1200,7	360,2	1,5	13032,38	100,89
4	7	B	3	B	SM	EPI	-15	529,5	531,4	514,0	1241,8	373,1	1,5	13982,98	105,18
5	7	A	1	A	SM	EPI	-15	584,7	590,2	574,1	1576,7	472,7	1,6	16126,45	133,17
6	7	A	1	A	SM	EPI	-15	574,1	577,6	564,4	1585,3	475,2	1,7	15663,95	136,42
9	1	B	3	A	SM	EPI	-15	428,2	432,4	421,6	955,4	286,0	1,5	11115,14	81,45
10	1	B	3	A	SM	EPI	-15	420,1	416,8	411,6	1002,2	300,3	1,5	11560,45	85,79
12	1	A	6	A	SM	EPI	-15	396,6	397,8	385,0	802,3	240,6	1,2	11342,07	67,93
14	1	A	6	B	SM	EPI	-15	402,8	403,6	392,2	1030,4	309,2	1,4	11736,62	86,11
15	1	B	6	A	SM	EPI	-15	400,2	401,9	393,5	771,9	231,7	1,2	11221,63	65,85
17	1	B	6	B	SM	EPI	-15	393,8	396,5	381,4	938,0	281,7	1,5	10760,59	79,44
18	1	B	6	B	SM	EPI	-15	386,6	381,2	373,3	859,8	258,5	1,3	10838,03	72,58
19	1	A	7	A	SM	EPI	-15	404,3	403,9	391,2	1031,1	309,5	1,6	10851,15	88,10
20	1	A	7	A	SM	EPI	-15	411,9	409,9	397,7	1090,1	327,4	1,6	11654,31	92,84
21	1	A	7	B	SM	EPI	-15	385,2	389,1	376,2	871,9	261,3	1,5	9795,47	75,59
22	1	A	7	B	SM	EPI	-15	415,5	412,4	402,7	1119,0	335,6	1,7	11445,58	95,87
23	1	B	7	A	SM	EPI	-15	390,4	388,1	378,0	511,6	153,5	0,8	10470,18	43,20
25	1	B	7	B	SM	EPI	-15	370,7	371,4	358,9	797,6	239,6	1,4	9672,61	67,81
26	1	B	7	B	SM	EPI	-15	351,0	352,1	336,7	775,1	232,8	1,6	8047,78	65,69

Tabulka 7: Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa zatížená teplotami -15 °C
a 70°C s PUR lepidlem

Kód					Dřevina	Lepidlo	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	P_k (kg/m ³)	F_{max} (N)	F_x (N)	a (mm)	E_m (MPa)	f_m (MPa)
1	16	A	2	A	MD	PUR	-15	644,5	643,4	629,4	1728,4	518,1	1,7	13283,34	126,04
2	16	A	2	A	MD	PUR	-15	677,0	675,3	662,5	1671,0	502,0	1,8	12222,92	121,28
3	16	A	2	B	MD	PUR	-15	654,5	654,5	641,3	1681,3	504,5	1,4	16292,09	123,60
4	16	A	2	B	MD	PUR	-15	629,3	631,2	612,7	1790,2	536,7	1,6	15413,12	130,34
5	16	B	1	A	MD	PUR	-15	656,2	657,8	641,2	1949,5	584,5	1,8	14523,43	140,68
6	16	B	1	A	MD	PUR	-15	678,5	681,3	663,2	1867,3	560,6	1,8	13736,54	135,19
7	16	B	1	B	MD	PUR	-15	752,7	753,4	734,1	1803,8	540,9	1,9	12246,20	129,28
9	17	A	1	A	MD	PUR	-15	726,3	729,8	704,9	1835,2	550,9	1,9	12407,63	131,10
10	17	A	1	A	MD	PUR	-15	710,4	715,5	697,5	1591,3	477,7	1,6	13863,53	116,40
11	17	A	1	B	MD	PUR	-15	759,6	766,3	743,8	1932,3	580,6	1,7	15285,55	139,75
12	17	A	1	B	MD	PUR	-15	754,5	760,0	735,3	1874,8	562,0	1,9	13289,71	137,74
13	17	B	1	A	MD	PUR	-15	730,5	732,4	711,4	1425,3	427,3	1,4	13993,88	106,24
14	17	B	1	A	MD	PUR	-15	678,3	679,0	659,1	1868,4	561,0	1,9	13525,54	136,02
16	17	B	1	B	MD	PUR	-15	689,1	689,9	665,6	1866,6	560,2	1,9	13957,42	140,34
17	17	A	2	A	MD	PUR	-15	746,5	745,4	720,6	1825,6	548,1	1,9	12604,77	128,33
19	17	A	2	B	MD	PUR	-15	736,7	738,0	717,9	1810,9	543,1	2,0	11968,64	131,91
21	17	B	2	A	MD	PUR	-15	717,9	722,4	702,0	1919,5	576,3	1,7	15637,77	141,68
22	17	B	2	A	MD	PUR	-15	727,2	721,3	710,4	1995,2	599,2	2,0	13712,86	145,55
23	17	B	2	B	MD	PUR	-15	715,2	713,8	700,2	1790,9	537,7	1,3	17902,29	127,89
24	17	B	2	B	MD	PUR	-15	721,9	724,2	707,3	2377,2	713,8	1,9	16538,81	169,93

Tabulka 8: Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa zatížená teplotami -15 °C
a 70°C s EPI lepidlem

Kód					Dřevina	Lepidlo	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	F_{max} (N)	F_x (N)	a (mm)	E_m (MPa)	f_m (MPa)
1	18	A	1	A	MD	EPI	-15	654,1	660,6	646,7	1549,4	465,5	1,5	13578,33	109,04
2	18	A	1	A	MD	EPI	-15	640,7	635,1	625,7	1420,1	425,9	1,5	12054,46	101,10
3	18	A	1	B	MD	EPI	-15	638,9	633,4	624,7	1522,6	456,6	1,6	12332,53	109,11
4	18	A	1	B	MD	EPI	-15	642,5	643,5	626,5	1318,8	395,6	1,6	10820,69	96,64
5	18	A	2	A	MD	EPI	-15	679,7	683,7	666,3	1111,3	333,4	1,2	12875,48	81,92
6	18	A	2	A	MD	EPI	-15	672,7	675,3	657,4	1404,1	420,9	1,5	12619,24	102,43
7	18	B	2	A	MD	EPI	-15	718,6	721,8	703,8	1905,3	571,2	1,5	16749,99	134,82
8	18	B	2	A	MD	EPI	-15	686,7	690,1	673,6	1763,9	529,0	1,5	14951,01	123,88
9	18	A	2	B	MD	EPI	-15	687,6	688,5	672,0	1468,0	439,1	1,8	11182,76	106,94
10	18	A	2	B	MD	EPI	-15	683,3	683,5	668,3	1454,8	435,9	1,8	10743,56	105,75
12	16	A	1	A	MD	EPI	-15	598,8	590,2	582,2	1436,9	431,2	1,8	10213,37	102,31
13	16	A	1	B	MD	EPI	-15	676,6	677,1	663,5	1349,8	404,1	1,9	9379,71	98,52
14	16	A	1	B	MD	EPI	-15	600,3	600,4	583,7	1307,7	392,0	1,9	9529,10	96,13
15	16	B	2	A	MD	EPI	-15	612,2	611,0	593,8	1606,5	482,3	1,7	12749,13	118,19
16	16	B	2	A	MD	EPI	-15	661,3	661,6	645,3	1373,7	411,9	1,3	15066,48	104,36
17	16	B	2	B	MD	EPI	-15	655,3	658,1	636,7	1357,7	408,0	1,3	15705,46	103,53
22	16	B	3	A	MD	EPI	-15	639,0	641,3	625,6	1786,4	535,1	1,5	17805,36	142,54
25	13	A	1	B	MD	EPI	-15	710,2	711,5	699,2	1589,7	476,6	1,4	17740,78	127,14
26	13	A	1	B	MD	EPI	-15	704,1	703,2	685,4	1843,5	553,0	1,6	17669,31	143,78
27	13	B	1	B	MD	EPI	-15	772,0	774,2	755,0	1772,1	531,5	1,5	17933,07	137,88

Tabulka 9: Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa zatížená teplotami -25 °C
a 70°C s PUR lepidlem

Kód				Dřevina	Lepidlo	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	F_{max} (N)	F_x (N)	a (mm)	E_m (MPa)	f_m (MPa)	
1	1	A	3	B	SM	PUR	-25	393,2	392,4	380,0	1009,2	303,1	1,6	10026,50	81,95
2	1	A	3	B	SM	PUR	-25	400,0	405,9	388,3	960,7	287,7	1,5	10094,11	77,32
3	1	A	4	A	SM	PUR	-25	422,4	425,4	405,8	1008,9	302,7	1,6	10465,09	83,15
6	1	A	5	B	SM	PUR	-25	396,6	402,1	386,5	1016,4	304,5	1,5	10803,14	84,79
7	7	A	2	A	SM	PUR	-25	501,4	506,9	485,6	1425,5	426,6	1,5	14703,32	116,39
8	7	A	2	A	SM	PUR	-25	561,6	564,3	546,1	1523,3	456,6	1,5	16230,85	124,72
9	7	A	2	B	SM	PUR	-25	530,3	535,5	511,8	1486,2	445,2	1,6	15338,05	122,00
10	7	A	2	B	SM	PUR	-25	551,5	550,7	533,0	1602,9	480,9	1,6	15687,09	131,79
11	7	B	2	A	SM	PUR	-25	454,3	457,2	437,3	1315,2	394,5	1,8	11890,57	108,31
12	7	B	2	A	SM	PUR	-25	580,3	582,1	564,1	1726,5	518,0	1,7	16874,53	143,74
13	7	B	2	B	SM	PUR	-25	556,6	562,6	543,4	1743,2	524,1	1,7	16368,34	140,63
14	7	B	2	B	SM	PUR	-25	447,7	453,9	430,7	1334,8	400,9	1,7	12718,27	108,12
15	7	A	3	A	SM	PUR	-25	414,7	418,6	402,1	1140,2	342,0	1,6	10951,32	92,60
16	7	A	3	A	SM	PUR	-25	457,2	464,1	446,5	1315,9	394,5	1,6	12910,58	105,66
17	7	B	3	A	SM	PUR	-25	427,3	429,9	406,1	1074,9	322,4	1,7	9808,65	87,05
18	7	B	3	A	SM	PUR	-25	440,1	440,1	421,6	1111,3	333,4	1,8	10092,54	91,03
19	7	B	3	B	SM	PUR	-25	446,0	450,7	432,4	1269,8	381,2	1,6	12765,26	104,93
20	7	B	3	B	SM	PUR	-25	431,4	435,7	415,2	1156,3	346,6	1,6	11982,70	94,87
21	1	A	8	A	SM	PUR	-25	448,7	449,5	436,1	1186,7	355,9	1,6	12115,47	98,90
22	1	A	8	A	SM	PUR	-25	408,7	417,6	397,4	1137,7	340,9	1,7	10839,78	93,02

Tabulka 10: Získané hodnoty pro smrková zkušební tělesa zatížená teplotami -25 °C
a 70°C s EPI lepidlem

Kód				Dřevina	Lepidlo	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	P_k (kg/m ³)	F_{max} (N)	F_x (N)	a (mm)	E_m (MPa)	f_m (MPa)	
1	7	B	1	B	SM	EPI	-25	542,8	548,5	526,8	762,9	227,7	1,0	13722,64	67,15
2	7	B	1	B	SM	EPI	-25	609,0	613,5	594,2	1718,2	515,2	1,7	17378,10	149,37
3	7	B	3	B	SM	EPI	-25	510,1	500,7	492,8	1285,2	385,2	1,7	12910,80	108,20
4	7	B	3	B	SM	EPI	-25	513,7	514,5	495,7	1403,7	421,6	1,7	13630,80	118,82
5	7	A	1	A	SM	EPI	-25	582,5	580,3	566,4	1714,0	513,4	1,7	16755,01	145,51
6	7	A	1	A	SM	EPI	-25	559,6	561,0	542,7	1297,3	388,4	1,5	15220,64	111,28
9	1	B	3	A	SM	EPI	-25	418,5	419,8	406,6	1011,0	303,1	1,6	11162,31	87,90
10	1	B	3	A	SM	EPI	-25	415,9	421,1	404,5	1106,2	331,7	1,5	12718,69	96,77
12	1	A	6	A	SM	EPI	-25	391,8	390,0	379,8	968,2	290,6	1,6	10845,97	84,48
13	1	A	6	B	SM	EPI	-25	393,6	395,1	381,6	1106,2	331,7	1,5	12097,40	93,66
14	1	A	6	B	SM	EPI	-25	414,6	420,1	403,3	1106,2	331,7	1,5	12129,42	93,78
15	1	B	6	A	SM	EPI	-25	405,0	407,3	390,7	1022,4	307,0	1,5	11587,55	86,63
17	1	B	6	B	SM	EPI	-25	408,6	412,2	394,0	888,9	267,0	1,3	11641,71	76,65
18	1	B	6	B	SM	EPI	-25	382,4	386,4	370,1	863,6	258,4	1,4	10766,93	74,38
19	1	A	7	A	SM	EPI	-25	416,6	420,6	402,2	1093,8	329,1	1,7	11173,33	93,40
20	1	A	7	A	SM	EPI	-25	415,4	419,2	401,8	1106,2	331,7	1,5	12316,75	94,90
21	1	A	7	B	SM	EPI	-25	376,0	377,7	361,0	921,0	276,6	1,7	9425,35	79,50
22	1	A	7	B	SM	EPI	-25	422,6	426,0	409,0	1142,0	342,3	1,6	11931,48	98,11
25	1	B	7	B	SM	EPI	-25	375,1	376,9	360,0	841,1	252,0	1,4	10257,46	71,63
26	1	B	7	B	SM	EPI	-25	353,5	357,3	340,6	766,1	229,9	1,5	8502,89	65,77

Tabulka 11: Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa zatížená teplotami -25 °C
a 70°C s PUR lepidlem

Kód				Dřevina	Lepidlo	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	P_k (kg/m ³)	F_{max} (N)	F_x (N)	a (mm)	E_m (MPa)	f_m (MPa)	
1	16	A	2	A	MD	PUR	-25	674,7	677,7	656,5	1456,9	437,3	1,5	13137,71	107,41
3	16	A	2	B	MD	PUR	-25	613,9	619,4	601,0	1765,7	530,8	1,7	14270,58	131,09
4	16	A	2	B	MD	PUR	-25	624,2	627,8	607,2	1818,2	545,8	1,9	13340,43	134,45
5	16	B	1	A	MD	PUR	-25	636,1	649,1	628,6	1957,4	587,2	1,8	14921,93	143,42
6	16	B	1	A	MD	PUR	-25	669,3	676,0	654,5	1921,4	576,2	1,9	13930,81	141,95
7	16	B	1	B	MD	PUR	-25	725,9	737,2	713,8	1722,2	516,6	2,0	11501,77	124,68
9	17	A	1	A	MD	PUR	-25	733,8	738,1	711,3	1671,8	501,6	1,7	12928,04	121,52
10	17	A	1	A	MD	PUR	-25	695,6	703,6	672,7	1954,9	585,5	1,8	14533,19	140,07
11	17	A	1	B	MD	PUR	-25	739,6	748,4	722,6	1892,5	567,3	1,7	14973,99	136,73
12	17	A	1	B	MD	PUR	-25	743,7	758,3	729,0	1995,6	600,5	1,9	13924,67	143,65
14	17	B	1	A	MD	PUR	-25	686,2	698,1	677,9	1859,3	558,0	1,7	14547,35	133,88
16	17	B	1	B	MD	PUR	-25	691,7	702,0	673,3	1528,3	458,4	1,6	13714,92	114,00
17	17	A	2	A	MD	PUR	-25	750,6	758,2	741,1	1634,7	490,5	1,5	14158,80	118,29
18	17	A	2	A	MD	PUR	-25	723,9	727,6	701,4	1600,4	479,8	1,5	14473,02	115,50
19	17	A	2	B	MD	PUR	-25	725,7	732,4	701,2	1544,7	463,4	1,7	11972,85	110,97
20	17	A	2	B	MD	PUR	-25	762,4	772,6	744,0	1660,0	498,4	1,8	11955,85	117,70
21	17	B	2	A	MD	PUR	-25	713,2	719,9	696,5	1934,9	580,5	1,7	14962,59	141,18
22	17	B	2	A	MD	PUR	-25	750,2	756,8	731,2	2195,6	658,7	1,9	15526,82	157,53
23	17	B	2	B	MD	PUR	-25	724,8	712,4	704,7	1982,8	594,0	1,5	17200,89	140,21
24	17	B	2	B	MD	PUR	-25	731,7	734,1	713,6	2299,5	689,8	1,7	17161,38	161,74

Tabulka 12: Získané hodnoty pro modřínová zkušební tělesa zatížená teplotami -
25 °C a 70°C s EPI lepidlem

Kód					Dřevina	Lepidlo	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	F_{max} (N)	F_x (N)	a (mm)	E_m (MPa)	f_m (MPa)
1	18	A	1	A	MD	EPI	-25	658,2	666,2	647,5	1779,3	534,0	1,6	15255,45	130,50
2	18	A	1	A	MD	EPI	-25	629,9	632,8	613,9	1710,0	513,7	1,7	14025,32	125,79
3	18	A	1	B	MD	EPI	-25	658,1	660,7	639,6	1916,0	574,8	1,7	15301,78	140,65
4	18	A	1	B	MD	EPI	-25	662,2	664,5	644,5	1665,8	499,8	1,5	15038,54	123,02
5	18	A	2	A	MD	EPI	-25	688,2	691,1	667,2	1588,6	476,6	1,6	14424,84	122,44
6	18	A	2	A	MD	EPI	-25	723,6	724,3	702,2	1647,2	494,1	1,6	14965,12	126,59
8	18	B	2	A	MD	EPI	-25	731,4	733,9	713,8	1777,5	533,0	1,7	14164,79	130,15
12	16	A	1	A	MD	EPI	-25	620,4	625,6	598,7	1579,0	474,1	1,9	11548,29	115,91
13	16	A	1	B	MD	EPI	-25	670,3	671,4	648,4	1886,0	565,8	1,6	15711,67	137,95
14	16	A	1	B	MD	EPI	-25	614,2	618,4	592,3	1823,6	548,0	1,6	15218,96	133,48
15	16	B	2	A	MD	EPI	-25	620,0	626,4	599,2	1575,1	471,9	2,0	10830,14	117,72
17	16	B	2	B	MD	EPI	-25	663,1	666,2	644,6	1613,6	484,4	2,0	10680,15	118,28
18	16	B	2	B	MD	EPI	-25	708,8	711,8	688,3	1646,5	493,3	2,2	10171,85	120,15
20	16	A	3	B	MD	EPI	-25	683,8	690,3	665,9	1900,0	569,4	1,9	14315,26	143,24
21	16	B	3	A	MD	EPI	-25	677,6	681,4	658,5	1615,1	484,4	1,9	11371,81	118,10
24	13	A	1	A	MD	EPI	-25	716,3	718,8	703,0	2144,2	643,4	1,8	19130,95	175,51
25	13	A	1	B	MD	EPI	-25	703,9	698,4	686,1	2156,3	646,9	1,9	18393,79	176,80
28	13	B	1	B	MD	EPI	-25	783,7	781,4	767,4	2193,1	657,6	1,8	19755,42	178,39
29	13	B	1	A	MD	EPI	-25	793,7	792,9	782,0	1430,5	429,4	1,3	18258,43	119,86
30	13	B	1	A	MD	EPI	-25	793,6	795,0	779,0	1579,0	474,1	1,4	18105,52	131,43

Tabulka 13: Průměrné hodnoty vlhkosti a hmotnosti

Dřevina	Lepidlo	Teplotní zatížení (°C)	w_p (%)	m_p (g)	w_m (%)	m_m (g)	w_k (%)	m_k (g)
SM	PUR	Ref.	11,69	43,17	-	-	-	-
SM	EPI	Ref.	12,32	39,93	-	-	-	-
MD	PUR	Ref.	11,55	69,16	-	-	-	-
MD	EPI	Ref.	11,71	64,58	-	-	-	-
SM	PUR	-15	11,70	42,92	11,85	42,98	3,54	39,96
SM	EPI	-15	12,43	39,78	12,60	40,96	4,73	37,91
MD	PUR	-15	11,81	68,55	11,87	68,61	6,38	65,30
MD	EPI	-15	12,15	63,66	12,31	63,75	6,80	60,67
SM	PUR	-25	11,88	43,15	13,49	43,67	3,56	40,20
SM	EPI	-25	12,43	40,60	13,72	41,08	4,76	37,61
MD	PUR	-25	12,11	68,83	12,72	69,35	6,67	65,64
MD	EPI	-25	12,36	65,52	13,11	65,93	6,78	62,30