

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

**VLIV PŮSOBENÍ NÍZKÝCH A VYSOKÝCH TEPLOT NA
SMYKOVOU PEVNOST LEPENÉHO DŘEVA**

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

**VLIV PŮSOBENÍ NÍZKÝCH A VYSOKÝCH TEPLŮT NA
SMYKOVOU PEVNOST LEPENÉHO DŘEVA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program:	Dřevařské inženýrství
Pracoviště (katedra/ústav):	Katedra zpracování dřeva a biomateriálů
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Praha 2020

Lukáš Vlk

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Lukáš Vlk

Dřevařské inženýrství

Dřevařské inženýrství

Název práce

Vliv působení nízkých a vysokých teplot na smykovou pevnost lepeného dřeva

Název anglicky

Influence of low and high temperatures on tensile-shear strength 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. 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 vlastnosti lepeného dřeva.
4. Experimentální zjišťování vlivu střídavého působení nízkých a vysokých teplot na smykovou pevnost lepeného dřeva vyrobeného z různých dřevin a lepidel. Porovnání smykové pevnosti teplotně zatěžovaného 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, smyková pevnost, fyzikální vlastnosti

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 27. 4. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 25. 05. 2020

Čestné prohlášení

"Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv působení nízkých a vysokých teplot na smykovou pevnost lepeného dřeva vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Gašparíka, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby."

V Praze dne.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce panu Ing. Miroslavu Gašparíkovi, PhD. za jeho čas, konzultace a věcné připomínky k mé práci. Také bych chtěl poděkovat mé ženě Dorotě Vlkové za jazykovou korekturu a za morální podporu při psaní diplomové práce.

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce zjištění vlivu nízkých a vysokých teplot na smykovou pevnost lepeného dřeva. Sledované faktory jsou typ lepidla (PUR, EPI), teplota (70 °C, 20 °C, -15 °C, -25 °C), druh dřeviny (smrk, modřín).

V rámci experimentu byly sledovány jak fyzikální, tak mechanické vlastnosti jednotlivých dřevin. Z výsledků vyplývá, že největší vliv na smykovou pevnost lepeného dřeva má druh použité dřeviny, v tomto případě modřínu a smrku. Ostatní faktory se neprokázali jako statisticky významné. Modřín vykazoval ve všech případech vyšší hodnoty než smrk. PUR lepidlo vykazovalo vyšší smykovou pevnost než EPI lepidlo a z hlediska teplotního namáhání vykazovaly nejvyšší hodnoty skupiny referenční, bez teplotního zatížení. Modřínové dřevo lepeno PUR lepidlem dosahovalo nejvyšších hodnot smykové pevnosti při teplotním zatížení -15 °C a 70 °C.

Přínosem práce je zjištění, jaký typ lepidel můžeme použít na lepení konstrukčních prvků, které mohou být použity v podmínkách, kde dochází k teplotním nebo vlhkostním změnám. Tyto znalosti jsou nejdůležitější pro dřeviny jako je smrk, protože patří mezi nejpoužívanější dřevinu pro konstrukce, a modřín, který je sice nákladnější, ale z hlediska trvanlivosti má daleko lepší vlastnosti než smrk.

Klíčová slova

teplotní zatížení, EPI lepidlo, PUR lepidlo, modřín, smrk, smyková pevnost, fyzikální vlastnosti

Abstract

The subject of this diploma thesis is to determine the influence of low and high temperatures on the shear strength of glued wood. The monitored factors are the type of adhesive (PUR, EPI), temperature (70 ° C, 20 ° C, -15 ° C, -25 ° C), type of wood (spruce, larch).

Both the physical and mechanical properties of individual wood species were monitored in the experiment. The results show that the greatest influence on shear strength of glued wood has the type of wood used, in this case larch and spruce. Other factors did not prove to be statistically significant. Larch showed higher values than spruce in all cases. The PUR adhesive showed a higher shear strength than the EPI adhesive and in test of thermal stress, references group without thermal loading showed the highest values. Larch wood glued with PUR adhesive reached the highest values of shear strength at thermal loads of -15 ° C and 70 ° C.

The benefit of the work is to find out what type of adhesives we can use for gluing structural elements that can be used in conditions where temperature or humidity changes occur. This knowledge is most important for wood types such as spruce, because it is one of the most common used woods for construction, and larch, which is more expensive but has far better properties in terms of durability than spruce.

Keywords

thermal load, EPI adhesive, PUR adhesive, larch, spruce, shear strength, physical properties

Obsah

1 Úvod	15
2 Cíl práce	16
3 Teoretický rozbor	17
3.1 Materiály na bázi dřeva.....	17
3.1.1 Masivní dřevo.....	17
3.1.1.1 Chemie dřeva.....	18
3.1.1.1.1 Celulóza.....	18
3.1.1.1.2 Hemicelulózy.....	20
3.1.1.1.3 Lignin.....	20
3.1.1.2 Anatomie dřeva.....	21
3.1.1.2.1 Vztah mezi anatomii dřeva a jeho fyzikálně-mechanickými vlastnostmi.....	22
3.1.2 Lepené materiály na bázi dřeva pro nosné účely.....	22
3.1.2.1 Glulam.....	24
3.1.2.2 Parallam.....	25
3.1.2.3 Vrstvené dřevo.....	26
3.1.2.4 KVH hranol.....	27
3.2 Fyzikální vlastnosti dřeva.....	28
3.2.1 Hustota.....	28
3.2.2 Vlhkost.....	29
3.2.3 Teplota.....	31
3.3 Mechanické vlastnosti dřeva.....	32
3.3.1 Pružnost.....	33
3.3.1.1 Modul pružnosti.....	33
3.3.1.2 Mez úměrnosti.....	34
3.3.2 Tuhost.....	35
3.3.3 Pevnost.....	36
3.3.3.1 Smyková pevnost.....	37
3.3.3.1.1 Tahová smyková pevnost.....	38
3.3.3.2 Faktory ovlivňující pevnost dřeva.....	39
3.4 Lepidla.....	40
3.4.1 Základní vlastnosti lepidel.....	40
3.4.2 Teorie lepení.....	41
3.4.3 Přírodní lepidla.....	41

3.4.4	Syntetická lepidla.....	41
3.4.4.1	PUR lepidla.....	42
3.4.4.2	EPI lepidla	42
3.4.5	Vliv faktorů a vlastností dřeva na kvalitu lepení.....	43
3.4.5.1	Druh dřeva.....	43
3.4.5.2	Obsah pryskyřic	44
3.4.5.3	Hustota dřeva.....	44
3.4.5.4	Teplota.....	45
3.4.5.5	Vlhkost dřeva.....	45
3.4.5.6	Povrch dřeva	45
4	Metodika experimentálních prací.....	46
4.1	Příprava těles.....	46
4.1.1	Lepení těles.....	47
4.1.2	Rozměrová příprava těles.....	48
4.1.3	Značení těles.....	48
4.1.4	Klimatizace těles.....	49
4.1.5	Určení hustoty těles.....	49
4.1.6	Měření a vážení těles.....	50
4.2	Teplotní zatížení.....	51
4.3	Zjišťování tahové smykové pevnosti.....	52
4.4	Vyhodnocení výsledků.....	53
5	Výsledky a diskuse.....	54
5.1	Fyzikální vlastnosti dřeva	54
5.1.1	Vlhkost dřeva.....	54
5.1.2	Hustota dřeva.....	55
5.2	Tahová smyková pevnost dřeva	56
6	Závěr	63
7	Literatura.....	64
8	Přílohy.....	69

1 Seznam obrázků

Obr. 1. Chemické složky dřeva.....	18
Obr. 2. Základní stavební jednotka celulóзовého řetězce.....	19
Obr. 3. Podíl výskytu základních složek ve dřevě.....	21
Obr. 4. Různé tvary lepených nosníků.....	23
Obr. 5. Glulam.....	24
Obr. 6. Parallam.....	26
Obr. 7. Vrstvené dřevo LVL.....	26
Obr. 8. KVH hranol.....	27
Obr. 9. Vliv teploty na maximální pevnost v tlaku, rovnoběžně s vlákny ve dvou dřevinách z tvrdého a jednou dřevinou z měkkého dřeva.....	31
Obr. 10. Modelový pracovní diagram.....	34
Obr. 11. Základní případy namáhání dřeva smykem.....	38
Obr. 12. Namáhání ve smyku tahem.....	39
Obr. 13. Schéma rozdělení těles.....	46
Obr. 14. Nařezané a slepené lamely.....	47
Obr. 15. Plošný lis SCM.....	47
Obr. 16. Značení těles.....	48
Obr. 17. Klimatizační komora.....	49
Obr. 18. Digitální váha PCB-2500-2.....	50
Obr. 19. Digitální posuvné měřítko.....	50
Obr. 20 Mrazák Liebherr.....	51
Obr. 21. Sušící komora Binder.....	51
Obr. 22. Schéma zkoušky.....	52
Obr. 23. Software TIRA.....	52

2 Seznam grafů

Graf 1. Vliv dřeviny na smykovou pevnost lepeného spoje.....	58
Graf 2. Vliv teploty na smykovou pevnost lepeného spoje.....	58
Graf 3. Vliv typu lepidla na smykovou pevnost lepeného spoje	59
Graf 4. Vliv kombinace tří faktorů na smykovou pevnost lepeného spoje	60

3 Seznam tabulek

Tab. 1. Chemické složení vybraných dřevin	21
Tab. 2. Moduly pružnosti a Poissonova čísla smrku a modřínu.....	35
Tab. 3. Smykové moduly pružnosti smrku a modřínu	35
Tab. 4. Vlhkost a hustota smrkového a modřínového dřeva	54
Tab. 5. Přehled statistických hodnot, hodnotících vliv jednotlivých faktorů a jejich kombinací na smykovou pevnost lepeného spoje	56
Tab. 6. Průměrné hodnoty smykové pevnosti pro smrkové a modřínové dřevo	58

1 Úvod

Využívání dřeva v různých oborech je již samozřejmé. K tomu abychom dostali dřevo do tvarů a rozměrů, které jsou pro nás potřeba využíváme různé technologie a modifikace jako mechanické, chemické a fyzikální. Technologie lepení je v oboru dřevařství již nějakou dobu a používá se i pro velkorozměrové nosné prvky. Nosné prvky se často využívají v interiéru jako konstrukce stropů, střech nebo jsou součástí nosné konstrukce budov. Lepené velkorozměrové prvky se ale využívají i při stavbách v exteriéru, jako jsou mosty, rozhledny a další podobné konstrukce. Jak se chová dřevo v externích podmínkách vystaveno povětrnostním vlivům už víme. Jak se ale chová dřevo lepené lepidly a jak se chovají lepidla pod zátěží střídání teplot je třeba prozkoumat.

V rámci této práce je i praktický výzkum hodnotící vliv tří faktorů na smykovou pevnost lepeného dřeva. Faktory, kterými se práce zabývá jsou typ lepidla, teplota a druh dřeviny. Namáhání smykem se děje většinou v kombinaci s dalšími namáháními a čistý smyk je vzácný, nicméně pevnost ve smyku je důležitou vlastností nosných prvků.

Výsledky v této práci by měly objasnit jaké ze sledovaných faktorů a jejich vzájemných kombinací mají vliv na smykovou pevnost lepeného dřeva.

2 Cíl práce

Cílem práce je experimentální zkoumání fyzikálních a mechanických vlastností lepeného dřeva (vlhkosti a hustoty) vystaveného střídání nízkých i vysokých teplot a následným porovnáním s dřevem bez teplotního zatížení. Pro testování těles je použita zkušební metoda podle normy ČSN EN 302-1 (2013). V rámci experimentu se zkoumá:

- smyková pevnost lepeného dřeva f_t
- dva druhy lepidel: PUR a EPI
- dva druhy dřevin: modřín a smrk
- tři typy teplotního zatížení: referenční (20 °C), -15 °C a 70 °C, -25 °C a 70 °C

3 Teoretický rozbor

3.1 Materiály na bázi dřeva

3.1.1 Masivní dřevo

Důležitou látkou v celé historii díky svým jedinečným a užitečným vlastnostem je právě dřevo. Dřevo je recyklovatelné, obnovitelné a biologicky rozložitelné. Mnoho dřevin je odolných vůči nárazům, ohýbání a je víceméně stabilní (i když veškeré dřevo mění rozměry, neboť ztrácí nebo získává vlhkost). Hustota mezi dřevinami se velmi liší, balsa oblíbená u výrobců modelů letadel může vážit pouhých 100 kg/m³. Některé tropické tvrdé dřevo váží více než 1000 kg/m³. Dřevo a lignin lze převést na mnoho užitečných průmyslových chemikálií, jako je etanol a plasty. Nejstarší dochovanou dřevěnou stavbou je asijský chrám postavený v 7. století. Díky všestrannosti dřeva je mnoho dřevěných produktů recyklovatelných. Snad nejčasnější a nejjednodušší recyklace bylo spalování použitého dřeva, ať už v kamnech, krbu nebo v peci. Nové technologie zlepšují účinnost, s jakou může použité nebo šrotové dřevo vyrábět elektřinu a teplo (Rowell 2005).

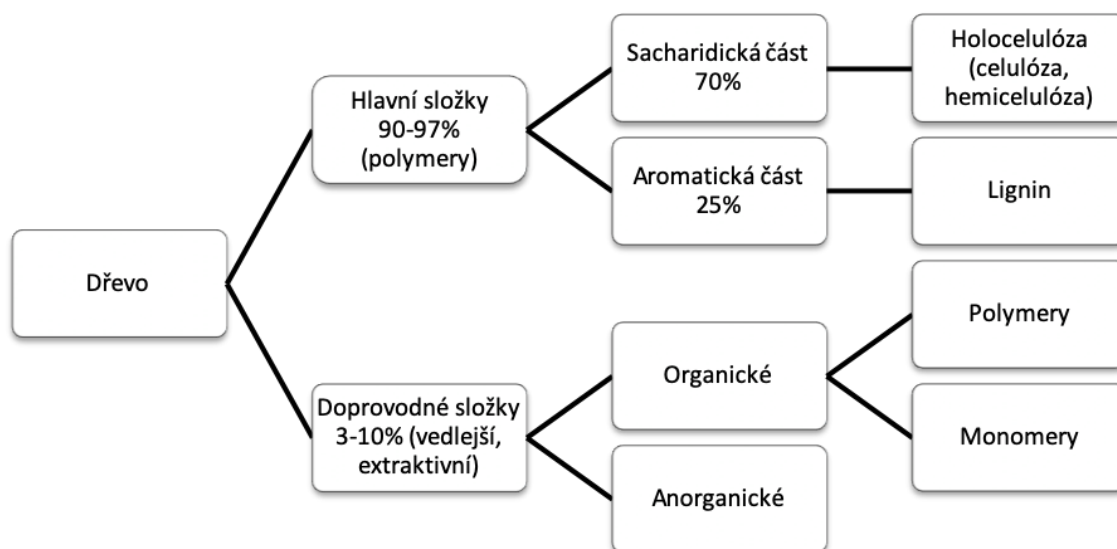
Pro lepší chápání chování dřeva, dřevěných konstrukcí a prvků z něho zhotovených je potřeba chápat a znát základní vlastnosti, skladbu dřeva a jeho elementů. Dřevo je přírodním materiálem, který se skládá ze zdřevnatělých pletiv rostlinného původu. Je to tedy surovina, která se přirozeně obnovuje a při správném zacházení s tímto zdrojem je potenciál dřeva nevyčerpatelný. Dřevo disponuje vlastnostmi, které člověk při jeho použití využívá. Jde hlavně o výborný poměr pevnosti a váhy, tedy mechanické vlastnosti nebo o barvu, vůni a kresbu, tedy fyzikální vlastnosti, které se spíše vyžadují u pohledových a nábytkářských prvků. Rozeznáváme dvě základní skupiny dřevin, jehličnaté a listnaté dřeviny (Nečesaný a kol. 1952).

Velkou výhodou, která se projeví hlavně při zpracování dřeva je jeho snadná opracovatelnost a využitelnost odpadu vznikajícího při opracování dřeva. Dále disponuje odolností proti chemikáliím, má dobré akustické a tepelně-izolační vlastnosti. Proto se dřevo užívá v různých odvětvích (nábytkářství, stavebnictví, dýchárenství, dětské hračky, hudební nástroje, sportovní pomůcky). Dřevo je díky vhodnému chemickému složení použitelné pro výrobu papíru a buničiny, ale i biopaliv, bioplynu nebo celofánu. Dřevo má však i několik nedostatků, které jsou příčinou nedůvěry lidí v tento materiál,

a to hlavně při použití ve stavebnictví. Dřevo je heterogenní materiál a jeho vlastnosti se mění v závislosti na podílu jarního a letního dřeva, ale i trhlín, suků a klimatických podmínek, ve kterých strom rostl. Dalšími nedostatky je hořlavost, hygroskopicitá, nasáklivost a náchylnost podléhat biotickým činitelům. Tyto nedostatky jsme schopni během technologického zpracování do větší míry odstranit a zabezpečit větší stabilitu dřeva v různých podmínkách. Dnes je již známé, že dřevo je schopné plnit svoji funkci po staletí, jen je potřeba zajistit vhodné podmínky v místě jeho použití (Šlezingerová a kol. 2005).

3.1.1.1 Chemie dřeva

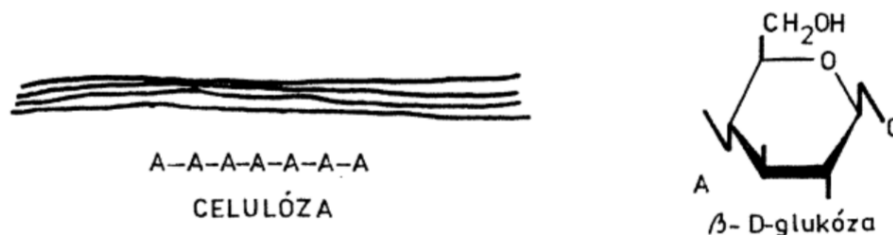
Chemické složení dřeva je naznačeno následovně (Obr. 1)



Obr. 1. Chemické složky dřeva (Požgaj a kol. 1993)

3.1.1.1.1 Celulóza

Základní stavební jednotkou celulóзовého řetězce je čistá celulóza (Obr. 2) jedná se o homopolymer, kde se opakují složky celobiózy. Celobióza je složena ze dvou β -D glukopyranózových lineárních jednotek propojených v poloze 1 - 4. Celkový podíl celulózy ve dřevě jehličnatých a listnatých dřevin je v rozmezí 43 - 52 % hmotnosti a je zároveň základním komponentem buněčných stěn (Požgaj a kol. 1993).



Obr. 2. Základní stavební jednotka celulóзовého řetězce (Požgaj a kol. 1993)

Řetězce celulózy protínají jak krystalickou, tak amorfni část. Makromolekula celulózy dosahuje velikosti 0,01 mm. Celulóзовé řetězce jsou vzájemně postranně propojeny vodíkovými vazbami. Tato sekundární spojení jsou příčinou pro anizotropní chování celulózy, to má za následek anizotropní chování dřeva jako celku. Spojení krystalitů celulózy umožňuje celulóze odolávat vlivům vody a rozpouštědel. Voda je absorbována hlavně v amorfni části buněčných stěn a na povrchu krystalitů. Navázání vody na spojení celulózy lze jen bez přítomnosti ligninu. (Požgaj a kol. 1993).

V nativní a regresivní formě váže celulóza určité procento vody, která je s tlakem vodních par okolního vzduchu v rovnovážném stavu. Na rovnovážný stav má vliv teplota prostředí. Při počáteční absorpci vody se voda naváže na hydroxylové skupiny, a to především v amorfni části celulózy za pomoci vodíkových vazeb. V pokročilé fázi se vodní molekuly váží na vodu již navázanou na celulózu. Délka polymerního řetězce celulózy znamená vyšší polymerační stupeň a zvýšenou pevnost dřeva. Počet jednotek celulózy se liší, ale pohybuje se v rozmezí 5000–10000 jednotek. Velkou odolností se celulóza vyznačuje ve směru délky řetězce, a to díky kovalentním vazbám. Potřebná energie k porušení kovalentních vazeb (C–O, C–C) je více jak 200 kJ/mol. Vodíkové vazby (H–O) jsou však daleko křehčí a potřebná síla na jejich roztržení je 4 - 40 kJ/mol. V rámci celulózy mají vodíkové vazby po délce řetězce vliv na její tuhost a zvyšují odolnost molekul proti nárazu a vzniku zlomu. Krystalický podíl celulózy má sice menší procentuální podíl v hemicelulózách, má však význam při styku s vodou a jinými rozpouštědly. Molekuly jsou v krystalické části zřejmě méně pohyblivé než v amorfni části, a to krystalické části umožňuje odolávat vnějším vlivům. Množství krystalických a amorfni holocelulóz přímo ovlivňuje bobtnání, ohyb, lámavost a pružnost dřeva. Krystalická část a její podíl se přímo podílí na chemické odolnosti, soudržnosti a tažnosti vláken (Desch a kol. 1996).

3.1.1.1.2 Hemicelulózy

Další významnou složkou jsou hemicelulózy. Jedná se o polysacharidy s kratšími řetězci a nižší molekulovou hmotností. Jejich extrakce je možná za pomoci alkálií nebo hydrolizace kyselinami. I s krátkými bočními řetězci mluvíme o lineárních polysacharidech. Hemicelulózy spolu s ligninem penetrují celulózové kostry buněčných stěn. Ovlivňují chemické a fyzikální vlastnosti dřeva, a to se projevuje při jeho technologickém zpracování, jako je lisování, paření, sušení a vaření dřeva. Hemicelulózy se podílejí 20 - 35 % na složení dřeva a nejvíce jich je v listnatých dřevinách. Hemicelulózy se rozdělují:

- a) xylany (xylan, arabinoxylan),
- b) manany (glukomanan, galaktoglukomanan),
- c) galaktany (galaktan – reakční dřevo, arabinogalaktan).

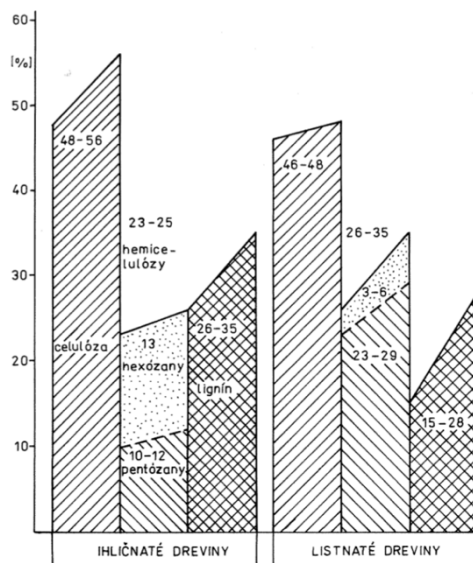
Listnaté dřevo obsahuje xylany a jsou nejdůležitější složkou hemicelulóz listnatého dřeva. U jehličnatých dřevin je to pak glukomanan, který se dobře váže s celulózou (Požgaj a kol. 1993, Desch a kol. 1996).

3.1.1.1.3 Lignin

Lignin způsobuje dřevnatění buněčných stěn dřeva. Jeho hmotnostní podíl ve dřevě se pohybuje v rozmezí 20 - 30 %. U jehličnatých dřevin má lignin vyšší podíl než u listnatých dřevin (Obr. 3). Lignin je trojrozměrně řetězově rozvětvený amorfní polymer, který se skládá z fenylpropanových jednotek různě substituovaných na jádru a bočním řetězci (Požgaj a kol. 1993).

Základní a významnou vlastností ligninu je jeho termoplastičnost a schopnost pohlcovat světlo. Z pokusů vyplývá, že pokud lignin odstraníme z dřevní struktury, tak pevnost mokrého dřeva poklesne. Na základě těchto poznatků lze předpokládat, že lignin má v buněčných stěnách hydrofobizační vlastnost. Lignin spojuje jednotlivá vlákna a zpevňuje celulózové molekuly v rámci buněčné stěny. Rozložení ligninu, hemicelulózy a celulózy není v řezu buněčné stěny rovnoměrné. Nejvíce ligninu obsahuje střední lamela a čím blíže k lumenu tím lignin ubývá, naopak přibývají hemicelulózy a celulózy. Na okraji buněčné stěny tedy převládá lignin, v sekundární stěně S_2 je obsažena celulóza obsahující nejvíce krystalických míst. Směrem k lumenu ubývá amorfní část (ligninu) a přibývá celulózy a hemicelulóz. Buněčná stěna se tedy směrem k lumenu

stává „krystalitější“. Podíl komponentů dřeva se v dřevě mění a je rozdílný podle druhu dřeviny (Tab. 1) (Rowell 2005).



Obr. 3. Podíl výskytu základních složek ve dřevě (Požgaj a kol. 1993)

Tab. 1. Chemické složení vybraných dřevin (Blažej 1975)

Komponent	Smrk (%)	Borovice (%)	Buk (%)
Celulóza	45,6	43,2	39,2
Hemicelulózy	27,6	28,0	35,3
(Manan)	(16,0)	(12,5)	(1,5)
(Xylan)	(9,0)	(13,0)	(28,0)
Lignin	(26,9)	(26,6)	(20,9)

3.1.1.2 Anatomie dřeva

U všech dřevin jsou cévní svazky uspořádány v kruhu a jsou charakterizovány souvislým válcem kambia. Z botanického hlediska je dřevo tvořeno cévními svazky. Nejde o homogenní hmotu, ale je složena z mrtvých a živých buněk, které mají svůj specifický význam (zejména u listnatých dřevin). Tyto buňky pak tvoří pletiva různého významu a funkce. Známe tři základní typy pletiva: na povrchu dřeva je pletivo pokožkové a pod ním svazky pletiv cévních, které jsou uloženy v základním pletivu. Největší část stavby dřeva zahrnuje vnitřní pletivo cévních svazků, zatímco základní pletivo se vyskytuje jen ve dřeni a dřeňových paprscích. Přírůst dřeva do šířky pak zabezpečuje čtvrtý druh pletiva tvořeného kambiem. Anatomická stavba dřeva přímo

ovlivňuje vlastnosti dřeva, a proto je jeho znalost pro zkoumání mechanických vlastností dřeva podstatná (Nečesaný a kol. 1952, Rowell 2005).

3.1.1.2.1 Vztah mezi anatomii dřeva a jeho fyzikálně-mechanickými vlastnostmi

Rozeznáváme fyzikální vlastnosti vnitřní a vnější. Vnější fyzikální vlastnosti jsou např. chuť, barva, lesk a vůně. Vnitřní fyzikální vlastnosti stanovíme pouze pomocí přístrojů a zařízení bez porušení dřeva. Vnitřními fyzikálními vlastnostmi jsou objemová a specifická váha, obsah vody ve dřevě, sesychání a bobtnání (hygroskopicitu), dále pak vodivost elektrického proudu, tepla a zvuku.

Mechanickými vlastnostmi jsou všechny ty, které jsou podmíněny hmotně- materiálním stavem dřeva. Jsou to pevnost, štípatelnost, pružnost, tvrdost, ohebnost, trvanlivost atd. Všechny tyto vlastnosti jsou důležité z pohledu použitelnosti dřeva v praxi. Mechanické i fyzikální vlastnosti dřeva jsou podmíněny jeho chemickou a anatomickou stavbou, mimo to jsou také ovlivněny stanovištěm růstu stromu. Toto je důvodem k velké proměnlivosti fyzikálně-mechanických vlastností dřeva. Ze studií jasně vyplývá závislost fyzikálně-mechanických vlastností a anatomické stavby dřeva (Balabán 1955).

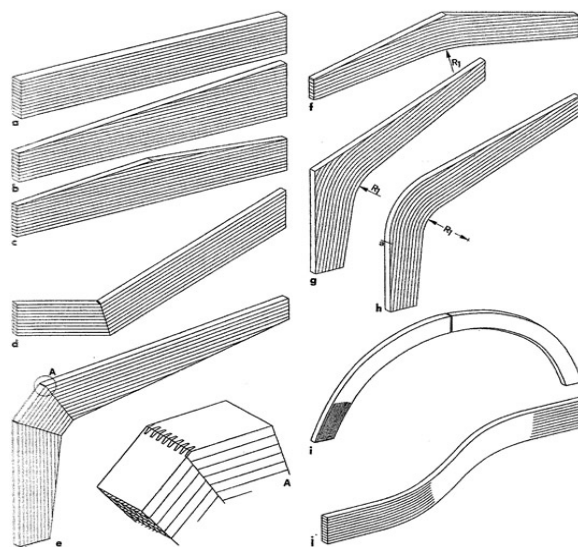
3.1.2 Lepené materiály na bázi dřeva pro nosné účely

Dřevo bylo použito na primitivní konstrukce, nebo později s příchodem nástrojů na složitější konstrukce, kde se jednotlivé dřevěné prvky propojovaly různými spoji. Právě vývoj spojování dřevěných prvků do jednoho celku umožnil rozšíření využití dřeva nejen ve stavebnictví.

Dřevo se nyní využívá pro stavbu rodinných domů, patrových domů a komerčních budov. Často se dřevo využívá pro konstrukce krovů, stropů a stěn. Velké dřevěné stavby využívají systémů jako je LVL, glulam a další, které mohou překlenout i delší vzdálenosti. Využití dřeva ve stavebnictví přináší spoustu výhod. Jedná se především o ekologický materiál a snadno recyklovatelný. Energie potřebná pro výrobu, je ve srovnání s jinými stavebními materiály velmi nízká. Dřevo má skvělý poměr váhy a pevnosti a je tedy snadné s ním při výrobě, dopravě a montáži manipulovat (Thelandersson a kol. 2003).

Maximální průřez řeziva získaného z kulatiny se pohybuje okolo 300 mm v závislosti na druhu a růstových podmínkách dřeviny. Z toho vyplývá, že maximální možné rozpětí masivních trámů je v praxi omezeno na 5 - 7 m. Před příchodem systémů lepeného dřeva bylo masivní dřevo často používáno při větších rozpětích u konstrukcí jako jsou krovy. Dodnes jsou nosníky z masivního dřeva nejpoužívanější pro řešení střešních konstrukcí malých a obytných domů.

U velkých rozpětích se masivní dřevo nahrazuje lepenými nosníky s velkým průřezem. Z počátku se pro jejich vzájemné spojení využívali mechanické spojovací prostředky jako jsou šrouby, hmoždinky a tyče. Potenciál těchto systémů nebyl plně využit až do příchodu komerčně dostupných syntetických lepidel. Lepené vrstvené dřevo (LVL) a glulam se stalo jedno z prvních konstrukčních prvků v moderní konstrukci. Při jejich výrobě lze jednotlivé lamely ohýbat a dosáhnout tak různých tvarů nosníků, například ve tvaru oblouku. Výška lepených nosníků je téměř neomezená, ale z praktických důvodů jsou maximální výšky do 2 m. Díky tomu má glulam schopnost překlenout i vzdálenosti do 100 m (Thelandersson a kol. 2003). Různé variace nosníků jsou popsány na obrázku 4.



Obr. 4. Různé tvary lepených nosníků (Götz a kol. 1978)

Nosné dřevěné prvky představují širokou skupinu materiálů určených pro konstrukční použití. Vyrábí se především ze dřev, které bylo zpracováno na menší části řezáním, loupáním, štípáním, krájením nebo defibrací. Finální produkt pro výrobu těchto konstrukčních materiálů může být v podobě přířezů, dýh, dlouhých třísek, štěpky nebo pilin. Po jejich vzájemném slepení vznikají panelové prvky, různých velikostí a tvarových

podob. Lepidlo se na jednotlivé části nanáší stříkáním, navalováním či smícháním směsi lepidla a pilin. Za spolupůsobení tepla a talku lepidlo vytvrzuje a vzniká pevný spoj mezi jednotlivými dřevěnými částmi. Za nedostatky lze považovat finanční náročnost pořízení těchto produktů. Použití lepidel pak může působit problémy při likvidaci (Thelandersson a kol. 2003).

Lepené dřevo má několik výhod:

- jejich rozměrové omezení není dáno rozměrem vstupní kulatiny,
- umožňují efektivnější využití surového dřeva,
- růstové vady dřeva jsou více či méně potlačeny v závislosti na typu produktu,
- vyšší rozměrová stabilita než u masivního dřeva,
- lze je snáz přizpůsobit požadavkům zákazníka (trhu) (Thelandersson a kol. 2003).

3.1.2.1 Glulam

Glulam (Obr. 5) je konstrukční materiál vyroben spojením několika dřevěných elementů menších rozměrů do jednoho celku.



Obr. 5. Glulam (betimber 2020)

V Evropě, USA a Japonsku má glulam mnoho uplatnění od panelových konstrukcí až po nosníky a sloupy. Díky možnosti slepení jednotlivých elementů glulamu do různých tvarů a rozměrů, umožňuje architektům vytvořit různorodé konstrukce s uměleckým výrazem. Navíc se využívá i jako pohledový nosník a není třeba jej jakkoliv zakrývat podhledy (Thelandersson a kol. 2003).

Jednotlivé elementy (přířezy) se spojují na délku miniozuby a následně se lepí na sebe. Umožňuje využití odpadového masivního dřeva nebo dřeva s růstovými vadami,

kteře jsou díky vymanipulování a slepení více elementů k sobě eliminovány. V případě, kdy známe na co bude nosník určený, můžeme jeho pevnost ovlivnit použitím kvalitnějšího dřeva v konkrétních částech nosníku. Vzniká tak velmi stabilní a pevný dřevěný nosník. Výhoda tohoto typu nosníku oproti masivnímu dřevu je jeho rozměrová variabilita. Další možností glulam nosníků je výroba zahnutých tvarů, a to výrazně rozšiřuje možnosti použití tohoto materiálu.

Glulam nosníky lze vyrábět v nekonečných délkách, ale z důvodu výrobní vybavenosti a dopravy nosníků na místo stavby se běžně vyrábí v délkách do 30 m. Jejich průřez se pak pohybuje okolo 2000 x 240 mm (Hüttemann GmbH 2018).

Výroba nosníků se skládá z délkově nastavených lamel tloušťky 20 - 50 mm v závislosti na poloměru ohybu nosníku. Pokud šíře nosníku nepřesahuje rozměr 240 mm jsou jednotlivé lamely tvořící nosník naskládány na sebe a slepeny v tvarových lisech. Pokud šíře nosníku tento rozměr přesáhne je výroba o něco složitější. Nejdříve se vyrobí spárovky, které jsou následně vzájemně prolepeny. Jedná se však o technicky a ekonomicky náročnější variantu (Hüttemann GmbH 2018).

Výroba nosníku a vše s ní spojeno je prováděno podle norem a certifikací. Normy a certifikace pak zaručují a umožňují kontrolu kvality a předpoklad určitého standardu výrobku. Průběžně se sledují pevnosti spojů a jejich kvalita, aby nedošlo k porušení standardů a norem. Zaznamenávají se podmínky lepení jako jsou rychlost nanášení lepidla, doby montáže, podmínek při vytvrzování a doby vytvrzování. V Evropě podléhá výroba lepeného lamelového dřeva (glulamu) normě ČSN EN 14080 (2002).

Kvalitnější přířezy se používají na vnější vrstvy, neboť se tím zvýší účinnost nosníku (Thelandersson a kol. 2003).

3.1.2.2 Parallam

Parallam je dřevěný nosník (Obr. 6.) jehož výroba je založena na slepení dlouhých pásků dých o daných rozměrech do jednoho celku. Uspořádání pásků dých v nosníku je paralelní s podélnou osou nosníku. Jako pojivo se používá PF lepidlo, které odolává působení vody. Lisování probíhá v kontinuálním válcovém lisu a za pomoci mikrovlnného ohřevu lepidlo vytvrzuje. Finální hustota prvku se pohybuje v rozmezí 670 - 720 kg/m³. Hustota má vliv na pevnostní vlastnosti parallamu. Parallam je kompaktní hranol o maximálním průřezu 285 x 400 mm, takový hranol může být následně rozřezán a zkrácen (Thelandersson a kol. 2003).

Parallam má několik výhod, a to jeho rozměrová stálost, odolnost vůči mikroorganismům a dobré mechanické vlastnosti. Parallam má výborné výsledky ve zkouškách na tah a tlak. Díky složení parallamu z menších částí dochází k větší homogenitě a celistvosti nosníku. Nevýhodou je jeho velký obsah lepidel, který eliminuje jeho použitelnost spíše na venkovní a konstrukční použití. Negativní důsledky sesychání, bobtnání, kroucení, praskání jsou eliminovány na minimum (Kruse a kol. 2002).



Obr. 6. Parallam (Weyerhaeuser Co. 2020)

3.1.2.3 Vrstvené dřevo

Vrstvené dřevo (LVL - Laminated Veener Lumber) lze definovat jako materiál z vrstvených dýh (Obr. 7).



Obr. 7. Vrstvené dřevo LVL (Forest Products Supply Co. 2020)

Vyrábí se z loupaných dýh převážně měkkých dřevin o tloušťce 3,2 mm. Směr vláken všech dýh v nosníku je rovnoběžný s delší hranou nosníku. Maximální rozměry vrstveného dřeva jsou 90 x 1200 x 25000 mm. Díky jeho vlastnostem a výhodám oproti rostlému dřevu se vrstvené dřevo využívá v mnoha oborech. Výhodou je i poměr váhy a pevnostních vlastností, které jsou lepší než u ocelových nosníků, betonu a rostlého dřeva. Vrstvené dřevo se využívá hlavně pro podélné vazníky, krovy a další konstrukční prvky

v rámci dřevěných konstrukcí. Pro opracování vrstveného dřeva není třeba speciálních nástrojů, lze jej opracovat běžnými nástroji na opracování masivního dřeva (Koželuh 1998).

3.1.2.4 KVH hranol

KVH, neboli Solid Structural Timber (Obr. 8), je délkově napojovaný masivní materiál, jehož hlavní výhodou je možnost vymanipulovat vady dřeva a nabídnout délkově takřka neomezené rozměry. Hlavní surovinou pro KVH je masivní dřevo (řezivo). Hlavní dřevinou pro výrobu je smrk, douglaska, modřín a borovice.



Obr. 8. KVH hranol (Smutný 2016)

Dřevo je vysušené na 15 % vlhkost a připravené pro venkovní montáž. Při výrobě se z řeziva vymanipulují vady (trhliny, suky a další), které by mohly negativně ovlivnit mechanické vlastnosti hranolu. Zbylé části různých délek jsou vzájemně délkově spojeny do jednoho celku pomocí miniozubů a lepidla. Využívá se kontinuální lis, kde se spoje přitlačí k sobě a lepidlo dostatečně vytvrdne natolik, aby se dal hranol krájet na různé délkové rozměry (Böhm a kol. 2012).

KVH hranoly se dělí do dvou skupin na pohledové-Si a nepohledové-Nsi. Pohledové hranoly-Si jsou typické nízkým výskytem vad, znečištění povrchu, barevných změn dřeva a smolníků. Jsou hoblovány ze všech čtyř stran a používají se tam, kde je kladen důraz na estetiku. Používají se například při pohledových konstrukcích střech, trámových stropů, pergol a přístřešků (Böhm a kol. 2012).

Nepohledové KVH hranoly-Nsi mají stejné mechanické vlastnosti jako KVH hranoly pohledové. Není však kladen důraz na estetiku, a proto mají řadu pohledových vad, které však na mechanických vlastnostech hranolu neuberou. Výhodou oproti pohledovým hranolům-Si je jejich ekonomická dostupnost. Používají se tam, kde se

s nimi nepočítá jako s pohledovými. Jsou určeny na skryté konstrukce stěn, stropů a jiných konstrukcí (Böhm a kol. 2012).

3.2 Fyzikální vlastnosti dřeva

3.2.1 Hustota

Hustota je dána podílem hmotnosti dřeva a jeho objemu (1). Tato veličina má význam pro posuzování mechanických vlastností dřeva. Závisí ve velké míře na poměru dřeva a dutin ve dřevě (póry, cévy, cévice). Hustota dřeva je také často ovlivněna růstovými podmínkami, vlhkostí, extraktivy a jinými faktory. Proto jsou hustoty rostlého dřeva odlišné i mezi stejnými druhy. Udává se v určitém rozmezí pro každou dřevinu, jako orientační údaj. Nejčastěji se však udává hustota při 12 % vlhkosti, neboť se s takovou vlhkostí dřeva setkáváme v praxi (Balabán 1955, Dinwoodie 2000).

U dřeva rozlišujeme dvě základní hustoty, a to hustotu dřevní hmoty a hustotu rostlého dřeva. Hustota dřevní hmoty udává, jaké množství hmoty buněčných blan bez pórů je na jednotku objemu. Hustota rostlého dřeva zahrnuje i kapiláry a je proto nižší než hustota dřevní hmoty. Poměr dřevní hmoty (2) a pórů (3), jsme schopni vypočítat podle hustoty (objemové hmotnosti) dřeva v suchém stavu r_0 a hustoty dřevní hmoty γ : (Balabán 1955).

$$\rho = m/v \quad (1)$$

kde:

m – hmotnost [kg],

v – objem [m³],

ρ - hustota [kg/m³].

$$m = \frac{r_0}{\gamma} \times 100, (\%) \quad (2)$$

kde:

r₀ – hustota dřeva v suchém stavu [kg/m³],

γ – hustota dřevní hmoty [kg/m³].

$$c = 100 - m, (\%) \quad (3)$$

kde:

m – podíl hmoty buněčných stěn [%],

c – podíl pórů [%].

Další veličina udává váhu suché dřevní hmoty na jednotku objemu dřeva v nabobtnalém stavu. S touto hodnotou se už setkáme i v technické praxi a nazývá se objemová hustota dřeva. Její hodnota je závislá a proměnlivá s množstvím vody obsažené ve dřevě, a to u stejného druhu dřeviny. Mění se s obsahem vzdušné vlhkosti, dobou od porážení a způsobem uskladnění (Balabán 1955, Tsoumis 1991, Požgaj a kol. 1993, Dinwoodie 2000).

3.2.2 Vlhkost

Je vlastnost buněčných blan přijímat vodu a ukládat ji do intermicelárních prostor. Jedná se o důležitou vlastnost dřeva, neboť je příčinou bobtnání a sesychání dřeva. Tato vlastnost se vysvětluje elektrostaticitou dřeva a vody a značným vnitřním povrchem dřeva neboli povrchem krystalitů. V případě, kdy dojde ke styku vody nebo vodní párou a absolutně suchého dřeva, začne se přijímaná voda srážet na povrchu krystalitů uvnitř buněčných stěn. Imbibiční voda vnikající do prostor mezi krystality jednotlivé krystality od sebe oddaluje. Tím dochází k rozšiřování intermicelárních prostor mezi krystality. Rozestupování krystalitů může pokračovat až do bodu nasycení buněčných stěn, tehdy jsou krystality od sebe nejvíce vzdálené a navenek se tento proces projevuje bobtnáním (zvětšováním objemu) dřeva. Stav, ve kterém jsou buněčné stěny plně nasycené vodou se nazývá *bod nasycení vláken*. Každá dřevina má bod nasycení vláken v rozmezí 24 - 35 % celkové vlhkosti dřeva. Dřevo je schopné přijímat vodu i nad tento bod nasycení, ale jen v kapalné formě, to již neovlivňuje bobtnání dřeva, protože se jedná o kapilární síly neboli vyplňování kapilár volnou vodou.

Dřevo má tedy schopnost přijímat vodu volnou (kapalnou) a vázanou (chemicky vázanou v blanách buněčných stěn). Voda vázaná má významný vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Voda volná má za účel dopravovat živiny v živém stromě od kořenů ke koruně stromu. Vlhkost dřeva nám říká, kolik vody dřevo absorbovalo v poměru k celkové váze dřeva. Vlhkost dřeva se vyjadřuje v procentuálním podílu k suché váze dřeva, mokré váze dřeva a též jako poměr ($v = 30 \%$, $v = 0,30 \%$). Vlhkost dřeva, kdy se obsah vodních par ve vzduchu rovná množství vodních par ve dřevě se nazývá stav vlhkostní rovnováhy. Nedochozí tedy k žádnému přenosu vlhkosti ze

dřeva do atmosféry, ani z atmosféry do dřeva. Tento stav je udržitelný jen v určitých podmínkách, kdy se relativní vlhkost vzduchu ani jeho teplota nemění. Pokud se teplota vzduchu nebo jeho relativní vlhkost změní, změní se i stav vlhkostní rovnováhy. V přirozených podmínkách se ale tyto hodnoty stále mění a nejsou konstantní. Proto je stav vlhkostní rovnováhy vzácný nebo nemá dlouhé trvání. Vlhkost je tedy ve stálém pohybu a kolísá.

Vlhkost dřeva je důležitý údaj pro použití dřeva a jeho technické zpracování. K určení vlhkosti dřeva je možno použít více způsobů. Jedním z nich je váhová metoda, kdy ze dřeva odebereme vzorek, který se zváží, následně vysuší a po vysušení opět zváží.

Výslednou vlhkost stanovíme podle vzorce (4), který uvádí James (1988):

$$v = \frac{G_v - G_0}{G_0} \times 100 (\%) \quad (4)$$

kde:

G_v – váha mokrého dřeva [kg],

G_0 – váha suchého dřeva [kg].

Měření je však časově náročné a jeho přesnost závisí na přesnosti měřících zařízení. Dalším a rychlejším způsobem je použití elektrických vlhkoměrů, které měří elektrický odpor. Nevýhodou elektrických vlhkoměrů je možnost měřit pouze obsah vody vázané. James (1988) uvádí další informace o typech měřičů a jejich správném použití.

Obsah vody vázané ve dřevě ovlivňuje rozměrové změny dřeva, tedy jeho bobtnání a sesychání. Uvolňováním vody ze submikroskopické struktury dřeva mají krystalicity tendenci se přibližovat vzájemnou přitažlivostí. Touto desorpceí vody dochází ke zmenšování objemu dřeva, tedy sesychání. Přijímáním a odevzdáváním vody vázané ze struktur dřeva se mění i jeho objem. V praxi se tomuto procesu říká, že „pracuje“.

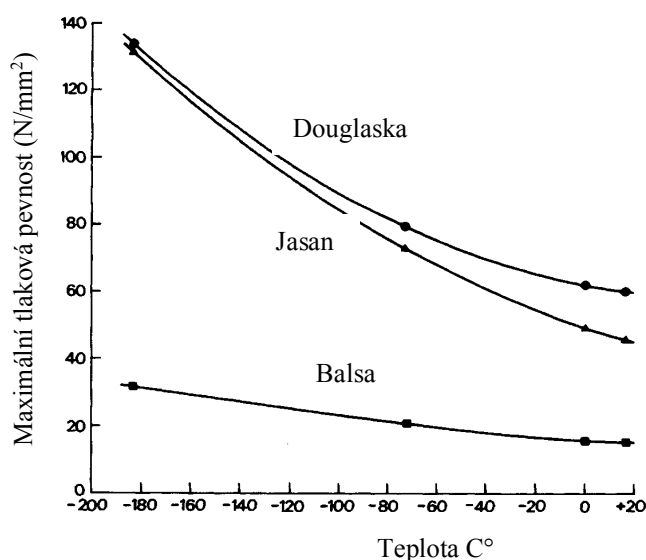
Bobtnání dřeva vyjadřuje, jakou měrou došlo ke zvětšení objemu, hodnota bobtnání se udává v procentech k absolutně suchému dřevu. Naopak sesychání dřeva vyjadřuje zmenšení objemu dřeva, je vyjádřeno procentuálně z rozměru dřeva v čerstvém stavu. Sesychání a bobtnání dřeva jsou vlastnosti, které mají vliv na mechanické vlastnosti dřeva. U dřevěných materiálů je bobtnání a sesychání o to složitější, že neprobíhá ve všech směrech stejně, ale je závislé na anatomické stavbě dřeva. Pro každý směr je bobtnání a sesychání dřeva jiné. Dřevo v podélném směru bobtná nejméně a dosahuje hodnot 0,1 - 0,6 %. V tangenciálním směru však bobtná dřevo

nejvíce, a to o 6 - 13 %, v radiálním směru je to pak o 3 - 5 % (Balabán 1955, Horáček 1998, Dinwoodie 2000).

3.2.3 Teplota

Při teplotách v rozmezí +200 °C až -200 °C a při konstantním obsahu vlhkosti jsou pevnostní vlastnosti lineárně (nebo téměř lineárně) vztaženy k teplotě a s rostoucí teplotou klesají. Je však třeba rozlišovat mezi krátkodobými a dlouhodobými vlivy. Pokud je dřevo vystaveno na krátkou dobu teplotám pod 95 °C, jsou změny pevnosti s teplotou reverzibilní. Tyto reverzibilní účinky lze vysvětlit pomocí zvýšených molekulárních pohybů a většího rozestupu mřížky při vyšších teplotách. Obrázek 9 znázorňuje zvýšení pevnosti, ke kterému došlo po snížení teploty u tří dřevin zatížených tlakem podél vláken. Pro všechny pevnostní vlastnosti, s možnou výjimkou tahové pevnosti ve směru vláken, je dobrým pravidlem, že zvýšení teploty o 1 °C způsobí 1 % snížení jejich konečných hodnot (Gerhards 1982).

Při teplotách nad 95 °C nebo při teplotách nad 65 °C po velmi dlouhou dobu dochází k ireverzibilnímu účinku teploty v důsledku tepelné degradace dřevní hmoty, obvykle ve formě výrazného zkrácení délky molekuly celulózy a chemické změny v hemicelulózách (Dinwoodie 2000). Vliv teploty na maximální tlakovou pevnost ve směru vláken u tří dřevin je popsán na obrázku 9.



Obr. 9. Vliv teploty na maximální pevnost v tlaku, rovnoběžně s vlákny ve dvou dřevinách z tvrdého a jednou dřevinou z měkkého dřeva (Dinwoodie 2000)

Bylo prokázáno, že dlouhodobé vystavení cyklickým změnám teploty vede k tepelné degradaci a ztrátě pevnosti a zejména pak houževnatosti dřeva (Moore 1984).

Vliv teploty je závislý na obsahu vlhkosti. Pevnost dřeva při různých teplotách se mění při různé vlhkosti. Vztah mezi pevností, obsahem vlhkosti a teplotou se zdá být mírně křivočarý v rozmezí 8 - 20 % obsahu vlhkosti a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Gerhards 1982, Dinwoodie 2000).

3.3 Mechanické vlastnosti dřeva

Dřevo jako materiál je používán v různých odvětvích, kde se využívají jeho mechanické vlastnosti, jako je pružnost a pevnost. Dřevo má také skvělý poměr váhy a pevnosti (toho se využívá hlavně ve stavebnictví).

Znalost těchto mechanických vlastností se uplatňuje při technologickém zpracování dřeva, kdy na základě mechanických vlastností dřeva volíme i vhodnou technologii. Širší škálu vlastností dřeva dělíme podle fyzikální podstaty a vnějšího charakteru na mechanické vlastnosti a fyzikálně chemické vlastnosti dřeva. Fyzikální vlastnosti byly již zmíněny v předchozích kapitolách, ale důležitou skupinou jsou právě mechanické vlastnosti dřeva, které dělíme do dvou skupin, a to na základní a odvozené. Mezi základní rozdělení patří houževnatost, plastičnost, pevnost a pružnost. V odvozených vlastnostech pak jsou odolnost proti únavovému lomu, odolnost proti dlouhodobému zatížení, odolnost proti tečení dřeva a tvrdost dřeva (Kafka 1989, Požgaj a kol. 1993).

Dřevo je tvořeno atomy a molekulami, které mají určité uspořádání v prostoru. Homogenní uspořádání těchto molekul a atomů ve dřevě a orientace kovalentních a vodíkových vazeb, mají vliv na velikost a orientaci mechanických vlastností na úrovni makrostruktury a mikrostruktury dřeva. Odlišnost mechanických vlastností v různých směrech se nazývá anizotropie mechanických vlastností. Opačným pojmem popisující stav, kdy jsou mechanické vlastnosti materiálu ve všech směrech stejné je izotropie. Díky experimentům věnujícím se anizotropii víme, že se mechanické vlastnosti v jednotlivých směrech výrazně liší, a to i mezi radiálním a tangenciálním směrem (Kollmann a kol. 1956).

Uspořádání základních buněk dřeva (libriformních vláken, tracheid, směr mikrofibril ve střední vrstvě sekundární stěny) a jejich tvar významně ovlivňuje mechanické vlastnosti dřeva kolmo a podél vláken. Namáhání, která působí směrem

kolmo na vlákna mají za následek větší deformace z důvodu zploštění buněk než v rovnoběžném směru (ve směru vláken). Chemicko-energetické vazby dřeva mají vliv na rozdílné mechanické vlastnosti dřeva v kolmém a podélném směru. V podélném směru se při odporu vůči namáhání podílejí kovalentní vazby, kdežto v kolmém směru to jsou vodíkové vazby (Kafka 1989, Požgaj a kol. 1993).

3.3.1 Pružnost

Pružnost je schopnost materiálu vrátit se do původního stavu po uvolnění působících sil. Dřevěný materiál však není dokonale pružný, což znamená, že proces zatěžování a odtěžování neprobíhá v jedné rovině, ale vytváří hysterezi.

S pružností jsou pevně spjaty hlavně charakteristiky:

- modul pružnosti (E),
- Poissonova čísla (μ),
- mez úměrnosti (σ_u),
- energie pružné deformace (W_p).

S těmito charakteristikami lze počítat v rámci pracovního diagramu v oblasti platnosti Hookova zákona, tedy lineární části diagramu, kde je normálové napětí přímo úměrné relativnímu prodloužení (Požgaj a kol. 1993, Horáček 2008).

3.3.1.1 Modul pružnosti

Modul pružnosti popisuje vnitřní odpor materiálu vůči pružné deformaci. Se zvyšující se hodnotou modulu pružnosti, musíme vyvolat vyšší napětí potřebné k deformaci. Známe a rozlišujeme moduly pružnosti E pro ohyb, tlak, tah, tedy normálové namáhání a moduly pružnosti G pro smyk a kroucení, tedy tangenciální namáhání. Charakteristika modulu pružnosti v tlaku a tahu je uvedena ve vzorci (5). Modul pružnosti E je tedy podílem napětí příčné deformace a deformací kolmo na vlákna (Požgaj a kol. 1993).

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (5)$$

kde:

E – modul pružnosti v tahu/tlaku [Pa],

σ – napětí v tahu [Pa],

ε – poměrná deformace [-].

Další charakteristikou, která nám ukazuje poměr mezi příčnou deformací a prodloužením je Poissonovo číslo. Při tlaku působícím ve směru vláken nám vyvstávají dvě Poissonova čísla (6) a (7) (Požgaj a kol. 1993).

$$\mu_{TL} = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (6)$$

$$\mu_{RL} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_L} \quad (7)$$

kde:

ε_T – příčná poměrná deformace v tangenciálním směru [-]

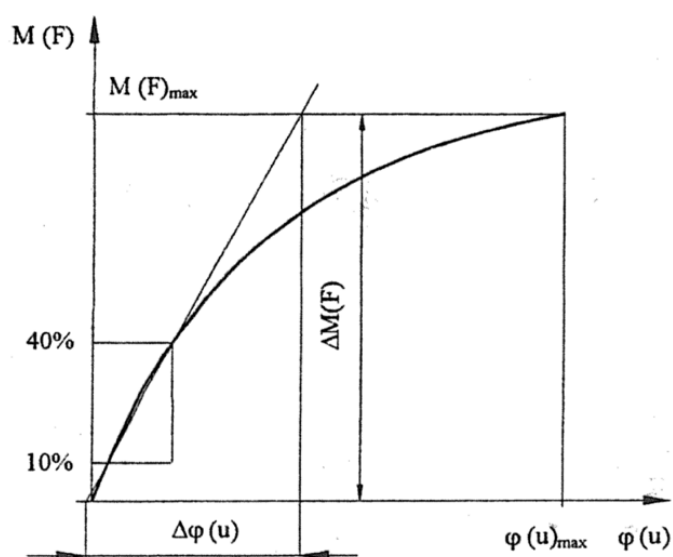
ε_R – v radiálním směru [-]

ε_L – poměrná deformace ve směru vláken [-]

V izotropních materiálech dosahuje Poissonovo číslo hodnot do 0,5. Poissonova čísla společně s moduly pružnosti charakterizují a popisují deformační vlastnosti dřeva, ale jen v pružné (lineární) oblasti (Požgaj a kol. 1993, Kuklík 2004).

3.3.1.2 Mez úměrnosti

Mez úměrnosti popisuje stav, kdy se lineární průběh diagramu (Obr. 10) odklání a přechází do nelineárního.



Obr. 10. Modelový pracovní diagram (Joščák 1999)

Odklon od lineárního průběhu zapříčiňuje větší poměr plastických deformací a deformací pružných v čase. Mezi úměrnosti (σ_u) se pak nazývá bod, ve kterém dojde k odklonu od lineární části diagramu. V tomto bodě je nejvyšší napětí v materiálu, kdy nedochází ke vzniku plastických deformací a deformací pružných v čase.

Mez úměrnosti je ale třeba chápat i ve vztahu k času, tedy rychlostí zatěžování. Uvedené vztahy platí především u krátkodobých zatížení. Při trvalém zatížení se dřevo začne chovat jako viskoplastický materiál až po mez úměrnosti.

Kvůli dlouhodobému zatížení dřeva se objevují při napětí pod mezí úměrnosti kromě pružných deformací také deformace pružné v čase a deformace plastické (Požgaj a kol. 1993).

Tabulka 2 uvádí moduly pružnosti a Poissonova čísla smrku a modřínu v hlavních směrech pružné symetrie. Tabulka 3 popisuje smykové moduly smrku a modřínu.

Tab. 2. Moduly pružnosti a Poissonova čísla smrku a modřínu

Dřevina	Ve směru vláken		V radiálním směru			V tangenciálním směru			
	Poissonova čísla		Modul E_L (MPa)	Poissonova čísla		Modul E_R (MPa)	Poissonova čísla		Modul E_T (MPa)
	μ_{RL}	μ_{TL}		μ_{TR}	μ_{LR}		μ_{RT}	μ_{LT}	
Smrk ztepilý	0,489	0,557	13650	0,990	0,023	789	0,687	0,014	289
Modřín opadavý	0,508	0,566	15789	0,727	0,056	1875	0,467	0,044	1269

Počet pozorování $n = 90-120$ pro každý průměr, rozměry těles $50 \times 50 \times 150$ mm.
(L, R, T) ($W_a = 11 - 12$ %)

Tab. 3. Smykové moduly pružnosti smrku a modřínu

Dřevina	Radiální rovina G_{LR} (MPa)	Tangenciální rovina G_{LT} (MPa)	Příčná rovina G_{RT} (MPa)
<i>Smrk ztepilý</i>	573	474	53
<i>Modřín opadavý</i>	1324	1082	254

($W_a = 11 - 12$ %, $n = 30$)

3.3.2 Tuhost

Tuhost dřeva je chápána jako změna délky tělesa vzhledem k velikosti vnější působící síly (ve směru působící síly) v rámci pružné deformace. S tuhostí také souvisí

poddajnost, což je převrácená hodnota tuhosti. Tuhost a poddajnost lze vyjádřit vztahy pro výpočet koeficientu poddajnosti (8) a koeficientu tuhosti (9) (Joščák 1999).

$$z = \frac{\Delta u(\varphi)}{\Delta F(M)} \quad (8)$$

kde:

u – deformace [m],

F – síla [N],

z – koeficient poddajnosti [N/m].

$$t = \frac{1}{z} = \frac{\Delta F(M)}{\Delta u(\varphi)} \quad (9)$$

kde:

t – koeficient tuhosti [N/m].

3.3.3 Pevnost

Pevnost dřeva je schopnost odolávat silám proti jeho porušení. Pevnost vyjadřujeme jako výši napětí, při kterém dojde k porušení dřeva a jeho soudržnosti.

Z pohledu fyziky se rozděluje pevnost podle druhu:

- konvenční pevnost,
- skutečná pevnost,
- ideální nebo teoretická pevnost.

Konvenční pevnost vyjadřuje nevyšší možné napětí vztažené k průřezu tělesa před zatížením. U dřeva ale dochází ke změně průřezu, a proto je z praktického hlediska konvenční pevnost u dřeva nepoužitelná.

Skutečná pevnost je definována jako skutečné napětí při zatížení ve chvíli, kdy dojde k porušení zkušebního tělesa. Při jedno osovém zatížení v tahu, můžeme skutečnou pevnost vyjádřit jako podíl síly, ve chvíli porušení, a původní plochy, jak je uvedeno ve vzorci (10) (Požgaj a kol. 1993).

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{S} \quad (10)$$

kde:

F – síla [N]

S – plocha [mm²]

Ideální pevnost je pak maximální pouze teoretická pevnost dřeva, které je možné dosáhnout u konkrétní dřeviny a za daných podmínek zatížení. Pevnost dřeva se zjišťuje pomocí zkoušek, ve kterých je dodržován určitý postup a podmínky. Nejedná se tedy o konstanty, ale hodnoty závislé od způsobu provedení zkoušky. Abychom mohli jednotlivé hodnoty porovnávat vznikla dohoda o zkušebních postupech.

Pevnostní vlastnosti dřeva se rozdělují:

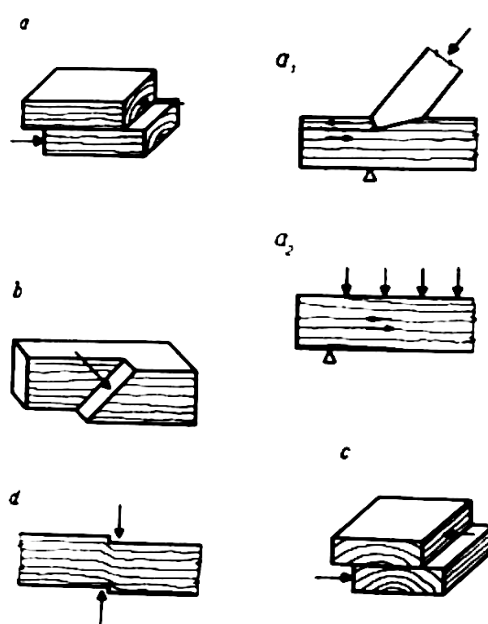
- a) stavu napjatosti a pevnosti získané při jedno osovém a více osovém stavu napjatosti;
- b) způsobu zatížení:
 - pevnost v tahu,
 - pevnost v tlaku,
 - pevnost v ohybu,
 - pevnost v krutu,
 - pevnost ve smyku;
- c) časového průběhu zátěžové síly:
 - statické,
 - dynamické;
- d) účinku zatížení dřeva:
 - pevnost, kterou jsme získali destrukcí dřeva, jeho porušením,
 - pevnost určenou nedestruktivně, při které nedošlo k trvalé změně materiálu (Požgaj a kol. 1993, Kuklík 2004).

3.3.3.1 Smyková pevnost

Pevnost ve smyku lze charakterizovat jako schopnost materiálu odolávat vnitřnímu kluzu jedné vrstvy po druhé. Jde o dvě působící síly na jedné nositelce působící opačným směrem (Forest Products Laboratory 1999).

Pevnost dřeva ve smyku podél vláken je poměrně malá. Jehličnatá dřeva mají zhruba 1,5 krát nižší smykovou pevnost než dřevo listnatých dřevin. Dále je u listnatých dřev rozdíl, zda působíme smykovým namáháním v tangenciální či radiální rovině,

neboť v radiální rovině je smyková pevnost o 10-30 % nižší než v tangenciální rovině. Tento rozdíl nabývá vyšších hodnot v důsledku přítomnosti dřeňových paprsků u dřevin jako je buk, habr, dub. U jehličnatých dřev rozdíl pevností závislých na směru není tak veliký. Průměrná pevnost ve smyku ve směru vláken je asi 1/5 meze tlakové pevnosti ve směru vláken. Je známo, že i přes malou pevnost ve smyku je dřevo takto namáháno. Nejde však o prostý smyk, ten je spíše teoretický a v praxi k němu dochází velmi zřídka. Smyk se ale vyskytuje i při jiných způsobech zatěžování jako je krut nebo ohyb. Některé druhy smykového namáhání jsou vyobrazena na obrázku 11. To jsou základní a výrazně odlišné stavy (Kafka 1989, Matovič 1993).



Obr. 11. Základní případy namáhání dřeva smykem (Kafka 1989)

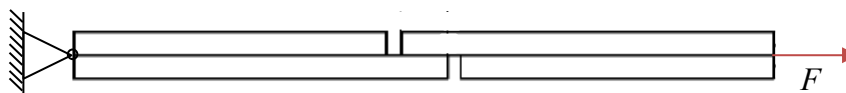
a - smyk rovnoběžně s vlákny a₁ ve spoji, a₂ za ohybu, b - smyk v rovině vláken šikmo k vláknům, c - smyk v rovině vláken kolmo k vláknům (valivý smyk), d - smyk kolmo k vláknům (střih)

3.3.3.1.1 Tahová smyková pevnost

Tahovou smykovou pevnost dřeva lze charakterizovat jako schopnost materiálu odolávat vnitřnímu kluzu jedné vrstvy po druhé vlivem tahové síly ve směru vláken (Forest Products Laboratory 1999).

Pevnost ve smyku v tahu (Obr. 12) je jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností lepeného dřeva. Primární faktory, které mají vliv na pevnost ve smyku lepeného dřeva v tahu, lze klasifikovat takto: faktory související s vlastnostmi dřeva, jako je průměr

lumenu a vlivy na povrch dřeva. Faktory související s adhezivem, jako je viskozita a faktory související se zpracováním lepidel za tepla, jako je čas, teplota, tlak a obsah vlhkosti. Je tedy zřejmé, že charakteristika účinků takových faktorů na pevnost ve smyku lepeného dřeva v tahu má zásadní význam (Gavrilovic-Grmusica a kol. 2016).



Obr. 12. Namáhání ve smyku tahem (ČSN EN 302-1, 2013)

3.3.3.2 Faktory ovlivňující pevnost dřeva

Vlhkost

Vlhkost ovlivňuje mechanické vlastnosti dřeva, a to hlavně v rozmezí 0 - 30 % obsahu vody ve dřevě. Jedná se tedy o vodu vázanou, která má na mechanické vlastnosti vliv. Pokud dřevo vysušíme pod bod nasycení vláken, zvyšuje se jeho pevnost a tuhost. Jestliže dřevo nějakou vlhkost přijme pod bodem nasycení vláken, pevnost a tuhost se naopak snižuje. Tyto procesy jsou vratné a nezanechávají na dřevě žádné trvalé změny, pokud tedy vlhkost dřeva opět poklesne, pevnostní vlastnosti se vrátí do původních hodnot (Ritter 1990).

Teplota

Obecně platí, že při zvyšování teploty se mechanické vlastnosti dřeva snižují, a naopak se zvyšují, když se teplota snižuje. Tento teplotní efekt nastává okamžitě a je z větší části vratný, pokud je dřevo vystavováno krátkým expozicím vyšších teplot. To platí, pokud teplota nepřesáhne 65°C. Trvalé snížení pevnosti tak vychází z degradace dřevní hmoty vlivem vyšších teplot jak 65°C. Rozsah poškození souvisí i s vlhkostí ve dřevě, topném médiu, teplotě, době expozice a v menší míře na typu dřeviny a velikosti vzorku. Důležitým faktorem je velikost a tvar namáhaného dřeva, ale i míra zatížení včetně doby teplotního zatížení. Při větších rozměrech těles a krátké teplotní expozici, nestačí okolní teplota ovlivnit vnitřní části dřeva. To má zásadní vliv na chování dřeva při různých typech zatížení (Millett a kol. 1972, Gerhards 1982, Forest Products Laboratory 1999).

Doba zatížení

Dřevo vykazuje jednu důležitou vlastnost, a to snášet maximální zatížení na krátkou dobu. Čím kratší doba zatížení, tím vyšší konečná pevnost dřeva. Dlouhodobé zkoušky také ukázaly, že přerušované zatížení vyvolává stejné kumulativní účinky a působí na dřevo stejně jako nepřetržité zatížení trvající stejnou dobu (Gerhards 1979).

Například střídavé zatížení působící po dobu 50 let by mělo stejné následky, jako stejné zatížení působící neustále bez přerušení po dobu 25 let. Pro dřevěné konstrukce jsou hodnoty pevnosti dřeva založeny na předpokládané době normálního zatížení 10 let (Ritter 1990).

3.4 Lepidla

Lepidla se využívají jako nerozebíratelný spojovací prostředek, který spojuje vrstvy či jednotlivé prvky do jednoho celku. Lepidla jsou jak v kapalné, tak pevné formě v závislosti na aplikační technologii. Lepidla lze rozdělit do dvou základních skupin podle druhu na přírodní (kaučuk, kasein, albumin a klihy) a syntetická (polyuretany, izokyanáty, polyvinylacetáty, akryláty, epoxidy, atd.) (Král 2011).

3.4.1 Základní vlastnosti lepidel

Důležitou vlastností lepidel je jejich adheze a koheze. Adheze je definována jako schopnost lepidla dostatečně přilnout k povrchu. Pokud je adheze nízká, tak lepený spoj má velmi malou pevnost. Adhezi rozumíme jak chemické (primární chemické vazby) a fyzikální vazby (van der Waalsovy mezimolekulární síly, difuzní síly, Londonovy disperzní síly, Keesomovy elektrostatické síly, Debeyovy indukční síly, valenční adhezí síly), tak mechanické provázání do pórů materiálu a jeho nerovností. Další důležitou vlastností lepidel je koheze. Koheze je definována jako stav, ve kterém jsou částice látky drženy pohromadě mezimolekulárními a valenčními silami (Liptáková a kol. 1989).

Elektrostatická teorie popisuje adhezi jako vliv elektrostatických sil. Zastánci této teorie tvrdí, že při odtrhnutí filmu lepidla dojde k elektrickému výboji (Král 2011).

Teorie difúze je definována jako přenos molekul pojiva do lepeného materiálu a naopak. Tento přenos molekul se popisuje jako mikro-Brownův pohyb molekul. Teorie je však omezena předpokladem, že lze vzájemně rozpustit polymerní látky jak v lepidle, tak v lepeném materiálu (Král 2011).

3.4.2 Teorie lepení

Mechanická teorie lepení je charakterizována jako soudržnost lepeného spoje důsledkem penetrace lepidla do pórů dřeva a jeho nerovností. Lepidlo v pórech pak po vytvrdnutí vytváří mikro-kolíkové spoje. Mechanická teorie lepení nám však neobjasňuje lepení neporézních a hladkých materiálů (Král 2011).

Adhezivní teorie a adheze jako taková není jednoduchý a snadný proces. Adheze je složena z více fyzikálně-chemických procesů, které se vzájemně doplňují. Přes složitost problému už dnes ale víme, jaké jsou dobré vlastnosti pro lepidla a při jakých podmínkách správně lepit. Všechny teorie mají shodu na tom, že se molekuly lepidla a lepeného materiálu musí vzájemně dostatečně přiblížit abychom mohli mluvit o adhezi. Lepidlo musí tedy být do určité míry kapalné, nebo alespoň plastické při tvorbě lepidvého filmu a mělo potřebnou smáčivost (Král 2011).

3.4.3 Přírodní lepidla

Přírodní lepidla jsou nejstarším typem lepidel. Z přírodních lepidel známe dvě základní skupiny, a to lepidla živočišného a lepidla rostlinného původu. Mezi živočišná lepidla se řadí klihy (rybí, glutinové, kaseinové, albuminové). V případě rostlinných lepidel využíváme např. škroby, mouky, dextriny, rostlinné gumy a jiné. Skupina přírodních lepidel je velmi citlivá na vlhkost a není vhodná pro venkovní použití. Přírodní lepidla však nesplňovala požadavky na lepení v exteriéru a nových materiálů, a proto byl zahájen výzkum lepidel syntetických (Boublík 1966).

3.4.4 Syntetická lepidla

Přírodní lepidla po určité době přestala splňovat určité standardy, a proto vznikla nová skupina syntetických lepidel, která se přibližně v roce 1930 uchytila v dřevozpracujícím průmyslu a pomalu nahrazovala přírodní lepidla. Vývoj syntetických lepidel umožnil i rozvoj nových materiálů, ve kterých jsou syntetická lepidla nedílnou součástí. Vznik syntetických lepidel umožnil využití lepeného spoje i mimo nábytkářství (Kamenický a kol. 1984).

3.4.4.1 PUR lepidla

Polyuretanové lepidlo je polymer, který je složen z řetězců organických jednotek spojených vazbami takzvaného karbamátu (uretanu). Pro výrobu polyuretanu se používá více způsobů, ale pro průmyslovou výrobu se nejčastěji používá reakce izokyanátových skupin s látkami, které obsahují aktivní vodík. Polyuretan se řadí mezi lepidla, která vznikají polyadici. Polyuretany jako takové našli uplatnění v mnoha oborech a stále se pro ně objevují nová použití (Liptáková a kol. 1989, Mleziva 1993).

Původní složení polyuretanových lepidel bylo dvousložkové. Reakce fungovala na principu chemické reakce vícesytných alkoholů (polyolů) s více funkčními izokyanáty. Rychlost této reakce probíhala poměrně rychle a během polymerace spojila všechny složky do polymerní sítě. Kvůli zjednodušení a urychlení procesů byly dvousložkové polyuretany nahrazeny polyuretany jednosložkovými. Fungovala na principu polyolu reagujícího s nadbytkem izokyanátu. V polyuretanu tak přebývali nezreagované izokyanátové skupiny. Izokyanátové skupiny jsou citlivé na vodu, podobně jako kanoakryláty, aminy, kyseliny, alkoholy a jiné chemické látky obsahující aktivní vodík (Černá a kol. 1989, Rowell 2005).

Vlivem vlhkosti ve vzduchu dochází k rozkladu izokyanátové skupiny a tím se zahájí rychlá polymerační reakce a dojde k vytvrzení lepidla. Rychlost reakce je ale stále nižší než u kyanoakrylátů (známe pod pojmem vteřinové lepidlo). Postup reakce je kolem 4 mm do hloubky lepidla za 24 hodin. Jednosložkové polyuretany jsou náchylné na vlhkost, a proto je třeba je uskladnit na suchém místě a bez přístupu vzdušné vlhkosti (Nálepa 1990, Brockmann 2009).

3.4.4.2 EPI lepidla

EPI lepidla jsou disperzní lepidla, která mohou být založena na různých polymerech. Obecně neobsahují rozpouštědla, ale mohou obsahovat přísady, které byly přidány k úpravě zpracovatelských a vazebných vlastností lepidla. Obvykle vysoký obsah minerálních plniv může na strojích působit abrazivní účinek. Klíčovým znakem je to, že lepidla EPI jsou zesítěna za použití relativně vysokého množství izokyanátu na bázi MDI (obvykle přidáním 15 % z hmotnosti lepidla). Tato zesíťovací reakce vede k vysoké odolnosti vůči vodě a teple (TKH 2015).

Díky těmto vlastnostem jsou EPI lepidla zvláště vhodná pro aplikace, splňující podmínky aplikace D4, to samo o sobě ale nestačí. Dobrým příkladem jsou tmavé dubové

dveřní panely, upravené dřevo nebo exotické dřevo. I když by pro tyto aplikace stačilo D4, u standardních lepidel PVAc D4 nelze vyloučit rozlepení spojů. Kombinace vystavení vlhkosti a vysokému tepelnému namáhání způsobuje napětí ve dřevě v důsledku bobtnání, sesychání, snížené absorpce vody nebo poškození složek dřeva (TKH 2015).

Tento typ aplikací, při vystavení extrémním podmínkám, vyžaduje lepidlo, které může poskytnout vynikající pevnost spoje i za výše uvedených klimatických podmínek. Toho lze dosáhnout buď lepidly pro nosníky typu glulam, nebo lepidly EPI. Je třeba si uvědomit, že k výrobě nosných dílů podle norem mohou být použita pouze certifikovaná lepidla. Kromě toho mohou být takové výrobky vyráběny pouze certifikovanými a sledovanými společnostmi (TKH 2015).

3.4.5 Vliv faktorů a vlastností dřeva na kvalitu lepení

Dřevo je nehomogenní materiál skládající se z mnoha buněk. Většina buněk je mrtvých bez obsahu protoplazmy a vyplněných vzduchem, nebo vodou. Stavbu dřeva lze charakterizovat makroskopickou, mikroskopickou a submikroskopickou strukturou, ale i mechanickými a fyzikálními vlastnostmi.

Významný vliv má obsah vody ve dřevě na lepicí vlastnosti dřeva. Velký počet volných hydroxylových skupin způsobuje hydrofilnost dřeva a adsorpci vody. Vlhkostí dřeva pak rozumíme obsah vody volné (vyplňující kapiláry, lumény a mezibuněčné prostory) a vázané (chemicky uložené uvnitř buněk). Maximální objem vody vázané nazýváme jako bod nasycení vláken. K přichýlení vody na hydroxylové skupiny polysacharidů dojde vlivem mezimolekulárních sil a vytvořením vodíkových můstků. Pohyb vody mezi dřevem a okolím pak závisí na teplotě a relativní vlhkosti vzduchu. V důsledku adsorpce a desorpce vody dochází ke změně objemu dřeva (bobtnání/sesychání). Změny objemu mají vliv na pevnost lepeného spoje (Sedliačik 1992).

3.4.5.1 Druh dřeva

Každé dřevo má jiné vlastnosti a stejně to platí i při jejich lepení. Například borové a bukové dřevo mají své specifika na které je potřeba dát při lepení pozor. Borové dřevo obsahuje pryskyřici, která může mít negativní vliv na adhezi lepidel, proto je dobré pryskyřici odstranit pomocí organických rozpouštědel. Bukové dřevo je zase citlivé na

vlhkost, kdy při kontaktu s vodou dochází k velkým objemovým změnám. Lepený spoj je tak namáhán v důsledku vnitřního pnutí bukového dřeva.

Dalším důležitým aspektem je tvrdost dřeva. U měkčích dřev není kladen takový důraz na rovnost povrchu jako u tvrdých dřev, neboť měkké dřevo se v důsledku tlaku lehce zdeformuje. Tvrdá dřeva by při nedokonalé hladkém povrchu mohla v důsledku nerovností vytlačit lepidlo ze spáry a vznikl by tak chudý spoj, který by byl kritickým místem lepeného dřeva (Eisner 1966, Rowell 2005).

3.4.5.2 **Obsah pryskyřic**

Pryskyřice je přítomná hlavně u jehličnatých dřevin, které jsou rozpuštěny v éterických olejích a silicích. Při porušení struktury dřeva se těkavé látky odpaří a zůstane pryskyřice. Chemické složení pryskyřice je převážně z pryskyřičných kyselin, alkoholů a látek, které nereagují se zásadami. Pryskyřice je díky tomu hydrofobní a snižuje tak smáčivost povrchu dřeva. Před lepením je tedy vhodné povrch zkontrolovat a případnou pryskyřici odstranit organickým rozpouštědlem. Ne na všechna lepidla má pryskyřice negativní vliv. Kaseinová a fenol-formaldehydová lepidla s pryskyřicí nemají žádný problém, což umožňuje výrobu velkoplošných desek a hranolů bez postupů k odstranění pryskyřic (Eisner 1966, Rowell 2005).

3.4.5.3 **Hustota dřeva**

Jednotlivé druhy dřevin mají i rozdílnou hustotu. Hustota pak má podíl na vlastnostech lepení a pevnosti lepeného spoje. Závislost hustoty a pevnosti není tak jednoznačná, neboť nezávisí pouze na množství dřevní substance ale i na anatomické stavbě dřeva, vlhkosti, chemickém složení, stanovištních podmínkách a poloze v kmeni. Nejčastěji se pro teoretické využití udává hustota v absolutně suchém stavu. Dalším faktorem je pórovitost, která není přímo závislá na hustotě a má vliv na propustnost lepidla do povrchu dřeva. Dalším faktorem ovlivňující lepený spoj je rozdílná hustota u jarního a letního dřeva. V této práci jsou použité dřeviny smrku s nízkou a modřínu se střední hustotou (Eisner 1966, Rowell 2005).

3.4.5.4 Teplota

Teplota vzduchu a povrchu lepeného materiálu má vliv na rychlost vytvrzování lepidel. U některých druhů lepidel může vlivem nízké teploty k nedokonalému spoji. Citlivá na nízké teploty jsou hlavně syntetická lepidla. Většina lepidel má proto stanovenou hranici minimální teploty, a to okolo 10 °C. Nízká teplota není však jediným rizikem. Při vyšší teplotě lepeného materiálu může dojít k předčasnému vytvrnutí lepidla a ztrátě přilnavosti k lepenému povrchu (Eisner 1966, Rowell 2005).

3.4.5.5 Vlhkost dřeva

Reakce dřeva na vodu je důležitou vlastností dřeva a důležitou vlastností i pro lepení. Některá lepidla jsou dispergována pomocí roztoku, například vodného roztoku a pro jejich vytvrzení je potřeba odvedení vody z roztoku do dřeva. Při příliš velké vlhkosti dřeva je tento proces zpomalen velkým obsahem vody ve dřevě. Proto výrobci lepidel udávají doporučenou vlhkost lepeného materiálu. Jiná lepidla například polyuretany s vodou naopak reagují a vytvrzují rychleji, proto se někdy příliš suchý povrch uměle navlhčí, aby došlo k potřebné reakci (Eisner 1966, Rowell 2005).

3.4.5.6 Povrch dřeva

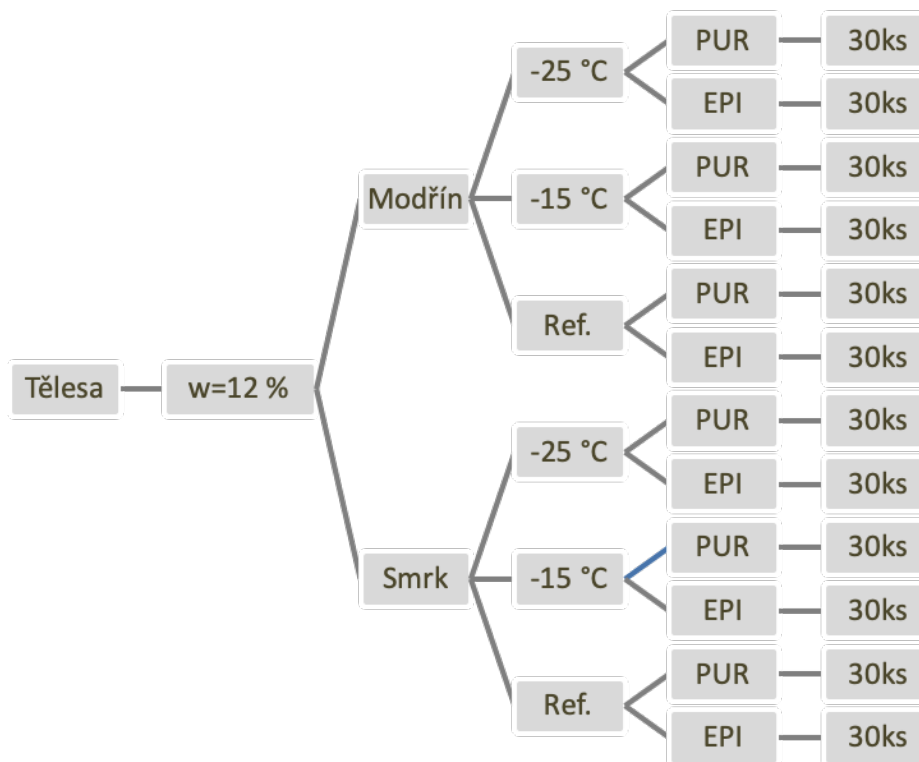
Čistota povrchu a stupeň opracování má vliv na kvalitu lepení. Podle způsobu opracování povrchu dřeva může být povrch drsný, nebo hladký. Pokud je povrch hladký vytvoří se tenká lepená spára a je větší šance na vznik kvalitního spoje. Finální úprava lepeného povrchu by měla předcházet těsně před lepením. Pokud by bylo dřevo uskladněno na delší dobu mohlo by dojít k znehodnocení lepeného povrchu a zhoršení lepicích podmínek. Jak uvádí i výrobci lepidel, povrch je třeba před lepením dokonale očistit od prachových částic, mastnoty, olejů a pryskyřic (Eisner 1966, Rowell 2005).

4 Metodika experimentálních prací

4.1 Příprava těles

Měření všech těles bylo provedeno v laboratořích ČZU v Dřevařském pavilonu Fakulty lesnické a dřevařské v Praze.

Podle schématu (Obr. 13) byla tělesa rozdělena do několika souborů na základě druhu dřeviny, typu použitého lepidla a druhu teplotního zatížení (reference 20 °C, -15 °C a 70 °C, -25 °C a 70 °C). Výroba a rozměry těles odpovídaly normě ČSN EN 302-1 (2013). Počet těles na jednu skupinu činil 30 kusů, aby byla zajištěna přesnost výsledků a bylo možné vyřadit vadná tělesa.



Obr. 13. Schéma rozdělení těles

Ze sušeného řeziva byly nařezány šířkově a délkově sdužené přířezy, na kterých byl pomocí srovnávací frézky vytvořen pravý úhel. Na formátovací pile byly přířezy nařezány na 8 mm tlusté „švartny“ (opět jako délkově i šířkově sdužený přířez) tak, aby řez probíhal kolmo na letokruhy viz Obr. 14. Nařezané přířezy byly tloušťkově opracovány tloušťkovací frézku na konečnou tloušťku 5 mm.



Obr. 14. Nařezané a slepené lamely

4.1.1 Lepení těles

Na jednotlivé přířezy bylo nanášeno lepidlo EPI Kestokol WR 11, nebo PUR Kestopur 1030. Obě dvě lepidla jsou od firmy Kiilto Oy, Finsko. Nános lepidla odpovídal předepsaným hodnotám a pohyboval se okolo 200 g/m^2 . Obě lepidla byla použita pro slepení 6 souborů těles. Po nanášení lepidla byly přířezy složeny a za pomoci lisu (Obr. 15), slisovány podle předepsaných hodnot výrobcem lepidla.



Obr. 15. Plošný lis SCM

Doba vytvrzování byla pro každé lepidlo jiná, podle informací výrobce. Pro PUR lepidlo byla doba vytvrzování 90 minut, u EPI lepidla byla doba vytvrzování jen 20 minut s tím, že 7 dní se nechala tělesa odležet pro úplné vytvrzení lepidla a plnou odolnost spoje vůči vlhkosti. Krátká doba vytvrzování byla zapříčiněna dvousložkovou strukturou lepidla.

4.1.2 Rozměrová příprava těles

Slepené přířezy byly na formátovací pile nejdříve podélně rozřezány na požadovanou tloušťku těles a následně délkově zkráceny na konečnou délku. Při krácení byly maximálně vymanipulovány vady, jako jsou suky, smolníky a trhliny.

Po nakrácení všech lamel, byla jednotlivá tělesa prořezána z každé strany do půlky tělesa tak, aby při tahové zkoušce docházelo k přenosu napětí pouze v lepeném spoji. Řez tak musel vést lepenou spárou.

4.1.3 Značení těles

Každá lamela byla označena číslem (Obr. 16), dále písmenem podle typu použitého lepidla a písmenem podle použité metody namáhání. Dřevina v kódu obsažena nebyla, neboť byla od sebe snadno rozeznatelná.



Obr. 16. Značení těles

Každé těleso mělo kód obsahující tři znaky. Příklad značení těles je uveden následovně:

1-E-A

- první znak je číslo tělesa (1-30),
- druhý znak je typ použitého lepidla (EPI, PUR),
- třetí znak je druh zatížení (R-referenční tělesa, A-teplota -15 °C, B-teplota -25 °C).

4.1.4 Klimatizace těles

Všechna tělesa byla před další manipulací klimatizována na konečnou vlhkost 12 % pomocí klimatizační komory Memmert IPS260 (Obr. 17). Byla použita tato vlhkost, neboť lepené dřevo se často používá v exteriéru, kde vlhkost dřeva nabyde podobných hodnot. Klimatizování těles probíhalo v klimatizační komoře při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %. Tělesa byla skládána tak, aby bylo umožněno plynulé proudění vzduchu. Z každé skupiny těles (ref., -15 °C a 70 °C, -25 °C a 70 °C) byla vybrána tři tělesa, která byla průběžně vážena a sledována jejich hmotnost. Při dvou po sobě jdoucích měření, při kterých se hodnoty nelišily o 0,1 % hmotnosti těles byla tělesa považována za klimatizovaná na požadovanou 12 % vlhkost.



Obr 17. Klimatizační komora (Fisher Scientific s.r.o. 2020)

4.1.5 Určení hustoty těles

Hustota zkušebních těles byla určena podle normy ISO 13061-2 (2014). Pro výpočet hustoty byl použit následující vzorec (14).

$$\rho_w = \frac{m_w}{b_w h_w l_w} = \frac{m_w}{V_w} \quad (14)$$

kde:

ρ_w – hustota tělesa při vlhkosti w [g/cm^3]

m_w – hmotnost tělesa při vlhkosti w [g]

$b_w h_w l_w$ – rozměry zkušebního tělesa při vlhkosti w [cm]

V_w – objem tělesa při vlhkosti w [cm^3]

4.1.6 Měření a vážení těles

Vážení těles probíhalo při klimatizaci těles v rámci zjištění jejich vlhkosti a před, respektive po teplotním namáhání. Pro vážení byla použita digitální váha PCB-2500-2 (Obr. 18). Po ukončení všech měření byla vybrána 3 tělesa z každé skupiny a obou dřevin pro určení počáteční vlhkosti. Celkově bylo vybráno k ověření vlhkosti 36 těles. Vybraná tělesa byla vložena do laboratorní sušárny Binder, které bylo nastaveno na teplotu 103 °C.) a měřena posuvným měřítkem Kinex Measuring s.r.o. (Obr. 19). Po ustálení hmotnosti těles byla tělesa považována za absolutně suché. Pomocí vzorce (4) byla vypočtena skutečná vlhkost těles po klimatizování, mražení a ohřevu. Byly stanoveny hodnoty vlhkosti těles během experimentu a bylo možné ověřit skutečnou vlhkost po klimatizování na 12 % vlhkost.



Obr. 18. Digitální váha PCB-2500-2 (Expondo 2020)

Pro rozměrové měření bylo použito posuvné měřítko. Rozměry těles byly přeměřovány po klimatizaci těles a před, respektive po teplotním namáhání.



Obr. 19. Digitální posuvné měřítko (Kinex Measuring s.r.o. 2020)

4.2 Teplotní zatížení

Všechna tělesa byla po klimatizování změřena a zvážena. Pro přesné měření bylo použito digitální posuvné měřítko. Pro vážení těles byla použita digitální váha PCB– 2500–2.

Tělesa byla postupně po skupinách umístována do laboratorního mrazícího boxu Liebherr (Obr. 20), tak, aby bylo po vyjmutí těles, v co nejkratší době, možné tělesa zvážit a změřit.



Obr. 20 Mrazák Liebherr (Mctree a.s. 2020)

Mražení probíhalo po dobu 12 hodin u obou skupin na teplotu $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, respektive $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. To samé proběhlo v druhé fázi, kdy se tělesa vkládala do sušárny Binder (Obr. 21) na $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Doba ohřevu těles byla taktéž 12 hodin.

Po druhé fázi se tělesa nechala vychladnout na pokojovou teplotu bez přístupu vlhkosti a byla připravena pro namáhání podélně tahovou silou.

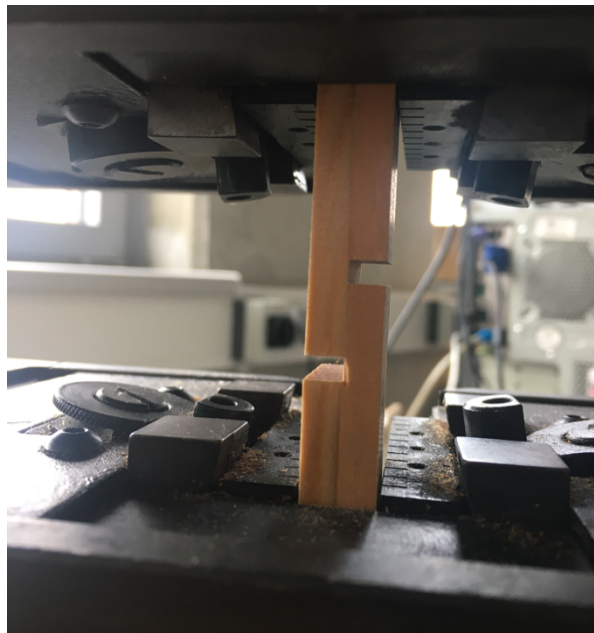


Obr. 21. Sušící komora Binder (Ibiotech a.s. 2020)

4.3 Zjišťování tahové smykové pevnosti

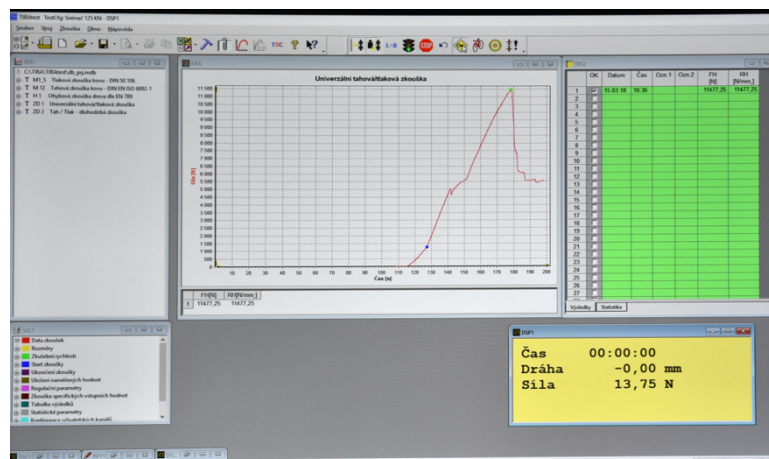
Tělesa byla upnuta do speciálních čelistí (Obr. 22), které zabezpečovaly vycentrovanou polohu těles tak, aby byl zatížený pouze lepený spoj v tahu.

Čelisti byly po každé zkoušce vráceny do výchozí polohy. Systém trhacího zařízení byl nastaven tak, že pokud během smykové zkoušky došlo k poklesu síly o 20 % zkouška se automaticky ukončila a byla odečtena hodnota síly.



Obr. 22. Schéma zkoušky

Rychlost posuvu čelistí byla 2 mm za minutu. Průměrná doba jedné zkoušky trvala okolo jedné minuty. Pomocí softwaru TIRA (Obr. 23) je možné regulovat rychlost posuvu ramen a sílu, kterou působí na zkušební tělesa. Jako hlavní měřící údaj je síla potřebná k posunu ramene o jednotku dráhy. Po skončení zkoušky byl každý vzorek opět zvážen a hodnota zanesena do tabulky.



Obr. 23. Software TIRA

4.4 Vyhodnocení výsledků

Data získaná měření byla z programu TIRA přenesena do tabulkového procesoru Excel. Dle normy ČSN EN 302 - 1 (2013) byly ze strojem naměřených údajů síly vypočteny hodnoty smykové pevnosti pro každé těleso podle vzorce (10). Všechna odzkoušená tělesa obsahovala hodnoty podélné smykové pevnosti v tahu.

Po skončení všech měření a zanesení jejich hodnot do tabulky, byla data zpracována pomocí programu Statistica 12 a v programu Excel.

Všechna data byla v průběhu experimentu zapisována do programu Excel 2019. Pomocí programu Excel 2019 byly dopočítávány i hodnoty hustoty, vlhkosti a hmotnosti těles po odečtení prořezu z obou stran tělesa. Data fyzikálních vlastností byla zpracována v Excelu graficky. Naměřené hodnoty z programu Excel 2019 byly zpracovány pomocí programu Statistica. Pro výpočet byla použita více faktorová analýza rozptylu ANOVA. Tato metoda zkoumá vliv jednotlivých faktorů a jejich vzájemných kombinací. Pro posouzení jejich vzájemných kombinací a vlivů jednotlivých faktorů byl použit Fisherův F-test na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Fisherův F-test nám na dané hladině významnosti P ukazuje, zda je daný faktor statisticky významný, či nikoliv.

Podle hladiny významnosti P lze faktory ohodnotit takto:

- $P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky významný,
- $P > 0,05$ vliv faktoru není statisticky významný,
- $P = 0,05$ vliv faktoru se nachází na hranici statické významnosti,
- $P = 0$ faktor má vliv,
- $P < 0,001$ vliv faktoru je statisticky velmi významný,
- $0,001 < P < 0,01$ vliv faktoru je statisticky středně významný,
- $0,01 < P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky málo významný (Hošková 2013).

5 Výsledky a diskuse

5.1 Fyzikální vlastnosti dřeva

Fyzikální vlastnosti dřeva se v průběhu měření výrazně měnily. V tabulce 4 jsou průměrné hodnoty vlhkosti a hustoty pro každou skupinu těles.

Tab. 4. Vlhkost a hustota smrkového a modřínového dřeva

Soubor	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)
1	Smrk	PUR	reference	12,3	-	-	418	-	-
2	Smrk	PUR	-15	12,4	11,8	2,5	421	418	408
3	Smrk	PUR	-25	12,4	12,2	1,1	408	406	394
4	Smrk	EPI	reference	12,3	-	-	453	-	-
5	Smrk	EPI	-15	12,5	12,1	2,4	446	442	433
6	Smrk	EPI	-25	12,7	12,3	1,1	452	450	437
7	Modřín	PUR	reference	11,3	-	-	671	-	-
8	Modřín	PUR	-15	11,8	11,6	3,7	670	666	654
9	Modřín	PUR	-25	11,9	11,6	2,8	660	657	641
10	Modřín	EPI	reference	11,6	-	-	705	-	-
11	Modřín	EPI	-15	11,6	11,5	3,4	709	707	692
12	Modřín	EPI	-25	11,5	11,4	3,3	705	704	692

W_p – počáteční vlhkost těles po klimatizaci na 12 %, W_m – vlhkost těles po mražení na danou teplotu, W_k – konečná vlhkost těles po ohřevu na danou teplotu, ρ_p – počáteční hustota těles po klimatizaci na 12 %, ρ_m – hustota těles po mražení na danou teplotu, ρ_k – konečná hustota těles po ohřevu na danou teplotu

5.1.1 Vlhkost dřeva

Vlhkost smrkového dřeva se pohybovala v průměru okolo 12,43 % vlhkosti. Průměrné hodnoty vlhkosti u modřínového dřeva byly o něco nižší a to 11,62 %. Hodnoty vlhkosti smrku byly tedy o 0,82 % vyšší než hodnoty modřínu.

Po vystavení dřeva teplotě -15 °C/-25 °C došlo k poklesu vlhkosti u všech skupin. Nejvyšší pokles vlhkosti byl u smrku a to o 0,6 % vlhkosti. U smrku byla průměrná

vlhkost po vystavení mrazu 12,1 %. U modřínu byla tato průměrná hodnota 11,53 %. Rozdíl mezi vlhkostí smrku a modřínu se tak snížil na hodnotu 0,58 %.

Po vystavení dřeva teplotě +70 °C došlo k velkému poklesu vlhkosti. Nejvíce vlhkosti ztratilo dřevo zhotovené ze smrku. Průměrná hodnota smrkového dřeva po ohřevu se pohybovala kolem 1,78 % vlhkosti. Modřínové dřevo si ponechalo vlhkosti o něco více v průměru 3,3 % vlhkosti. Modřínové dřevo tak mělo o 1,53 % vlhkosti více než smrkové dřevo.

I přes dlouhou dobu, po kterou bylo dřevo klimatizováno na 12 % vlhkost, vznikly mezi dřevinami smrku a modřínu určité rozdíly v obsahu vlhkosti. To může být způsobeno několika faktory. Prvním je hustota dřeva, kdy vlhkost hůře proniká do vnitřních částí dřeva. Druhým důvodem může být přítomnost extraktivních látek v modřínovém dřevu, které mohou opět bránit přenosu vlhkosti ve dřevě.

Po mražení dřeva nedošlo k výraznému úbytku vlhkosti ani u jedné z dřevin. Dřevo bylo prudce zmrazeno, tím došlo k rychlému zamrznutí vody ve dřevě a zpomalení výparu vody do okolního prostředí.

Rozdíly mezi dřevem smrku a modřínu se projevíly během ohřevu. Dřevo modřínu vykazovalo větší množství vlhkosti než dřevo smrku, a to až o 46 %. Kromě hustoty a přítomnosti extraktivních látek (zejména arabinogalaktanu) je dalším důvodem podle Zaripova (2020) tvorba permeátu na vnější straně systému membrán. Přítomnost permeátu na povrchu dřeva je viditelný v podobě lesklých skvrn.

5.1.2 **Hustota dřeva**

Během teplotního namáhání se hustota všech dřev měnila. Průměrná hustota smrkového dřeva při 12 % vlhkosti byla 433 kg/m³. Průměrná hustota modřínového dřeva byla 687 kg/m³. Modřínové dřevo mělo tedy vyšší hustotu, a to v průměru o 254 kg/m³.

Po zatížení dřeva mrazem (-15 a -25 °C) vykazovalo dřevo malý úbytek hustoty. Smrkové dřevo po zatížení mrazem mělo průměrnou hustotu 429 kg/m³. Modřínové dřevo mělo průměrnou hustotu 684 kg/m³. Průměrný pokles hustoty tedy byl 3 kg/m³.

Po ohřevu dřeva na 70 °C se hustota snížila. Smrkové dřevo mělo po ohřevu průměrnou hustotu 418 kg/m³. Modřínové dřevo mělo průměrnou hustotu 670 kg/m³. Celkový úbytek hustoty oproti stavu dřeva při 12 % vlhkosti byl v průměru o 16 kg/m³.

Ve srovnání s výzkumem Wangové a kol. (2015) byla hustota smrkového dřeva použitého pro tento výzkum v průměru o 4 % nižší. Udávaná hustota odpovídá stavu při 12 % vlhkosti těles. Hustota vlivem působících teplot klesala v důsledku výparu vody ze dřeva. Požgaj a kol. (1997) uvádí průměrnou hodnotu hustoty smrku v absolutně suchém stavu 370 kg/m³. Mnou naměřená průměrná hodnota hustoty v absolutně suchém stavu byla 418 kg/m³. Tato hodnota je o 12 % vyšší než hodnoty, které uvádí Požgaj a kol. (1997).

Lars a kol. (2005) uvádí průměrnou hustotu modřínu při 12 % vlhkosti 500 kg/m³. Hustota modřínu při stejném obsahu vlhkosti byla mnou naměřena na průměrnou hodnotu 687 kg/m³, to je o 27 % více než běžný průměr. Sairanen (1982) ve svých výzkumech uvádí průměrné hodnoty hustoty modřínu v rozmezí 490 - 560 kg/m³. O něco později Iijima (1983) uvedl průměrnou hodnotu hustoty ve svém výzkumu 610 kg/m³. Rozdíl v hustotě může být způsoben více vlivy jako jsou růstové podmínky a obsah extraktivních látek. Jak ve svém výzkumu uvedl Cukor a kol. (2020) na hustotu dřeva má vliv i předešlé využití půdy, na kterém se daná dřevina nyní pěstuje. Dalším důvodem může být jádrové dřevo, neboť jak popisuje Côté a kol. (1989), že zvýšená hustota jádrového dřeva u modřínu může být způsobena větším zastoupením extraktivních látek (zejména arabinogalaktanů).

5.2 Tahová smyková pevnost dřeva

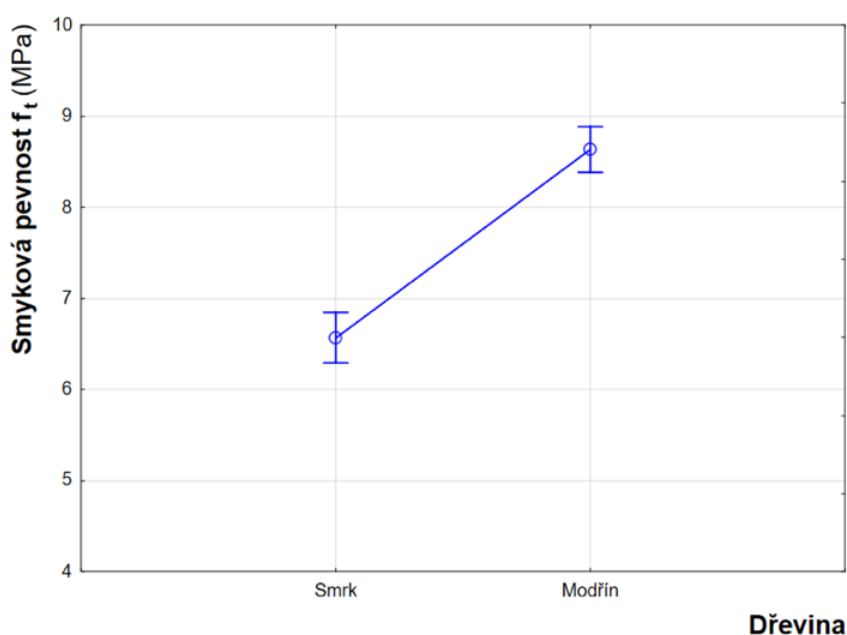
Podle tabulky 5 lze říci, že dřevina je jediným statisticky významným faktorem (na hladině významnosti $P = 0,000$), který má vliv na smykovou pevnost lepeného spoje.

Tab. 5. Přehled statistických hodnot, hodnotících vliv jednotlivých faktorů a jejich kombinací na smykovou pevnost lepeného spoje

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F-Test	Hladina významnosti
Intercept	20797,58	1	20797,58	6709,321	0,000000
Dřevina	384,68	1	384,68	124,097	0,000000
Teplota	3,68	2	1,84	0,594	0,552827
Typ lepidla	6,82	1	6,82	2,201	0,138852
Dřevina*Teplota*Typ lepidla	3,43	2	1,71	0,553	0,575941
Chyba	1078,73	348	3,10		

Teplota nemá na hladině významnosti $P = 0,553$ statisticky významný vliv na smykovou pevnost lepeného spoje, a stejně tak i typ lepidla nemá na hladině významnosti $P = 0,139$ statistický významný vliv na smykovou pevnost lepeného spoje. Ve třífaktorové analýze se statisticky nepotvrdilo ani spolupůsobení faktorů **dřevina*teplota*typ lepidla** na hladině významnosti $P = 0,576$.

Nejvyšší průměrné hodnoty smykové pevnosti 8,64 MPa, byly zjištěny u modřínového dřeva. Nejnižší průměrné hodnoty smykové pevnosti 6,56 MPa, byly naměřeny u smrkového dřeva. Hodnoty smykové pevnosti u modřínového dřeva byly vyšší o 2,07 MPa, tedy o 18 % (Graf 1).



Graf 1. Vliv dřeviny na smykovou pevnost lepeného spoje

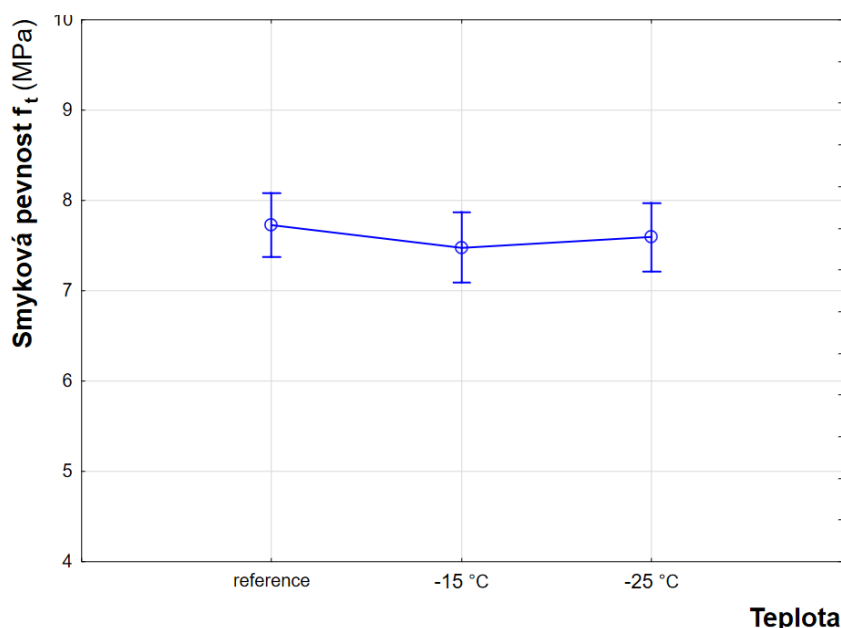
Bror a kol. (2015) zabývající se vlivem teploty na smykovou pevnost lepeného spoje smrkového dřeva uvádí, že hodnoty naměřené u referenční skupiny bez teplotního zatížení byly okolo 10 MPa. Wangová a kol. (2016) uvádí ve svém výzkumu smykové pevnosti borovicového dřeva 9,85 MPa, což je o 32 % vyšší, než hodnoty smrku v této práci, dokonce převyšují i výsledky naměřeného modřínu, a to o 14 %. Důvodem nižších hodnot u modřínového dřeva může být obsah extraktivních látek na povrchu dřeva a tím snížení adhezních vlastností lepidla. U smrkového dřeva může být důvodem nižší smykové pevnosti nižší hustota dřeva v porovnání s hodnotami Wangové a kol. (2016). Vyšší pevnost modřínu byla očekávatelná, neboť jak tvrdí Barnett a Jeronimidis (2003) na základě hustoty lze predikovat vývoj mechanických vlastností dřeva. Jak píše Stamm (1964), který uvádí, že hustota je hlavním kvalitativním měřítkem dřeva. Cukor a kol.

(2020) ve svém výzkumu zjistili významný účinek předchozího využití půdy na ohybovou pevnost obou dřevin, navíc modřín vykazoval vyšší hodnoty pevnosti v ohybu než smrk o 29 %. Hodnoty smykové pevnosti u modřínu byly též vyšší než u smrku a lze tedy říci, že se výsledky s výzkumem Cukora a kol. (2020) shodují. Průměrné hodnoty smykové pevnosti dřeva jsou přehledně vypsány v tabulce 6.

Tab. 6. Průměrné hodnoty smykové pevnosti pro smrkové a modřínové dřevo

Dřevina	Typ lepidla	Teplota (°C)	Smyková pevnost f_t				
			průměr (MPa)	min. (MPa)	max. (MPa)	směrodatná odchylka	standardní chyba-SE
Smrk	PUR	reference	7,01	5,46	9,68	1,265	0,231
Smrk	PUR	-15	6,71	4,88	9,52	1,303	0,238
Smrk	PUR	-25	6,86	3,96	10,77	1,637	0,299
Smrk	EPI	reference	7,03	4,66	11,63	2,391	0,437
Smrk	EPI	-15	5,69	3,53	12,10	2,239	0,409
Smrk	EPI	-25	6,10	3,36	11,40	1,770	0,323
Modřín	PUR	reference	8,35	3,02	11,35	1,766	0,322
Modřín	PUR	-15	8,98	5,21	11,18	1,284	0,234
Modřín	PUR	-25	8,53	3,33	12,08	2,153	0,393
Modřín	EPI	reference	8,53	2,86	11,10	1,734	0,317
Modřín	EPI	-15	8,55	3,61	10,81	1,745	0,319
Modřín	EPI	-25	8,88	5,89	11,12	1,379	0,252

U dřeva, které bylo vystaveno pouze pokojové teplotě, tedy u referenčních skupin byly hodnoty nejvyšší a dosahovaly průměrných hodnot 7,73 MPa (Graf 2).



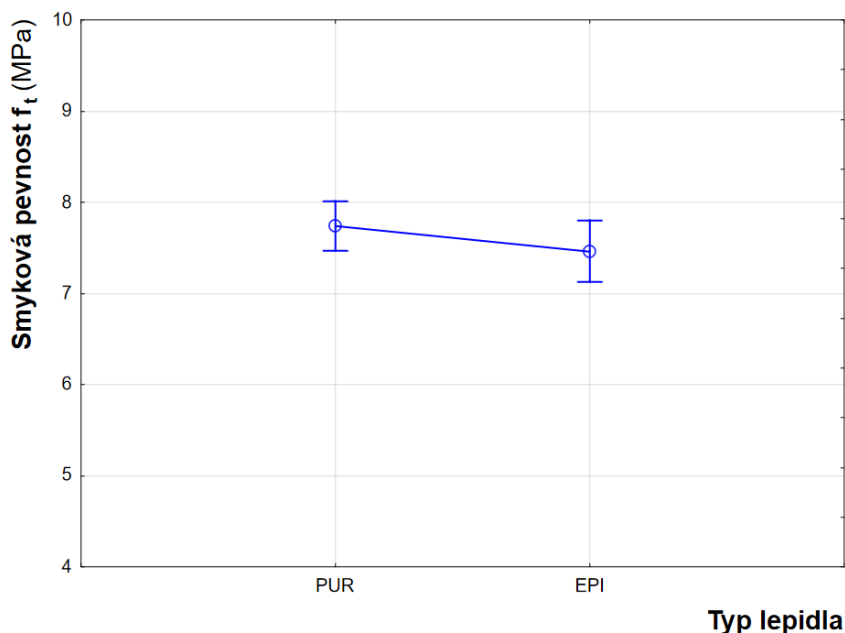
Graf 2. Vliv teploty na smykovou pevnost lepeného spoje

Nižších výsledků pak dosahovalo dřevo vystaveno teplotám $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Průměrné hodnoty dosahovaly $7,59\text{ MPa}$. Nejnižších naměřených hodnot dosahovalo dřevo po vystavení teplotám $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Průměrné hodnoty činily $7,48\text{ MPa}$. Dřevo z referenčních skupin tak dosahovalo v průměru o $0,25\text{ MPa}$ vyšších hodnot, než dřevo ze skupiny vystavené teplotám $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Při teplotním namáhání $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ došlo k poklesu smykové pevnosti dřeva o pouhé 1 %. Při působení teplot $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ poklesla pevnost ve smyku o 2 %. Toto chování přisuzují dobré vnitřní kohezi a adhezi lepidel. Mírné zvýšení smykové pevnosti při teplotě $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ může mít opodstatnění v tvorbě ledových krystalů uvnitř struktury dřeva těles. Ayrilmis a kol. (2010) právě vznikem ledových krystalů vysvětlují zvýšení pevnostních charakteristik dřevěného materiálu.

Wangová a kol. (2015) uvádí, že při snížení teploty z $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ došlo k poklesu smykové pevnosti z $10,4\text{ MPa}$ na $9,2\text{ MPa}$ tedy o 12 %. Celkově výsledky vlivu teploty na smykovou pevnost dřeva byly u Wangové a kol. (2015) jako statisticky významné, což se v našem výzkumu neprokázalo.

Lepené dřevo, na které bylo použito lepidlo PUR dosahovalo vyšších hodnot než dřevo lepené lepidlem EPI, a to v průměru o $7,74\text{ MPa}$. Dřevo lepené lepidlem EPI dosahovalo v průměru $7,46\text{ MPa}$. Dřevo lepené lepidlem PUR dosahovalo v průměru o $0,28\text{ MPa}$ vyšších výsledků než dřevo lepené lepidlem EPI (Graf 3).

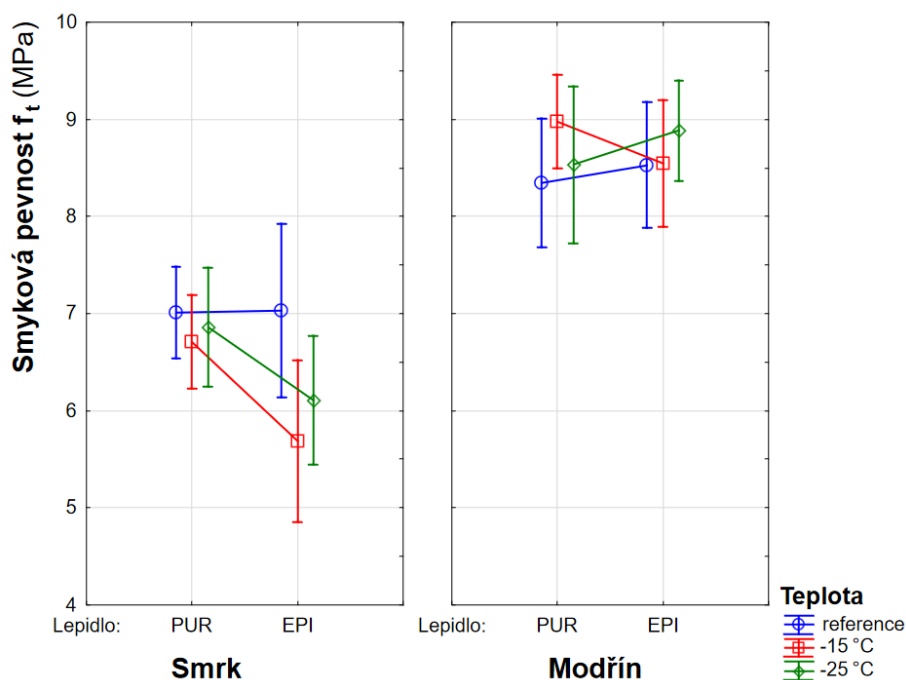


Graf 3. Vliv typu lepidla na smykovou pevnost lepeného spoje

Wangová a kol. (2015) ve svém výzkumu uvádí, že pevnost PUR lepidla vykazovala vyšší hodnoty než u lepidla EPI, a to o 16 %. Záborský a kol. (2019) zabývající se vlivem vybraných faktorů na tuhost kolíkového spoje uvádí, že při použití PUR lepidla dosahovaly výsledky v průměru o 133 % vyšších hodnot než v porovnání s lepidlem PVAc. Tento fakt se shoduje s našimi výsledky, kdy PUR lepidlo dosahovalo vyšších hodnot v pevnosti než lepidlo EPI. Podobný trend potvrzuje výzkum Wangové a kol. (2016), kde dřevo lepeno PUR lepidlem vykazovalo o 36 % vyšší smykovou pevnost než lepidlo EPI.

Důležitým faktorem při lepení dřeva je kvalita lepidlové spáry a její tloušťka. Ve výzkumu Boublíka (1966) a Rowella (2005), kteří zkoumali vliv tloušťky lepidlové spáry na pevnost spoje bylo zjištěno, že má vliv na celkovou pevnost lepeného spoje. Pravděpodobně je vyšší pevnost ve lepidla ve smyku způsobena dobrými vlastnostmi lepidla, jeho kohezí a adhezí.

Třífaktorová analýza je nejvíce průkazná, neboť nám ukazuje vzájemné působení všech faktorů, které působí či nepůsobí na smykovou pevnost lepeného dřeva (Graf 4).



Graf 4. Vliv kombinace tří faktorů na smykovou pevnost lepeného spoje

U smrkového dřeva se PUR lepidlo chovalo velice podobně bez větších odchylek a bylo stabilní i přes vlivy nízkých teplot. U modřínového dřeva se smyková pevnost PUR při působení teplot lehce lišila a oproti referenční skupině se zvedla o 7 % při zatížení teplotami -15 °C a 70 °C. Teplotní vliv se však na PUR lepidlo v rámci statistické

významnosti nepotvrdil. Statisticky významný vliv záporných teplot do $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ se nepotvrdil ani ve výzkumu Martinka (2014). Teplotní stabilitu PUR lepidla potvrzuje i výzkum Wangové a kol. (2015), kdy PUR lepidlo ztratilo pouze 2 % pevnosti při poklesu teploty z $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, avšak při snížení teploty na $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ztratilo PUR lepidlo už 28 % své původní pevnosti. EPI lepidlo se u smrkových těles v referenční skupině průměrnou hodnotou téměř rovnalo hodnotám PUR lepidla. Rozptyl pevností byl však větší než u PUR lepidla a při snížení teplot došlo ke snížení pevnosti EPI lepidla až o 19 %. EPI lepidlo tedy nebylo tak stabilní při změně teplot jako PUR lepidlo. Nestabilitu lepidel zachytil i výzkum Wangové a kol. (2015) kde EPI lepidlo při snížení teplot z $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ztratilo 16 % své původní pevnosti ve smyku. U výzkumu Wangové a kol. (2016) se tato nestálost EPI lepidla také projevila při snížení teploty z $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, a to poklesem pevnosti o 22 %. U modřínového dřeva se pevnost lepidel jak PUR, tak EPI výrazně neměnila, a i rozptyl hodnot u obou lepidel byl velmi podobný. Výraznou změnu nezpůsobila ani změna teploty a obě lepidla se chovala velmi stabilně.

Hodnoty smrku byly nižší než hodnoty modřínu. Nejnižší průměrná hodnota smrku 5,69 MPa byla u dřeva lepeného EPI lepidlem zatíženého teplotami $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nejvyšší průměrná hodnota modřínu 8,98 MPa byla u dřeva lepeného taktéž EPI lepidlem a zatíženého teplotami $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Průměrná hodnota nejvyšší pevnosti u modřínového dřeva byla o 30 % vyšší než nejnižší průměrná hodnota smrkového dřeva. Průměrné hodnoty se u modřínu nelišily tolik jako u smrku. Nejvyšší průměrná hodnota modřínového dřeva lepeného PUR lepidlem a namáhaného teplotami $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ je o 6 % vyšší než nejnižší průměrná hodnota modřínového dřeva lepeného PUR lepidlem v referenční skupině. U smrku se tyto hodnoty lišily výrazně více. Nejvyšší průměrná hodnota smrkového dřeva lepeného EPI lepidlem v referenční skupině je o 19 % vyšší než u smrkového dřeva lepeného EPI lepidlem namáhaného teplotami $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výrazný pokles pevnosti ve smyku u smrku může být způsoben větší náchylností smrku na bobtnání a sesychání dřeva a menší pevností smrkového dřeva. Ve výzkumu Jana a kol. (2020) naměřili v průměru o 28 % vyšší hodnoty pevnosti u modřínu než u smrku. Tento výsledek se shoduje s výsledky tohoto experimentu. Pnutí vyvolaná interakcí mezi dřevem a lepidlem mají zásadní význam pro celkovou rovnováhu odporu proti mechanickému poškození. Čím větší je odpor lepidlové spáry ve vztahu k pevnosti dřeva, tím větší je procento selhání dřeva na rozhraní s lepidlem (Iwakiri a kol. 2005).

Vliv teploty na smykovou pevnost smrkového dřeva byl větší než u modřínu. U smrkového dřeva lepeného EPI lepidlem došlo k největšímu poklesu smykové pevnosti. Oproti referenční skupině nejvíce poklesla pevnost ve smyku u dřeva namáhaného teplotami $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, a to o 19 %. U dřeva namáhaného teplotami $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ a lepeného EPI lepidlem byl pokles vůči referenční skupině o 13 %. U modřínového dřeva ve všech skupinách se vliv teploty neprojevil tak silně a hodnoty byly podobné. Všechny průměrné hodnoty skupin modřínového dřeva zatíženého mrazem se naopak oproti referenčním skupinám zvýšily. Největší zvýšení smykové pevnosti došlo u skupiny modřínového dřeva lepeného PUR lepidlem a zatíženého teplotami $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Oproti referenční skupině se pevnost ve smyku zvýšila o 7 %. Avšak ve skupině modřínového dřeva lepeného EPI lepidlem a namáhaného teplotami $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ k takovému zvýšení pevnosti ve smyku nedošlo. Ke zvýšení smykové pevnosti došlo oproti referenční skupině jen o 0,2 %. Ve skupině modřínového dřeva lepeného lepidlem EPI dosáhla nejvyšší pevnosti ve smyku skupina namáhaná teplotami $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Oproti referenční skupině se pevnost zvýšila o 4 %. Vebr (2019) ve své práci uvádí, že při snížení teplot na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ došlo ke zvýšení tvrdosti dřeva o 31 %.

6 Závěr

Diplomová práce řeší otázku střídání teplot na fyzikální vlastnosti (vlhkost a hustotu) a mechanickou vlastnost, konkrétně smykovou pevnost lepeného dřeva. Pro experiment byly použity dřeviny smrk a modřín. Z těchto dřevin byly připraveny tělesa z dvou kusů, vzájemně slepeny lepidly EPI a PUR. Tělesa byla následně teplotně zatížena podle skupin třemi druhy teplot: referenční (20 °C), -15 °C a 70 °C respektive -25 °C a 70 °C.

Výsledky z měření a jejich následné vyhodnocení nám ukazují změnu fyzikálních vlastností v průběhu experimentu. Při zatížení dřeva mrazem došlo k mírnému poklesu vlhkosti. Po ohřevu došlo k velké ztrátě vlhkosti (80 %) u teplotně namáhaného dřeva. Smrkové dřevo ztratilo vlhkosti nejvíce. Hustota dřeva se vyvíjela podobně se ztrátou vlhkosti. Hustota se mírně snížila po zatížení mrazem a po ohřevu byly výsledky hustoty nejnižší.

Na smykovou pevnost lepeného dřeva měl největší vliv druh použité dřeviny. Nejvyšších výsledků dosahoval modřín ve všech skupinách teplotního namáhání, a to o 18 % vyšších než u smrku. Typ použitého lepidla se statisticky neprojevil, i když rozdíl mezi lepidly byl. Lepidlo PUR vykazovalo v průměru o 4 % vyšší pevnost ve smyku než lepidlo EPI. Statisticky významný vliv teploty na smykovou pevnost se taky nepotvrdil. Skupina namáhaná teplotami -15 °C a 70 °C měla o 1 % nižší výsledky než skupina referenční. Nejnižších hodnot se naměřilo při působení teplot -15 °C a 70 °C, kdy poklesla smyková pevnost o 2 % oproti referenční skupině. Pro smrk a modřín namáhaný mrazem je nejlepší lepidlo PUR. Při volbě materiálu je vhodnější použití modřínového dřeva pro oba typy lepidel i teplotního namáhání.

V praxi mohou tato data posloužit při navrhování a použití lepeného dřeva v exteriéru vystaveného střídání nízkých a vysokých teplot. To se týká převážně severských oblastí. Využití dat může posloužit k volbě dřeviny a typu lepidla pro dřevěné lepené nosné prvky použité pro stavbu mostních konstrukcí, střešních konstrukcí, hal a jiných otevřených konstrukcí.

K prohloubení poznání vlivu střídání nízkých a vysokých teplot na smykovou pevnost lepeného dřeva by pomohl výzkum zabývající se vlivem vlhkosti a dlouhodobého působení těchto faktorů na smykovou pevnost lepeného dřeva.

7 Literatura

- Ayrilmis, N., Ümit, B., a Nusret, A. (2010). *Bending strength and modulus of elasticity of wood-based panels at cold and moderate temperatures*. Cold Regions Science and Technology 63(1):40-43, DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.05.004.
- Balabán, K. (1955). *Anatomie dřeva*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství v Praze
- Barnett, J. R., a Jeronimidis, G. (2003). *Wood quality and its biological basis*. Oxford: Blackwell Publishing, ISBN 1-84127-319-8.
- Blažej, A. (1975). *Chémia dřeva*. Bratislava: Alfa.
- Boublík, V. (1966) *Lepidla a jejich příprava*. Redakce polytechnické literatury. ISBN 04-952-66.
- Boublík, V. (1966). *Lepidla a jejich příprava*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury Praha, ISBN 04-952-66.
- Brockmann, W. (2009). *Adhesive bonding: materials, applications and technology*. Weinheim: Wiley-VCH, ISBN 978-3-527-31898-8.
- Bror, S., Olle, H., Sigurdur, O. S., a Wang, X. A. (2015). *Impact of cold temperatures on the shear strength of Norway spruce joints glued with different adhesives*. Eur. J. Wood Prod., DOI: 10.1007/s00107-015-0882-4.
- Böhm, M., Reisner, J., a Bomba, J. (2012). *Materiály na bázi dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra zpracování dřeva, ISBN 978-80-213-2251-6.
- Cukor, J.; Zeidler, A.; Zdenek, V., Vacek, S., Šimůnek, V., Gallo, J. (2020). *Comparison of growth and wood quality of Norway spruce and European larch: effect of previous land use*. European Journal of Forest Research, DOI: 10.1007/s10342-020-01259-7.
- Côté, W. A., Day, A. C. B, Simson, W. a Timell, T. E. (1989). *Studies on larch arabinogalactan*. Holzforschung.
- Černá, B., a Gregor, R. (1989). *Syntetické polymerní hmoty*. Brno: Masarykova univerzita, ISBN 80-210-0129-1.
- Desch, H. E., a Dinwoodie, J. M. (1996). *Timber Structure, Properties, Conversion and Use*. 7. vyd. London: Macmillan Press LTD, ISBN 978-0-333-60905-7.
- Dinwoodie, J. M. (2000) *Timber: its nature and behaviour*. 2nd ed., London: Centre for Timber Technology and Construction at BRE, ISBN 0-419-23580-9.

-
- Eisner, K., Berger, V., Havlíček, V., a Osten M. (1966). *Příručka lepení dřeva*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury Praha.
- Forest Products Laboratory. (1999). *Wood handbook—Wood as an engineering material*. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Gavrilovic-Grmusa, I., Dunky, M., Iporovi-Momilovi, M. Popovi, M. a Popovi, J. (2016). *Influence of pressure on the radial and tangential penetration into poplar wood and on the shear strength of adhesive joints*. BioResources 11(1), 2238-2255.
- Gerhards, C. C. (1982). *Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects*. Wood and Fiber, 14(1): 4-36.
- Gerhards, C.C. (1979). *Time-related effects of loading on wood strenght: a linear cumulative damage theory*. Wood sci. 11(3): 139-144.
- Götz, H. K., Hoor, D., Möhler, K., a Natterer, J. (1978). *Holzbau Atlas*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Horáček, P. (2008). *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva*. 2. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, ISBN 978-80-7375-169-2.
- Horáček, P. (1998). *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, ISBN 80-7157-347-7.
- Hošková, P. (2013). *Statistika*. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita, Provozně ekonomická fakulta, 182 s. ISBN 978-80-213-2341-4.
- Iijima, Y. (1983). *The mechanical properties of the Siberian larch wood*. Bulletin Toyama Wood Products Research Institute No.1.
- Iwakiri, S., Keinert, S., a Albuquerque, C. E. (2005). *Painéis de madeira reconstituída*. Curitiba: FUPEF. 247 s.
- Joščák, P. (1999). *Pevnostné navrhovanie nábytku*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, ISBN 80-228-0921-7.
- Kafka, E. (1989). *Dřevařská příručka Část 1*. Praha: SNTL, ISBN 80-03-00009-2.
- Kamenický, J., a Rizmanová, M. (1989). *Materiály: pro 1. až 3. ročník SOU učebních oborů zpracování dřeva*. 2. vyd. Praha: SNTL. 116 s.
- Kollmann, F., a Malmquist, L. (1956). *Über die Wärmeleitahl von Holz und Holzwerkstoffen*. Holz als roh - und werkstoff, ISSN 0018-3768.
- Koželuh, B. (1998). *Dřevěné konstrukce podle Eurokódu 5. STEP 1, Navrhování a konstrukční materiály*. Zlín: KODR, ISBN: 80-238-2620-4.
-

-
- Král, P. (2011). *Dýhy, překližky a lepené materiály*. Brno: Mendelova univerzita v Brně, ISBN 978-80-7375-552-2.
- Kruse, K., a Venschott, D. (2002). *Eigenschaften und Einsatzpotentiale neuer Holzwerkstoffe im Bauwesen*. Hamburg: Universität Hamburg.
- Kuklík, P. (2004). *Dřevěné konstrukce*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT ISBN 80-01-02871-2.
- Liptáková, E., a Sedliačik, M. (1989). *Chémia a aplikácia pomocných látok v drevárskom priemysle*. Bratislava: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava, ISBN 80-05-00116-9.
- Martinek, Š. (2014). *Vliv Použitého Lepidla Na Pevnost Konstručního Spojení Domino*. Brno: Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně. Lesnická a dřevařská fakulta. Ústav nábytku, designu a bydlení.
- Matovič, A. (1993). *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva: Určeno pro posl. les. fak. obor dřevař a les*. Brno: Vysoká škola zemědělská, ISBN 80-7157-086-9.
- Millett, M. A., a Gerhards, C. C. (1972). *Accelerated aging: residual weight and flexural properties of wood heated in air at 115 to 175°C*. Wood sci. 4(4): 193-201
- Mleziva, J. (1993). *Polymery-výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Brno: Sobotáles, ISBN 80-901570-4-1.
- Moore, G. L. (1984). *The effect of long-term temperature cycling on the strength of wood*. J. Inst. Wood Sci. 9(6): 264-267
- Nečesaný, V., Lexa, J., Paclt, J., Tesařová, M., a Štofko J. (1952). *Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva*. Bratislava: Drevarský výzkumný ústav v Bratislave.
- Nálepa, K. (1990). *Stručné základy chemie a fyziky polymerů*. Olomouc: rektorát Univerzity Palackého v Olomouci.
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., a Babiak, M. (1997). *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vyd. Bratislava: Príroda a.s.
- Požgaj A.; Chovanec, D.; Kurjatko, S.; Babiak M. (1993). *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, ISBN 80-07-00600-1.
- Ritter, M. A. (1990). *Timber Bridges: Design, Constructions, Inspection, and Maintenance*. Washington, DC. U.S. Department of agriculture, Forest Service, Engineering Staff, 944 s.
- Rowell, R. M. (2005). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton: CRC Press, ISBN 0-8493-1588-3.
-

-
- Sairanen, P. (1982). *Lehtikuusen ominaisuudet ja käyttö Neuvostoliiton mekaanisessa metsäteollisuudessa*. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja, ISSN 0358-4283.
- Sedliačik, M. (1992). *Nové kompozície polykondenzačných lepidiel a ich aplikácie v drevárskom priemysle*. Strážske: ZSVTS Chemko, ISBN 80-228-0207-7.
- Stamm, A. J. (1964). *Wood and cellulose science*. New York: Ronald Press. str. 31
- Šlezingerová, J., a Gendelová, L. (2005). *Stavba dřeva*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, ISBN 80-7157-636-0.
- Thelandersson, S., a Larsen, H. J. (2003). *Timber engineering*. New York: John Wiley & sons, LTD, ISBN 0-470-84469-8.
- TKH. (2015). *TKH Technical Briefing Note 5*. Düsseldorf: Technische Kommission Holzklebstoffe.
- Tsoumis, G. (1991). *Science and technology of wood: structure, properties, utilization*. New York: Van Nostrand Reinhold, ISBN 0-442-23985-8.
- Veber, V. (2019). *Vliv nízkých teplot na tvrdost dřeva*. Diplomová práce, Vedoucí práce: Ing. Miroslav Gašparík, PhD.: Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra zpracování dřeva a biomateriálů.
- Wang, A. X., Bror, S., Olle H., a Sigurdur, O. (2015). *Impact of cold temperatures on the shear strength of Norway spruce joints glued with different adhesives*. Eur. J. Wood Prod. 73: 225–233, DOI: 10.1007/s00107-015-0882-4.
- Wang, X. A., Olle, H., Bror, S., Sigurdur, O., Hui, W., a Niemz, P. (2016). *Shear Strength of Scots Pine Wood and Glued Joints in a Cold Climate*. BioResources 11(1): 944-956., DOI: 10.15376/biores.11.1-944-956.
- Zaripov, S. G., Chizhov, A. P. a Klevitova, Z. N. (2020). *Structural diagram of mass transfer in larch wood during convective drying*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Eng. 822 012020.
- Záborský, V., Kamboj, G., Sikora, A., a Borůvka, V. (2018). *Effects of Selected Factors on Spruce Dowel Joint Stiffness*. Bioresources 14(1):14, DOI: 10.15376/biores.14.1.1127-1140.

Technické normy:

ISO 13061-2 *Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests* (2014)

ČSN EN 302-1 *Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Zkušební metody - Část 1: Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání (2013)*

Elektronické zdroje:

betimber. *Sawn And Structural Timber*. [cit. 2020-06-03] Dostupné z: <https://betimber.com/>.

Expondo. *Potřeby pro průmysl*. [cit. 2020-06-03] Dostupné z: <https://www.expondo.cz/>.

Fisher Scientific s.r.o. *Katalog produktů*. [cit. 2020-05-14] Dostupné z: <https://www.thermofisher.cz/produkty/skladovaci-komora-ips260-256-l-regulator-singledisplay>.

Forest Products Supply Co. *Trus Joist LVL Microllams*. [cit. 2020-06-03] Dostupné z: <https://www.fp-supply.com/>.

Ibiotech a.s. *Laboratorní technika*. [cit. 2020-05-10] Dostupné z: <https://www.ibiotech.cz/>.

Kinex Measuring s.r.o. *Posuvná měřítka*. [cit. 2020-05-10] Dostupné z: <https://shop.kinexmeasuring.com/>.

Mctree a.s. *Profesionální spotřebiče*. [cit. 2020-05-13] Dostupné z: <https://mctree.cz/>.

Mayr-Melnhof Hüttemann Wismar GmbH. *BSH*. [cit. 2020-06-03] Dostupné z: <https://www.huettemann-holz.de>.

Dřevo Smutný. *Co jsou to KVH hranoly?*. [cit. 2020-06-03] Dostupné z: <https://drevosmutny.cz/>.

Weyerhaeuser Co. *Parallam® PSL Beams*. [cit. 2020-06-03] Dostupné z: <https://www.weyerhaeuser.com/>.

8 Přílohy

Seznam příloh

Obr. 1 Technický list lepidla Kestopur 1030

Obr. 2 Technický list lepidla Kestokol WR 11

Tab. 1. Naměřené hodnoty pro referenční modřínové tělesa lepené lepidlem EPI

Tab. 2. Naměřené hodnoty pro modřínové tělesa namáhané teplotami -15 °C a 70 °C lepené lepidlem EPI

Tab. 3. Naměřené hodnoty pro modřínové tělesa namáhané teplotami -25 °C a 70 °C lepené lepidlem EPI

Tab. 4. Naměřené hodnoty pro referenční modřínové tělesa lepené lepidlem PUR

Tab. 5. Naměřené hodnoty pro modřínové tělesa namáhané teplotami -15 °C a 70 °C lepené lepidlem PUR

Tab. 6. Naměřené hodnoty pro modřínové tělesa namáhané teplotami -25 °C a 70 °C lepené lepidlem PUR

Tab. 7. Naměřené hodnoty pro referenční smrkové tělesa lepené lepidlem EPI

Tab. 8. Naměřené hodnoty pro smrkové tělesa namáhané teplotami -15 °C a 70 °C lepené lepidlem EPI

Tab. 9. Naměřené hodnoty pro smrkové tělesa namáhané teplotami -25 °C a 70 °C lepené lepidlem EPI

Tab. 10. Naměřené hodnoty pro referenční smrkové tělesa lepené lepidlem PUR

Tab. 11. Naměřené hodnoty pro smrkové tělesa namáhané teplotami -15 °C a 70 °C lepené lepidlem PUR

Tab. 12. Naměřené hodnoty pro smrkové tělesa namáhané teplotami -25 °C a 70 °C lepené lepidlem PUR

Tab. 13 Naměřené hodnoty hmotnosti a vlhkosti vybraných těles

Kestopur 1030



Kestopur 1030 je jednosložkové, polyuretanové lepidlo určené k výrobě nosných dřevěných výrobků. Splňuje požadavky normy EN 15425 a je schválen pro výrobu prvků označených CE podle EN 14080.



- Armované vláknem
- Nízká tvorba pěny
- Tixotropní

OBLAST POUŽITÍ

Kestopur 1030 je jednosložkové, vlhkostí vytvrzující polyuretanové lepidlo pro lepení dřevěných materiálů. Splňuje požadavky normy EN 15425 a je schválen pro výrobu lepeného dřeva označeného CE podle normy EN 14080, výroby délkově nastaveného dřeva označeného CE podle EN 15497 a CE-označeného CLT (křížového laminátu) podle EN 16351.

Může být také použit i pro výrobu jiných dřevěných výrobků a aplikací, které vyžadují mimořádně dobrou odolnost proti vlhkosti.

Kestopur 1030 neobsahuje rozpouštědla a formaldehyd. Splňuje klasifikaci emisí M1 pro stavební materiály.

NÁVOD K POUŽITÍ

Povrchy, které se mají lepit, musí být čisté a bez prachu. Vhodné pro aplikaci tryskou. Lepidlo naneste rovnoměrně na jednu nebo na dvě strany. K určení potřebného času lisování a zajištění pevnosti lepidla musí být provedeny odpovídající zkoušky před použitím v plné výrobě.

Při použití lepidla Kestopur 1030 používejte ochranné rukavice. Při aplikaci lepidla a při teplotě nad +40 °C noste ochrannou dechovou masku.

Nevytvrzené lepidlo odstraňte suchou látkou a očistěte povrchy acetonem nebo čističem Kestopur. Vytvrzené lepidlo lze odstranit pouze mechanicky nebo čističem vytvrzených PUR lepidel.

DODATEČNÉ INFORMACE

Informace uvedené v tomto technickém listu jsou založeny na našich zkouškách a našich praktických znalostech. Technické údaje jsou definovány za standardních podmínek. Rozdíly v místních pracovních podmínkách ovlivní výkon a výsledek produktu. Výsledek je také silně ovlivněn pracovními metodami. Garantujeme vysokou kvalitu našich výrobků podle našeho systému managementu jakosti. Z důvodu nesprávného používání výrobku nebo převládajících podmínek, nad kterými nemáme žádnou kontrolu, nelze přijmout žádnou odpovědnost. Nemůžeme tedy být zodpovědní za konečný výsledek. Uživatel výrobku musí otestovat vhodnost výrobku pro zamýšlené použití.

ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ A BEZPEČNOST

Zabraňte zbytečnému kontaktu s pokožkou a vystavení čerstvému výrobku, použijte rukavice. Viz bezpečnostní list materiálu. Informace o likvidaci produktu a balení naleznete na adrese www.kiilto.com.

Typ	Polyuretan
Hustota/Specifická hmotnost	ca. 1.2 kg/dm ³
Barva	Transparentní, světlé po vytvrzení. Obsahuje indikátor viditelný pod UV světlem.
Viskozita	ca. 7.000 mPas (Brookfield RVT, 5/20, 20 °C)
Otevřený čas	max. 30 min při 180 g / m ² , vlhkost dřeva 15%, teplota 20 °C, Vlhkost vzduchu 50%
Klasifikace a certifikace	EN 15425 I 70 GP 0,3 AUS/NZ 4364:2010 type I
Spotřeba	140–180 g/m ² Zubový spoj 160–200 g/m ² Plošné lepení
Lisovací čas	Od 90 min.
Pracovní podmínky	Teplota v hale nejméně 15 °C (podle EN 14080, EN16351, EN 15497)
Aplikační teplota	18 - 30 °C (podle EN 14080; EN16351; EN15497)
Vlhkost vzduchu	Při lepení 40 - 75% a po stisknutí ≥ 30% (podle EN 14080, EN 16351)
Vlhkost dřeva	6 - 20% (doporučujeme cca 15% vlhkosti)
Tloušťka spáry	max. 0,3mm
Skladování	Může být skladován na suchém a chladném místě (+ 10-20 °C). Při skladování v neotevřeném originálním balení při teplotě +20 °C je trvanlivost 3 měsíce.

Obr. 1 Technický list lepidla Kestopur 1030

Kestokol WR 11



Kestokol WR 11 je dvoukomponentní emulzní polymer isocyanátové lepidlo vhodné pro výrobu lepených výrobků podle norem JAS 111 (Norsk Träteknisk Institutt (NTI), 2007), dle podmínky třídy C



- Nechráněné venkovní použití
- Vynikající odolnost povětrnosti

OBLAST POUŽITÍ

Kestokol WR 11 + tvrdidlo WR je emulze polymerní isokyanátové lepidlo, které má vynikající odolnost proti klimatickému namáhání. Splňuje požadavky na odolnost proti vroucí vodě podle tříd odolnosti JIS K 6806-1985 (1995) a EN 204 / D4.

Kestokol WR 11 + Tvrdidlo WR lze použít ve výrobcích, které jsou vystaveny měnícím se povětrnostním podmínkám, stejně jako pro specifické aplikace pro lepidla.

Instrukce k použití

Přidejte 15 hmotnostních dílů tvrdidla WR do 100 hmotnostních dílů lepidla Kestokol WR 11 a dobře promíchejte. Pokud je doba zpracovatelnosti směsi překročena, začne směs pěnít. Nová směs může být přidána do starší směsi během doby zpracovatelnosti.

Zkontrolujte, zda díly dobře líčují. Lepidlo naneste jednostranně a rovnoměrně. Sestavte a zatlačte součásti dohromady s cílem rovnoměrného vytlačování lepidla po celé délce vazby. Výrobek lze lisovat v chladném, teplém nebo VF lisu. Tepelné a VF lisování výrazně zkracují požadovaný čas lisování. K určení potřebného času lisování a zajištění pevnosti lepidla musí být provedeny odpovídající zkoušky před použitím v plné výrobě. Před dalším obráběním musí součásti potřebně chvíli odpočívat, aby se dosáhlo potřebné pevnosti spojení. Konečná pevnost a voděodolnost lepeného spoje je dosažena během 7 dnů.

DODATEČNÉ INFORMACE

Informace uvedené v tomto technickém listu jsou založeny na našich zkouškách a našich praktických znalostech. Technické údaje jsou definovány za standardních podmínek. Změny v místních pracovních podmínkách a metodách ovlivní výkon a výsledek výrobku. Garantujeme vysokou kvalitu našich výrobků podle našeho systému managementu jakosti. Z důvodu nesprávného používání výrobku nebo převládajících podmínek, nad kterými nemáme žádnou kontrolu, nelze přijmout žádnou odpovědnost. Nemůžeme tedy být zodpovědní za konečný výsledek. Uživatel výrobku musí prověřit vhodnost výrobku pro zamýšlené použití.

ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ A BEZPEČNOST

Zabraňte zbytečnému kontaktu s pokožkou a přímému styku s čerstvým výrobkem - používejte rukavice. Viz bezpečnostní list materiálu. Informace o likvidaci produktu a balení naleznete na adrese www.kiilto.com.

HUSTOTA / SPECIFICKÁ HMOTNOST	1,15 kg/dm
pH	6,5 - 8,0
BARVA	Mírně béžová
MÍCHACÍ POMÉR	100 : 15
VISKOZITA	3500 mPas (Brookfield RVT +20 °C)
VISKOZITA SMĚSI	5000 mPas (Brookfield RVT +20 °C) ihned po přidání tvrdidla
BARVA SMĚSI	light beige
"HRNCOVÝ ČAS"	SMĚS ZPRACOVAT DO 20 min (+20 °C) /
OTEVŘENÝ ČAS	7 - 12 min (nános 200 g/m ²)
SPOTŘEBA	160 - 200 g/m ²
LISOVACÍ ČAS	minimum 20 min
MIN. FILMOTVORNÁ TEPLOTA	+5 °C
VLHKOST DŘEVA	6 - 15 %
ODOLNOST VYSOKÉ TEPLOTĚ	EN 14257 (Watt 91): 12,0 N/mm
SKLADOVÁNÍ	V neotevřených obalech nad + 1 ° C po dobu 6 měsíců. Po dlouhém skladování před použitím promíchejte..

Obr. 2 Technický list lepidla Kestokol WR 11

Tab. 1. Naměřené hodnoty pro referenční modřínová tělesa lepená lepidlem EPI

Kód tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	f_t (MPa)
1-E-R	MO	ref.	693,3	-	-	8,1
2-E-R	MO	ref.	698,8	-	-	5,1
3-E-R	MO	ref.	683,3	-	-	6,3
4-E-R	MO	ref.	739,1	-	-	10,1
5-E-R	MO	ref.	728,5	-	-	9,8
6-E-R	MO	ref.	753,7	-	-	8,7
7-E-R	MO	ref.	748,5	-	-	10,0
8-E-R	MO	ref.	705,4	-	-	8,7
9-E-R	MO	ref.	694,8	-	-	9,7
10-E-R	MO	ref.	704,5	-	-	8,2
11-E-R	MO	ref.	714,0	-	-	8,3
12-E-R	MO	ref.	618,7	-	-	8,1
13-E-R	MO	ref.	722,6	-	-	10,6
14-E-R	MO	ref.	726,7	-	-	10,3
15-E-R	MO	ref.	726,2	-	-	9,7
16-E-R	MO	ref.	744,1	-	-	9,4
17-E-R	MO	ref.	730,7	-	-	11,1
18-E-R	MO	ref.	727,3	-	-	9,9
19-E-R	MO	ref.	660,2	-	-	7,7
20-E-R	MO	ref.	674,9	-	-	2,9
21-E-R	MO	ref.	633,3	-	-	6,2
22-E-R	MO	ref.	684,5	-	-	9,0
23-E-R	MO	ref.	731,6	-	-	9,0
24-E-R	MO	ref.	731,6	-	-	8,8
25-E-R	MO	ref.	690,5	-	-	6,5
26-E-R	MO	ref.	670,3	-	-	8,3
27-E-R	MO	ref.	714,5	-	-	8,6
28-E-R	MO	ref.	696,0	-	-	7,8
29-E-R	MO	ref.	714,1	-	-	9,6
30-E-R	MO	ref.	675,0	-	-	9,0

Tab. 2. Naměřené hodnoty pro modřínová tělesa namáhaná teplotami - 15 °C a 70 °C
lepená lepidlem EPI

Kód tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	f_t (MPa)
1-E-A	MO	-15/70	739,0	739,7	724,9	9,4
2-E-A	MO	-15/70	648,9	650,9	632,1	5,5
3-E-A	MO	-15/70	683,5	683,7	673,1	3,6
4-E-A	MO	-15/70	741,0	740,2	721,7	10,5
5-E-A	MO	-15/70	679,3	674,5	652,3	6,7
6-E-A	MO	-15/70	591,6	592,0	574,9	6,4
7-E-A	MO	-15/70	732,8	733,4	717,2	8,7
8-E-A	MO	-15/70	604,8	606,8	587,0	6,4
9-E-A	MO	-15/70	664,1	663,1	638,4	7,7
10-E-A	MO	-15/70	693,3	691,8	678,6	9,2
11-E-A	MO	-15/70	746,6	751,1	727,4	9,2
12-E-A	MO	-15/70	697,5	693,9	681,7	8,5
13-E-A	MO	-15/70	735,1	733,7	722,4	9,5
14-E-A	MO	-15/70	692,5	695,4	684,2	9,3
15-E-A	MO	-15/70	730,1	731,9	718,7	8,4
16-E-A	MO	-15/70	726,9	723,8	714,6	7,5
17-E-A	MO	-15/70	718,0	718,1	695,8	6,3
18-E-A	MO	-15/70	734,6	732,8	721,4	9,4
19-E-A	MO	-15/70	719,6	722,3	710,3	8,6
20-E-A	MO	-15/70	750,1	749,0	738,0	10,4
21-E-A	MO	-15/70	736,6	733,8	725,5	9,6
22-E-A	MO	-15/70	752,2	749,0	725,6	7,8
23-E-A	MO	-15/70	729,5	726,2	706,0	10,0
24-E-A	MO	-15/70	704,8	702,0	687,3	6,9
25-E-A	MO	-15/70	726,4	724,1	720,0	9,9
26-E-A	MO	-15/70	740,9	744,7	728,2	10,8
27-E-A	MO	-15/70	741,4	735,6	728,4	10,6
28-E-A	MO	-15/70	672,6	663,6	646,4	9,5
29-E-A	MO	-15/70	664,5	656,0	634,2	9,1
30-E-A	MO	-15/70	758,8	752,0	735,5	10,8

Tab. 3. Naměřené hodnoty pro modřínová tělesa namáhaná teplotami - 25 °C a 70 °C
lepená lepidlem EPI

Kód tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	f_t (MPa)
1-E-B	MO	-25/70	713,4	717,6	696,2	8,6
2-E-B	MO	-25/70	710,8	719,4	710,7	8,4
3-E-B	MO	-25/70	699,8	705,0	694,4	8,8
4-E-B	MO	-25/70	743,0	747,9	729,5	10,2
5-E-B	MO	-25/70	738,9	747,0	718,7	9,2
6-E-B	MO	-25/70	685,5	689,4	676,4	7,7
7-E-B	MO	-25/70	702,4	711,2	695,9	10,8
8-E-B	MO	-25/70	740,6	747,9	718,6	8,8
9-E-B	MO	-25/70	683,4	690,9	679,6	7,6
10-E-B	MO	-25/70	701,6	706,6	677,9	9,3
11-E-B	MO	-25/70	710,8	719,6	691,9	7,6
12-E-B	MO	-25/70	645,0	654,5	637,9	7,5
13-E-B	MO	-25/70	676,4	683,5	662,7	8,2
14-E-B	MO	-25/70	719,7	717,0	696,0	9,3
15-E-B	MO	-25/70	741,2	750,2	724,5	8,9
16-E-B	MO	-25/70	699,5	701,5	683,2	7,3
17-E-B	MO	-25/70	666,0	671,2	656,7	5,9
18-E-B	MO	-25/70	721,0	728,0	720,9	7,7
19-E-B	MO	-25/70	591,8	593,9	577,7	9,0
20-E-B	MO	-25/70	704,8	712,1	700,2	5,9
21-E-B	MO	-25/70	709,9	712,4	702,6	9,6
22-E-B	MO	-25/70	740,4	742,8	714,6	10,1
23-E-B	MO	-25/70	742,2	745,8	734,8	11,1
24-E-B	MO	-25/70	715,5	716,3	695,2	10,3
25-E-B	MO	-25/70	689,7	693,6	669,9	9,5
26-E-B	MO	-25/70	667,7	671,2	642,6	7,7
27-E-B	MO	-25/70	737,2	745,7	716,1	9,8
28-E-B	MO	-25/70	703,0	708,5	695,5	10,7
29-E-B	MO	-25/70	731,1	737,4	725,1	10,8
30-E-B	MO	-25/70	726,4	741,5	717,1	10,2

Tab. 4. Naměřené hodnoty pro referenční modřínová tělesa lepená lepidlem PUR

Kód tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	f_t (MPa)
1-P-R	MO	ref.	704,4	-	-	8,8
2-P-R	MO	ref.	671,7	-	-	8,6
3-P-R	MO	ref.	711,1	-	-	8,2
4-P-R	MO	ref.	638,0	-	-	7,2
5-P-R	MO	ref.	699,2	-	-	7,9
6-P-R	MO	ref.	652,9	-	-	7,6
7-P-R	MO	ref.	587,2	-	-	8,4
8-P-R	MO	ref.	629,3	-	-	6,3
9-P-R	MO	ref.	696,1	-	-	7,9
10-P-R	MO	ref.	630,4	-	-	3,7
11-P-R	MO	ref.	649,6	-	-	9,1
12-P-R	MO	ref.	706,1	-	-	9,2
13-P-R	MO	ref.	655,0	-	-	11,4
14-P-R	MO	ref.	699,6	-	-	8,9
15-P-R	MO	ref.	676,4	-	-	8,4
16-P-R	MO	ref.	690,5	-	-	8,8
17-P-R	MO	ref.	694,3	-	-	9,2
18-P-R	MO	ref.	679,2	-	-	9,6
19-P-R	MO	ref.	660,7	-	-	8,1
20-P-R	MO	ref.	680,4	-	-	9,3
21-P-R	MO	ref.	644,3	-	-	6,8
22-P-R	MO	ref.	689,2	-	-	10,2
23-P-R	MO	ref.	692,8	-	-	9,8
24-P-R	MO	ref.	779,8	-	-	10,1
25-P-R	MO	ref.	642,2	-	-	3,0
26-P-R	MO	ref.	684,1	-	-	9,9
27-P-R	MO	ref.	627,1	-	-	6,5
28-P-R	MO	ref.	605,1	-	-	8,4
29-P-R	MO	ref.	659,9	-	-	9,2
30-P-R	MO	ref.	705,4	-	-	9,9

Tab. 5. Naměřené hodnoty pro modřínová tělesa namáhaná teplotami - 15 °C a 70 °C
lepená lepidlem PUR

Kód tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	f_t (MPa)
1-P-A	MO	-15/70	617,1	616,2	607,6	6,4
2-P-A	MO	-15/70	678,2	671,6	661,7	9,6
3-P-A	MO	-15/70	691,9	688,9	678,7	9,4
4-P-A	MO	-15/70	666,2	658,7	650,0	10,6
5-P-A	MO	-15/70	715,1	715,1	709,6	9,7
6-P-A	MO	-15/70	639,1	634,7	623,3	8,0
7-P-A	MO	-15/70	622,2	619,4	598,1	9,3
8-P-A	MO	-15/70	671,3	665,6	652,4	9,8
9-P-A	MO	-15/70	633,8	627,4	620,0	8,1
10-P-A	MO	-15/70	661,9	660,3	650,0	9,9
11-P-A	MO	-15/70	689,3	684,2	668,7	8,2
12-P-A	MO	-15/70	713,0	708,0	690,6	10,4
13-P-A	MO	-15/70	629,9	626,0	601,7	8,0
14-P-A	MO	-15/70	700,8	692,7	682,1	11,2
15-P-A	MO	-15/70	660,9	657,4	641,9	8,6
16-P-A	MO	-15/70	669,4	666,4	654,4	9,8
17-P-A	MO	-15/70	689,1	688,5	672,4	9,9
18-P-A	MO	-15/70	629,6	632,8	616,9	8,2
19-P-A	MO	-15/70	680,5	678,3	664,0	9,5
20-P-A	MO	-15/70	642,6	635,3	627,7	7,8
21-P-A	MO	-15/70	622,1	616,0	600,7	7,7
22-P-A	MO	-15/70	701,9	702,9	678,7	8,4
23-P-A	MO	-15/70	648,4	646,5	636,3	8,3
24-P-A	MO	-15/70	764,8	756,0	751,6	10,6
25-P-A	MO	-15/70	638,7	627,7	622,3	8,1
26-P-A	MO	-15/70	717,6	710,2	700,4	10,0
27-P-A	MO	-15/70	644,9	640,9	628,3	5,2
28-P-A	MO	-15/70	691,8	685,8	669,0	8,2
29-P-A	MO	-15/70	724,5	719,6	715,5	9,9
30-P-A	MO	-15/70	650,4	641,8	630,5	9,5

Tab. 6. Naměřené hodnoty pro modřínová tělesa namáhaná teplotami - 25 °C a 70 °C
lepená lepidlem PUR

Kód tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	f_t (MPa)
1-P-B	MO	-25/70	637,9	642,8	623,6	5,8
2-P-B	MO	-25/70	643,3	648,4	627,4	10,0
3-P-B	MO	-25/70	672,7	676,6	656,9	12,1
4-P-B	MO	-25/70	707,6	713,4	697,5	10,4
5-P-B	MO	-25/70	662,5	668,6	654,2	11,1
6-P-B	MO	-25/70	666,1	673,4	659,2	10,7
7-P-B	MO	-25/70	611,5	612,6	590,9	6,3
8-P-B	MO	-25/70	704,2	705,5	691,5	9,8
9-P-B	MO	-25/70	696,8	701,9	680,7	9,0
10-P-B	MO	-25/70	685,4	689,2	672,3	10,9
11-P-B	MO	-25/70	680,8	683,9	665,9	9,9
12-P-B	MO	-25/70	643,7	654,5	629,9	8,9
13-P-B	MO	-25/70	685,6	689,9	674,1	10,2
14-P-B	MO	-25/70	609,5	608,6	587,8	8,9
15-P-B	MO	-25/70	625,9	623,7	611,8	6,1
16-P-B	MO	-25/70	686,9	690,8	674,3	8,7
17-P-B	MO	-25/70	617,3	619,8	605,0	6,3
18-P-B	MO	-25/70	647,3	649,9	631,7	11,4
19-P-B	MO	-25/70	636,1	642,6	652,3	7,2
20-P-B	MO	-25/70	640,0	637,3	589,9	10,0
21-P-B	MO	-25/70	673,7	674,3	659,8	10,8
22-P-B	MO	-25/70	587,6	588,5	564,5	6,4
23-P-B	MO	-25/70	670,0	670,4	654,6	7,2
24-P-B	MO	-25/70	666,0	668,8	637,5	8,1
25-P-B	MO	-25/70	688,6	691,1	663,3	8,8
26-P-B	MO	-25/70	615,3	615,7	592,3	4,7
27-P-B	MO	-25/70	687,0	688,1	668,9	7,3
28-P-B	MO	-25/70	691,3	695,0	674,5	7,1
29-P-B	MO	-25/70	606,1	611,3	589,1	3,3
30-P-B	MO	-25/70	672,5	675,9	654,4	6,3

Tab. 7. Naměřené hodnoty pro referenční smrková tělesa lepená lepidlem EPI

Kód tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	f_t (MPa)
4-E-R	SM	ref.	417,0			5,7
5-E-R	SM	ref.	436,7			5,9
6-E-R	SM	ref.	591,8			9,7
7-E-R	SM	ref.	393,8			5,8
8-E-R	SM	ref.	447,3			5,5
9-E-R	SM	ref.	422,7			5,4
10-E-R	SM	ref.	409,0			4,7
11-E-R	SM	ref.	390,5			5,4
12-E-R	SM	ref.	459,9			5,6
13-E-R	SM	ref.	404,7			5,7
14-E-R	SM	ref.	535,2			11,3
15-E-R	SM	ref.	393,6			5,2
16-E-R	SM	ref.	392,3			5,0
17-E-R	SM	ref.	405,1			6,3
18-E-R	SM	ref.	537,8			11,6
19-E-R	SM	ref.	425,7			5,0
20-E-R	SM	ref.	541,5			10,9
21-E-R	SM	ref.	413,3			5,1
22-E-R	SM	ref.	448,1			9,7
23-E-R	SM	ref.	396,7			4,9
24-E-R	SM	ref.	514,7			9,9
25-E-R	SM	ref.	412,3			5,1
26-E-R	SM	ref.	396,1			7,3
27-E-R	SM	ref.	519,9			10,2
28-E-R	SM	ref.	538,8			10,8
29-E-R	SM	ref.	395,6			5,1
30-E-R	SM	ref.	577,0			9,0

Tab. 8. Naměřené hodnoty pro smrková tělesa namáhaná teplotami -15 °C a 70 °C
lepená lepidlem EPI

Kód tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	f_t (MPa)
1-E-A	SM	-15/70	547,6	547,9	541,2	12,1
2-E-A	SM	-15/70	393,6	389,6	382,2	4,1
3-E-A	SM	-15/70	387,4	383,2	377,5	4,0
4-E-A	SM	-15/70	398,8	389,5	378,8	4,8
5-E-A	SM	-15/70	407,6	402,6	393,1	5,0
6-E-A	SM	-15/70	417,1	413,2	406,8	4,8
7-E-A	SM	-15/70	421,9	419,0	408,3	4,1
8-E-A	SM	-15/70	401,6	400,2	391,7	4,9
9-E-A	SM	-15/70	423,4	419,6	411,0	3,9
10-E-A	SM	-15/70	397,6	391,9	385,0	3,8
11-E-A	SM	-15/70	582,8	571,0	569,9	5,5
12-E-A	SM	-15/70	427,1	424,5	413,0	3,9
13-E-A	SM	-15/70	403,4	399,1	388,6	5,0
14-E-A	SM	-15/70	505,0	500,4	491,3	7,4
15-E-A	SM	-15/70	381,4	379,0	368,7	4,0
16-E-A	SM	-15/70	545,3	544,8	535,8	11,0
17-E-A	SM	-15/70	573,9	569,6	562,7	7,6
18-E-A	SM	-15/70	427,5	426,2	415,2	3,7
19-E-A	SM	-15/70	419,4	419,1	409,7	5,5
20-E-A	SM	-15/70	390,6	386,6	376,9	4,9
21-E-A	SM	-15/70	426,3	421,1	417,2	7,6
22-E-A	SM	-15/70	498,2	493,6	481,6	6,4
23-E-A	SM	-15/70	513,3	508,0	504,1	9,5
24-E-A	SM	-15/70	415,3	416,0	405,4	4,6
25-E-A	SM	-15/70	415,6	413,3	407,3	4,7
26-E-A	SM	-15/70	408,6	405,8	396,4	3,5
27-E-A	SM	-15/70	590,3	591,0	576,8	9,2
28-E-A	SM	-15/70	416,7	411,7	403,3	4,4
29-E-A	SM	-15/70	406,5	402,6	395,3	4,5
30-E-A	SM	-15/70	425,2	420,3	411,0	6,2

Tab. 9. Naměřené hodnoty pro smrková tělesa namáhaná teplotami -25 °C a 70 °C
lepená lepidlem EPI

Kód tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	f_t (MPa)
1-E-B	SM	-25/70	421,2	424,0	406,8	5,9
2-E-B	SM	-25/70	548,0	547,6	535,7	8,6
3-E-B	SM	-25/70	446,1	449,5	433,0	7,2
4-E-B	SM	-25/70	576,6	579,5	559,7	7,5
5-E-B	SM	-25/70	380,6	382,3	368,2	5,1
6-E-B	SM	-25/70	544,8	547,9	531,7	6,8
7-E-B	SM	-25/70	522,4	519,7	502,5	5,3
8-E-B	SM	-25/70	409,7	409,1	396,1	6,8
9-E-B	SM	-25/70	422,0	421,4	409,3	4,9
10-E-B	SM	-25/70	403,3	403,0	388,3	5,9
11-E-B	SM	-25/70	414,5	419,6	404,3	4,0
12-E-B	SM	-25/70	452,7	457,2	435,0	7,1
13-E-B	SM	-25/70	416,9	418,5	400,5	6,2
14-E-B	SM	-25/70	462,0	462,8	449,4	5,9
15-E-B	SM	-25/70	541,7	545,6	529,8	10,4
16-E-B	SM	-25/70	413,6	416,2	399,2	3,7
17-E-B	SM	-25/70	393,2	391,6	379,0	4,9
18-E-B	SM	-25/70	553,2	554,4	538,3	11,4
19-E-B	SM	-25/70	441,8	440,9	428,6	5,5
20-E-B	SM	-25/70	427,5	429,2	415,4	6,0
21-E-B	SM	-25/70	391,5	396,6	384,9	5,4
22-E-B	SM	-25/70	517,8	518,6	500,5	6,8
23-E-B	SM	-25/70	426,2	426,9	414,6	5,1
24-E-B	SM	-25/70	405,6	406,4	390,2	3,8
25-E-B	SM	-25/70	429,9	430,9	412,9	7,0
26-E-B	SM	-25/70	427,9	426,7	408,9	3,4
27-E-B	SM	-25/70	395,0	400,9	378,6	6,0
28-E-B	SM	-25/70	500,6	502,6	484,8	6,6
29-E-B	SM	-25/70	420,1	421,6	404,2	4,9
30-E-B	SM	-25/70	445,4	449,3	429,2	5,2

Tab. 10. Naměřené hodnoty pro referenční smrková tělesa lepená lepidlem PUR

Kód tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	f_t (MPa)
1-P-R	SM	ref.	442,0			9,7
2-P-R	SM	ref.	404,5			7,5
3-P-R	SM	ref.	426,5			8,8
4-P-R	SM	ref.	417,5			6,0
5-P-R	SM	ref.	403,5			6,2
6-P-R	SM	ref.	396,5			5,7
7-P-R	SM	ref.	500,9			6,8
8-P-R	SM	ref.	378,3			6,1
9-P-R	SM	ref.	415,5			8,6
10-P-R	SM	ref.	475,0			8,5
11-P-R	SM	ref.	395,2			5,9
12-P-R	SM	ref.	508,3			8,7
13-P-R	SM	ref.	418,8			6,3
14-P-R	SM	ref.	369,7			5,7
15-P-R	SM	ref.	414,1			7,9
16-P-R	SM	ref.	414,3			5,5
17-P-R	SM	ref.	433,2			8,6
18-P-R	SM	ref.	414,3			6,4
19-P-R	SM	ref.	408,3			7,0
20-P-R	SM	ref.	390,7			5,5
21-P-R	SM	ref.	377,2			6,1
22-P-R	SM	ref.	416,4			6,0
23-P-R	SM	ref.	374,0			6,2
24-P-R	SM	ref.	422,9			8,0
25-P-R	SM	ref.	395,0			7,6
26-P-R	SM	ref.	439,1			9,5
27-P-R	SM	ref.	422,8			6,4
28-P-R	SM	ref.	388,6			5,8
29-P-R	SM	ref.	400,8			6,8
30-P-R	SM	ref.	481,3			6,4

Tab. 11. Naměřené hodnoty pro smrková tělesa namáhaná teplotami -15 °C a 70 °C
lepená lepidlem PUR

Kód tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	f_t (MPa)
1-P-A	SM	-15/70	430,0	426,9	417,4	5,1
2-P-A	SM	-15/70	427,9	422,4	411,8	6,5
3-P-A	SM	-15/70	397,1	392,0	383,7	6,3
4-P-A	SM	-15/70	402,9	399,5	393,8	6,0
5-P-A	SM	-15/70	386,2	382,1	375,1	5,3
6-P-A	SM	-15/70	422,9	416,8	408,8	8,6
7-P-A	SM	-15/70	444,5	439,5	428,1	9,2
8-P-A	SM	-15/70	410,2	404,8	399,2	9,2
9-P-A	SM	-15/70	427,3	421,2	414,6	6,7
10-P-A	SM	-15/70	419,5	415,1	407,3	5,1
11-P-A	SM	-15/70	419,4	413,9	404,8	5,8
12-P-A	SM	-15/70	417,2	416,1	407,8	5,7
13-P-A	SM	-15/70	394,9	392,6	382,9	6,5
14-P-A	SM	-15/70	405,4	405,8	393,1	7,7
15-P-A	SM	-15/70	367,1	366,5	350,3	5,9
16-P-A	SM	-15/70	398,4	396,1	386,3	6,4
17-P-A	SM	-15/70	499,9	495,1	480,8	8,8
18-P-A	SM	-15/70	421,2	418,1	406,4	5,7
19-P-A	SM	-15/70	499,8	499,7	488,9	6,7
20-P-A	SM	-15/70	418,5	416,3	407,6	6,5
21-P-A	SM	-15/70	417,4	416,1	402,4	7,4
22-P-A	SM	-15/70	424,9	422,5	410,8	5,4
23-P-A	SM	-15/70	400,0	398,5	386,1	6,6
24-P-A	SM	-15/70	488,0	486,0	471,5	7,4
25-P-A	SM	-15/70	418,5	414,0	407,6	6,0
26-P-A	SM	-15/70	399,1	395,2	386,4	4,9
27-P-A	SM	-15/70	426,1	422,5	414,0	6,5
28-P-A	SM	-15/70	427,9	425,5	418,3	7,8
29-P-A	SM	-15/70	399,0	394,4	383,5	6,0
30-P-A	SM	-15/70	430,7	425,8	416,6	9,5

Tab. 12. Naměřené hodnoty pro smrková tělesa namáhaná teplotami -25 °C a 70 °C
lepená lepidlem PUR

Kód tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	f_t (MPa)
1-P-B	SM	-25/70	414,8	419,1	400,4	5,5
2-P-B	SM	-25/70	407,9	414,1	392,9	5,4
3-P-B	SM	-25/70	405,9	406,8	387,6	7,8
4-P-B	SM	-25/70	415,1	420,7	400,0	6,5
5-P-B	SM	-25/70	448,5	453,0	436,4	5,8
6-P-B	SM	-25/70	361,6	366,9	345,9	6,0
7-P-B	SM	-25/70	381,8	390,0	370,4	5,8
8-P-B	SM	-25/70	389,0	392,7	374,9	6,5
9-P-B	SM	-25/70	401,9	404,5	389,1	5,2
10-P-B	SM	-25/70	422,8	427,9	407,8	10,8
11-P-B	SM	-25/70	394,4	399,7	383,1	7,1
12-P-B	SM	-25/70	404,9	407,6	391,7	8,0
13-P-B	SM	-25/70	409,9	414,8	394,9	9,0
14-P-B	SM	-25/70	388,7	392,7	374,2	6,6
15-P-B	SM	-25/70	421,0	425,9	408,1	6,7
16-P-B	SM	-25/70	433,5	441,9	421,1	7,5
17-P-B	SM	-25/70	412,6	418,5	397,6	9,0
18-P-B	SM	-25/70	400,8	407,0	388,2	7,0
19-P-B	SM	-25/70	413,7	417,5	400,0	8,9
20-P-B	SM	-25/70	395,3	397,8	382,3	4,8
21-P-B	SM	-25/70	395,2	399,0	380,0	5,5
22-P-B	SM	-25/70	489,5	494,0	472,3	10,5
23-P-B	SM	-25/70	407,3	409,8	392,4	5,9
24-P-B	SM	-25/70	488,6	495,8	472,8	7,1
25-P-B	SM	-25/70	404,3	409,7	392,8	8,6
26-P-B	SM	-25/70	400,3	402,2	383,9	5,4
27-P-B	SM	-25/70	363,0	365,1	344,5	4,0
28-P-B	SM	-25/70	367,8	371,2	352,6	5,2
29-P-B	SM	-25/70	419,9	424,0	407,2	6,9
30-P-B	SM	-25/70	386,8	391,6	370,2	6,8

Tab. 13 Naměřené hodnoty hmotnosti a vlhkosti vybraných těles

Kód tělesa	Dřevina	Teplotní zatížení (°C)	m_p (g)	W_p (%)	m_m (g)	W_m (%)	m_k (g)	W_k (%)	m_0 (g)
1-E-R	MO	ref.	21,3	12,2	-	-	-	-	19,0
2-E-R	MO	ref.	21,5	12,0	-	-	-	-	19,2
3-E-R	MO	ref.	21,3	12,0	-	-	-	-	20
1-P-R	MO	ref.	22,0	11,2	-	-	-	-	19,8
2-P-R	MO	ref.	21,3	10,7	-	-	-	-	19,2
3-P-R	MO	ref.	22,2	10,4	-	-	-	-	20,1
4-E-R	SM	ref.	12,3	12,1	-	-	-	-	10,9
5-E-R	SM	ref.	12,9	12,2	-	-	-	-	11,5
6-E-R	SM	ref.	17,5	12,1	-	-	-	-	15,7
1-P-R	SM	ref.	13,0	12,2	-	-	-	-	11,6
2-P-R	SM	ref.	12,0	12,6	-	-	-	-	10,7
3-P-R	SM	ref.	12,7	11,6	-	-	-	-	11,3
1-E-A	MO	-15/70	23,1	11,3	23,2	11,9	21,4	3,2	20,6
2-E-A	MO	-15/70	20,5	12,9	20,7	13,5	19,0	4,6	18,3
3-E-A	MO	-15/70	21,7	12,1	21,7	12,5	20,1	4,0	19,3
1-P-A	MO	-15/70	19,3	12,0	19,3	12,2	17,8	3,4	17,2
2-P-A	MO	-15/70	21,4	11,6	21,4	11,4	20,0	3,8	19,1
3-P-A	MO	-15/70	22,0	11,3	22,0	11,1	20,4	3,0	19,7
1-E-A	SM	-15/70	16,3	12,1	16,3	12,1	14,9	2,6	14,6
2-E-A	SM	-15/70	11,7	11,9	11,7	11,8	10,7	2,3	10,4
3-E-A	SM	-15/70	11,1	12,0	11,1	11,5	10,2	2,2	10,0
1-P-A	SM	-15/70	12,7	12,1	12,7	12,3	11,6	2,5	11,3
2-P-A	SM	-15/70	12,7	12,0	12,6	11,6	11,5	2,2	11,3
3-P-A	SM	-15/70	11,8	11,9	11,7	11,2	10,8	2,0	10,5
1-E-B	MO	-25/70	22,3	12,1	22,4	12,7	20,6	3,5	19,9
2-E-B	MO	-25/70	22,7	11,8	22,8	12,5	21,1	4,3	20,2
3-E-B	MO	-25/70	22,4	11,9	22,6	12,5	20,9	4,1	20,1
1-P-B	MO	-25/70	19,8	12,1	19,7	11,8	18,1	2,3	17,7
2-P-B	MO	-25/70	20,6	11,8	20,6	11,6	19,0	3,2	18,4
3-P-B	MO	-25/70	21,4	11,6	21,4	11,4	19,7	2,6	19,2
1-E-B	SM	-25/70	12,4	12,3	12,4	12,4	11,2	1,2	11,0
2-E-B	SM	-25/70	16,4	12,1	16,4	11,9	14,8	1,2	14,6
3-E-B	SM	-25/70	13,3	11,8	13,3	11,9	12,0	0,8	11,9
1-P-B	SM	-25/70	12,3	11,9	12,3	12,2	11,0	0,5	11,0
2-P-B	SM	-25/70	12,2	11,7	12,3	12,3	11,0	0,5	10,9
3-P-B	SM	-25/70	12,0	12,0	12,0	12,2	10,8	0,6	10,7