

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ



Vliv zvýšené teploty iniciované ohněm
na pevnost konstrukčního lepeného lamelového dřeva dubu

Effect of increased temperature initiated by fire on the strength of
structural glued laminated oak timber

Disertační práce

v programu

Protipožární ochrana lesa, dřevěných materiálů a materiálů na bázi dřeva

Autor: Ing. Lukáš Sahula

Školitel: Ing. Přemysl Šedivka, Ph.D.

2026

Praha

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Lukáš Sahula

Protipožární ochrana lesa, dřevěných materiálů a materiálů na bázi dřeva

Název práce

Vliv zvýšené teploty iniciované ohněm na pevnost konstrukčního lepeného lamelového dřeva dubu

Název anglicky

Effect of increased temperature initiated by fire on the strength of structural glued laminated oak timber

Cíle práce

Cílem disertační práce je analýza zaměřená na působení zvýšených teplot iniciovaných hořením na pevnost lepených spojů a chování adhesiv určených pro aplikaci do konstrukčních spojů. Na základě uskutečněných pevnostních zkoušek vytvořit odpovídající návrh nejvhodnějšího systému lepení pro nosné a nenosné konstrukční dřevo do interiérového a exteriérového prostředí.

Metodika

K dosažení cíle práce vede vědecká metoda, která je složena z dílčích částí. V prvním fázi bude stanovena analýza metodických postupů testování odolnosti lepených spojů při působení vysokých teplot iniciovaných ohněm. Na základě této analýzy vzejdou nulové hypotézy pokusů a budou určeny vhodné metodické postupy pro stanovení charakteristik chování adhesiv lepených spojů při působení vysokých teplot. V druhém kroku budou stanoveny jednotlivé typy adhesiv, jejichž vlastnosti vyhovují pro aplikaci konstrukčních spojů nosných konstrukcí a použijí se pro realizaci mechanických zkoušek. Testovány budou především adhesiva na bázi polyuretanu a na bázi formaldehydu. Třetí část bude zaměřena na experimentální testování, jež je sestaveno z následujících kroků. Nejprve se budou realizovat testy pro stanovení termomechanických charakteristik adhesiv. Zvolená metoda diferenční skenovací kalorimetrie nám přesně stanoví bod studené krystalizace, bod skelného přechodu, teplotní pásmo a bod vzplanutí. Na základě dosažených výsledků mohou být škálovány charakteristiky adhesiv dle jednotlivých teplotních pásem. V druhém kroku samotného experimentu budou stanoveny mechanicko-fyzikální vlastnosti z hlediska hodnocení požární odolnosti a vlastnosti zkušebních vzorků dle platných norem. Dále bude přistoupeno k experimentálnímu posouzení vlivu typu adhesiva na odolnost lepeného spoje při vyšší teplotě. Lepené spoje budou podrobeny postupné teplotní expozici tak, aby bylo možné sestavit závislost vlivu teploty na výsledné pevnosti lepeného spoje dle druhu lepidla. Na základě výsledků bude sestaven teoretický model zaměřený na ověření charakteristik chování lepeného spoje v závislosti na teplotě. Pro nejvhodnější varianty bude provedeno testování reakce na oheň podle standardizovaných testů (norem).

Doporučený rozsah práce

170-190 stran bez příloh

Klíčová slova

Zvýšená teplota, adhesiva, pevnost spoje, systém lepení.

Doporučené zdroje informací

- BACHTIAR, E. V., KONOPKA, D., SCHMIDT, B., NIEMZ, P., KALISKE, M. (2019). Hygro-mechanical analysis of wood-adhesive joints. *Engineering Structures* 193, pp. 257 – 270.
- BOCKEL, S., MAYER, I., KONNERTH, J., HARLING, S., NIEMZ, P., SWABODA, C., BEYER, M., BIERI, N., WEILAND, G., PICHELIN, F. (2019). The role of wood extractives in structural hardwood bonding and their influence on different adhesive systems. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 91, pp. 43–53.
- BODIG, J., JAYNE, B.A. *Mechanics of Wood and Wood Composites*, 1st ed. Van Nostrand Reinhold: New York, NY, USA, 1982. p. 712. ISBN 0-442-00822-8.
- DOUGLAS, B. K. (2005). Calculating the fire resistance of exposed wood members. American Forest & Paper Association. Washington DC, USA.
- CHEN, C. K., YANG, J., CHEN, J., ZENG, J. W., WANG, W. Y., ZHAO, X. L. (2017). Fire resistance performance of glulam beam. *Journal of Central South University* (24), pp. 929 – 936 DOI: DOI: 10.1007/s11771-017-3495-8.
- KRÁL, P., KLÍMEK, P., DĚCKÝ, D. (2015). Comparison of the bond strength of oak (*Quercus L.*) and beech (*Fagus sylvatica L.*) wood glued with different adhesives considering various hydrothermal exposures. *Journal of Forest Science* 61, pp. 189 – 192, DOI: 10.17221/95/2014-JFS.
- KUMAR, R. N., PIZZI, A. *Adhesives for Wood and Lignocellulosic Materials*. 1st ed., Wiley-Scrivener, Hoboken, NJ 07030, USA. 2019. p. 516. ISBN 978-1-119-60543-0.
- PIZZI, A., MITTAL, K. L. *Wood adhesives*. CRC Press, Florida, USA. 2011. ISBN-13: 978-9-00-419092-4
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd. Príroda, Bratislava, Slovakia. 1993. p. 485. ISBN 80-07-00600-1.
- ROWELL, R.M. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composite*. 1st ed., CRC Press, Florida, USA. 2005. p. 487. ISBN-13: 9780429209000.

Předběžný termín

2026/27 ZS – FLD – Obhajoba DisP

Vedoucí práce

Ing. Přemysl Šedivka, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

doc. Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D., Dipl. Mgmt.

Elektronicky schváleno dne 20. 08. 2023

Ing. Radek Rinn, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 08. 2023

prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.

Předseda oborové rady

Elektronicky schváleno dne 03. 01. 2025

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 15. 07. 2026

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „*Vliv zvýšené teploty iniciované ohněm na pevnost konstrukčního lepeného lamelového dřeva dubu*“ vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele. Jsem si vědom, že na moji disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním disertační práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souladu s GDPR.

V Praze 10.06.2026

Ing. Lukáš Sahula

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především svému školiteli, panu Ing. Přemyslu Šedivkovi, Ph.D., a konzultantovi práce, panu doc. Ing. Vlastimilu Borůvkovi, Ph.D., Dipl. Mgmt., za jejich odborné vedení, cenné rady a podporu při zpracování této disertační práce. Velké poděkování patří také mé rodině za letitou podporu a pochopení, stejně jako mým přátelům a všem, kteří mě provázeli po celou dobu studia. Vypracování disertační práce bylo umožněno díky finanční podpoře Interní grantové agentury Fakulty lesnické a dřevařské IGA FLD ČZU (A_04_22) a projektu Vývoj systémů lepení listnatého dřeva dubu pro konstrukční a nekonstrukční aplikace v exteriéru.

Abstrakt ve státním jazyce

Práce se zaměřuje na vývoj konstrukčního prvku na bázi lepeného lamelového dřeva z dubu a na ověření jeho chování při zvýšených teplotách a požárním namáhání. Dub jako listnatá dřevina vykazuje ve srovnání s běžně používanými jehličnatými dřevinami řadu specifík, zejména vyšší objemovou hmotnost, heterogenní anatomickou stavbu, odlišnou povrchovou strukturu a chemické složení s významným obsahem tříslovin. Tyto vlastnosti mohou negativně ovlivňovat smáčivost povrchu, průběh vytvrzování lepidla i výslednou kvalitu lepené spáry.

Cílem práce bylo navrhnout a ověřit funkční systém pro konstrukční lepení dubového dřeva se zvýšenou odolností lepeného spoje při teplotním zatížení. Experimentální postup zahrnoval úpravu povrchu dřeva před lepením pomocí alkalického penetračního systému na bázi vodného roztoku hydroxidu draselného ($\text{KOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$). Současně bylo polyuretanové konstrukční lepidlo modifikováno termosetickou složkou s vyšší tepelnou stabilitou. V první fázi byly provedeny předběžné zkoušky zaměřené na výběr vhodného lepidla, modifikačního prostředku a termosetu. Následně byly hodnoceny pevnostní charakteristiky lepených spojů, zejména pevnost ve smyku za normálních podmínek a při zvýšených teplotách.

Na základě laboratorních výsledků byl vybrán vhodný systém lepení pro výrobu dubového lepeného lamelového nosníku, který byl následně ověřen při velkorozměrové zkoušce požární odolnosti. Během zkoušky byl sledován vývoj teplot v průřezu, průhyb nosníku, redukce účinného průřezu a celková mechanická odezva prvku. Experimentální část byla doplněna numericko-analytickým predikčním modelem vytvořeným v prostředí software Python 3.14.3, který propojoval výpočet teplotního pole, postup zuhelnatění, účinnou redukci průřezu a mechanické posouzení nosníku.

Výsledky prokázaly, že vhodná kombinace povrchové úpravy dubového dřeva a modifikovaného adhezivního systému může přispět ke zvýšení kvality lepeného spoje a ke zlepšení chování konstrukčního prvku při požárním namáhání. Získané poznatky poskytují podklady pro další vývoj dubových lepených lamelových prvků a jejich možné využití ve stavební praxi, zejména tam, kde je požadována kombinace vysoké únosnosti, kvalitní lepené spáry a ověřené požární odolnosti.

Klíčová slova

Konstrukční materiál; dřevo; adhesiva; modifikace; mechanické vlastnosti; požární odolnost

Abstract in a foreign language

This dissertation focuses on the development of a structural element based on oak glued laminated timber and on the assessment of its behaviour under elevated temperatures and fire exposure. Compared with commonly used softwoods, oak wood, as a hardwood species, has several specific characteristics, including higher density, heterogeneous anatomical structure, different surface properties and chemical composition with a significant content of tannins. These properties may negatively affect surface wettability, adhesive curing and the final quality of the bond line.

The aim of the study was to design and verify a functional system for structural bonding of oak wood with increased resistance of the bonded joint under thermal loading. The experimental procedure included surface treatment of the wood prior to bonding using an alkaline penetrating system based on an aqueous potassium hydroxide solution (KOH·H₂O). At the same time, the structural polyurethane adhesive was modified with a thermosetting component with higher thermal stability. In the first phase, preliminary tests were carried out to select a suitable adhesive, modifying agent and thermoset. Subsequently, the strength characteristics of the bonded joints were evaluated, particularly shear strength under standard conditions and at elevated temperatures.

Based on the laboratory results, a suitable bonding system was selected for the production of an oak glued laminated timber beam, which was subsequently verified in a large-scale fire resistance test. During the test, the temperature development within the cross-section, beam deflection, reduction of the effective cross-section and overall mechanical response of the element were monitored. The experimental part was supplemented by a numerical–analytical predictive model developed in software Python 3.14.3. The model combined the calculation of the temperature field, charring development, effective cross-section reduction and mechanical assessment of the beam.

The results showed that a suitable combination of oak wood surface modification and a modified adhesive system can improve the quality of the bonded joint and support the use of oak glued laminated timber in structural applications requiring high load-bearing capacity, reliable bond line performance and verified fire resistance.

Key words

Glulam; timber; adhesives; modifications; mechanical properties; fire resistance

Obsah

1 ÚVOD	17
2 HYPOTÉZY A CÍLE PRÁCE	19
3 LITERÁRNÍ PŘEHLED.....	20
3.1 Stavba dřeva a jeho vlastnosti	20
3.1.1 Makroskopické znaky dřeva.....	20
3.1.2.1 Makroskopické znaky dřeva dubu.....	21
3.1.3 Mikroskopická stavba dřeva.....	22
3.1.4.1 Mikroskopická stavba dřeva dubu.....	23
3.1.5 Submikroskopická stavba.....	23
3.1.6 Chemické složení dřeva	24
3.2 Vybrané fyzikální vlastnosti dřeva.....	26
3.2.1 Hustota dřeva.....	26
3.2.2 Vlhkost dřeva	27
3.2.3 Tepelné vlastnosti dřeva.....	28
3.3 Vybrané mechanické vlastnosti dřeva.....	35
3.3.1 Pevnost dřeva	36
3.3.1.1 Dělení pevnosti dle způsobu a času zatížení	39
3.4 Lepení.....	44
3.4.1 Teorie lepení.....	46
3.4.2 Faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje z důvodu kvality povrchu a struktury dřeva...	47
3.4.3 Termosetické modifikace a penetrace povrchu dřeva před lepením	52
3.4.4 Druhy lepidel.....	56
3.4.4.1 Močovino-formaldehydová lepidla (UF)	56
3.4.4.2 Fenol-formaldehydová lepidla (PF)	57

3.4.4.3 Melamin-formaldehydová lepidla (MF).....	57
3.4.4.4 Izokyanátová lepidla a jejich polymery (MDI)	57
3.4.4.5 Polyuretanová lepidla (PU)	58
3.4.3 Tepelné vlastnosti PUR lepidel	64
3.5 Konstrukční lepené lamelované dřevo	66
3.5.1 Využití dubového dřeva do konstrukčních prvků staveb	67
3.5.2 Konstrukční využití listnatého dřeva dubu.....	70
3.5.2.1 Stanovení pevnosti v ohybu bez teplotní expozice	71
3.5.2.2 Stanovení pevnosti v ohybu při zvýšených teplotách emitovaných požárem	74
3.6 Vliv zvýšených teplot na vlastnosti konstrukčního lepeného dřeva	78
3.6.1 Termická degradace dřeva a chemické změny jeho hlavních složek.....	82
3.6.2. Pyrolýza dřeva.....	83
3.6.3 Zohlednění zuhelnatělé a pyrolýzní vrstvy při zvýšených teplotách	84
3.6.4 Normová teplotní křivka	86
3.6.5 Závislost mechanických vlastností dřeva na teplotě.....	88
4 METODIKA.....	90
4.1 Příprava a vývoj lepidel.....	91
4.1.1 Výběr vhodného adhezivního systému	91
4.2 Výběr vhodného povrchového modifikačního prostředku	93
4.3 Výběr vhodného termosetického přípravku	94
4.4 Termická analýza lepidel a modifikačních prvků (DSC).....	95
4.5 Zhotovení předtestovacích těles a mechanické zkoušení	96
4.5.1 Stanovení drsnosti povrchu	96
4.5.2 Výroba zkušebních těles pro testování smykové pevnosti.....	97
4.5.3 Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání.....	98

4.5.4 Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém zatížení za zvýšených teplot	100
4.5.5 Výroba zkušebních těles pro předtestování pevnosti v ohybu.....	101
4.5.6 Zkušební tělesa pro stanovení pevnosti v ohybu rovnoběžně s vlákny.....	101
4.6 Stanovení zatěžovací síly pro experimentální zkoušku nosníku	105
4.6.1 Předkalkulace charakteristik zatěžovacího modelu.....	105
4.6.2 Model predikce požární odolnosti lepeného nosníku.....	109
4.7 Výroba konstrukčního materiálu pro požární testování	115
4.7.1. Dřevo dubu	115
4.7.2 Kvalitativní třídění	115
4.7.3 Výroba vzorků a implementování teplotních čidel	116
4.7.4 Lepení a povrchová úprava lamel	121
4.7.5 Aplikace do pece a zapálení	127
5 VÝSLEDKY A DISKUSE.....	131
5.1 Drsnost povrchu	131
5.2 Podélná smyková pevnost při tahovém namáhání	133
5.3 Termická analýza lepidel a modifikačních komponentů.....	142
5.3.1 Termická analýza lepidel	142
5.3.2 Termická analýza adhezního systému.....	145
5.4 Testování podélné smykové pevnosti za zvýšených teplot.....	149
5.5 Stanovení pevnosti v ohybu rovnoběžně s vlákny	153
5.6 Kritérium únosnosti testovaných nosníků	155
5.7 Model predikce požární zkoušky	157
5.8 Požární zkouška.....	160
5.8.1 Průběh teploty v peci a zkušební podmínky.....	160
5.8.2 Průběh vnitřních teplot zkoušených nosníků	166

5.8.3 Průhyby nosníků.....	170
5.8.4 Vyhodnocení nosnosti a klasifikace požární odolnosti	172
6 ZÁVĚR.....	176
Přínos práce pro vědu	179
Přínos práce pro praxi	180
Seznam obrázků, tabulek a grafů	181
Seznam vědeckých publikací	184
Seznam použitých zdrojů	187
Seznam příloh.....	218

Seznam zkratek

BSH	Lepené lamelové dřevo (<i>Brettschichtholz</i>)
CLT	Křížem vrstvené dřevo (<i>Cross-Laminated Timber</i>)
CML	Složená střední lamela (<i>Compound Middle Lamella</i>)
DMTA	Dynamicko-mechanická tepelná analýza (<i>Dynamic Thermomechanical Analysis</i>)
DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie (<i>Differential Scanning Calorimetry</i>)
DST	Deskový snímač teploty (<i>Plate-Type Temperature Sensor</i>)
EPI	Emulzní polymerní izokyanátové lepidlo (<i>Emulsion Polymer Isocyanate</i>)
FTIR	Infračervený spektrometr s Fourierovou transformací (<i>Fourier-Transform Infrared Spectrometer</i>)
KVH	Masivní konstrukční dřevo (<i>Konstruktionsvollholz</i>)
MF	Melamin-formaldehydová pryskyřice (<i>Melamine-Formaldehyde Resin</i>)
MFA	Mikrofibrilární úhel (<i>Microfibril Angle</i>)
MFFT	Minimální teplota formování filmu (<i>Minimum Film Forming Temperature</i>)
MOE	Modul pružnosti (<i>Modulus of Elasticity</i>)
MOR	Pevnost v ohybu (<i>Modulus of Rupture</i>)
MUF	Melamin-močovino-formaldehydová pryskyřice (<i>Melamine-Urea-Formaldehyde Resin</i>)
PF	Fenol-formaldehydová pryskyřice (<i>Phenolic Resin</i>)
pMDI	Polymerní methyldifenyl-diisokyanát
PRF	Fenol-resorcinol-formaldehydová pryskyřice (<i>Phenol-Resorcinol-Formaldehyde Resin</i>)
PUR	Polyuretanové lepidlo (<i>Polyurethane adhesive</i>)
PUR+UF	Polyuretanové lepidlo a močovino-formaldehydová pryskyřice
PUR+MF	Polyuretanové lepidlo a melamin-formaldehydová pryskyřice
PUR+PF	Polyuretanové lepidlo a fenol-formaldehydová pryskyřice
PVAc	Polyvinylacetátové lepidlo (<i>Polyvinyl Acetate</i>)
RCSM	Metoda redukovaného průřezu (<i>Reduced Cross-Section Method</i>)
SEM	Skenovací elektronový mikroskop (<i>Scanning Electron Microscope</i>)
UF	Močovino-formaldehydová pryskyřice (<i>Urea-Formaldehyde Resin</i>)
LOQ	Mez stanovitelnosti (<i>Limit of Quantification</i>)
SPSL	Konstrukční kompozitní dřevo (<i>Steam-Pressed Scrim Lumber</i>)

Názvosloví

ε	poměrná deformace	-
λ	součinitel tepelné vodivosti	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
σ	napětí	Pa
ρ	objemová hmotnost	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
φ_s	sálavý tok dopadající na povrch materiálu	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
D	průhyb uprostřed rozpětí nosníku	mm
c	měrná tepelná kapacita	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
d_e	procentuální odchylka ploch pod křivkami teplota/čas	%
E	modul pružnosti	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
m	hmotnost	kg
Q	teplot	J
S	plocha	mm^2, m^2
t	čas	hod, min, s
T	teplota	K, °C
V	objem materiálu	m^3
w	vlhkost	%
T_g	teplota skelného přechodu	°C
k_h	součinitel velikosti průřezu	-
h	výška průřezu nosníku	mm
b	šířka průřezu nosníku	mm
$f_{m,d}$	návrhová pevnost v ohybu	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
$f_{m,g,k}$	charakteristická pevnost lepeného lamelového dřeva	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
γ_m	dílčí součinitel materiálu	-
k_{mod}	modifikační součinitel	-
m_{spec}	hmotnost zkušebního nosníku	kg
g	tíhové zrychlení	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
L_{spec}	celková délka zkušebního nosníku	m
L_{sup}	rozpětí mezi podpěrami	m
q_{spec}	spojité zatížení od vlastní tíhy nosníku	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$
q_{dec}	spojité zatížení od stropní skladby	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$
$M_{d,i}$	návrhový ohybový moment odpovídající únosnosti průřezu	$\text{kN}\cdot\text{m}$
M_{spec}	ohybový moment od vlastní tíhy nosníku	$\text{kN}\cdot\text{m}$
M_{deck}	ohybový moment od stropní skladby	$\text{kN}\cdot\text{m}$
$M_{test,i}$	ohybový moment připadající na zkušební zatížení	$\text{kN}\cdot\text{m}$
P_i	velikost jedné bodové síly při zkoušce	kN
V_i	posouvající síla	kN
η_{fi}	redukční součinitel zatížení pro požární situaci	-
d_{eff}	účinná redukce průřezu	mm
d_0	nulová vrstva	mm
k_0	součinitel jejího časového náběhu	-
b_{eff}	účinná šířka	mm
h_{eff}	výška průřezu	mm
$(EI)_{eff}$	účinná ohybová tuhost vrstveného průřezu	$\text{N}\cdot\text{mm}^2$
I	moment setrvačnosti průřezu k ohybové ose	mm^4
v	očekávaný průhyb nosníku	mm
A	plocha průřezu	mm^2
W	modul odporu / průřezový modul	mm^3

1 ÚVOD

Současné stavebnictví je stále výrazněji ovlivňováno požadavky na snižování environmentálních dopadů, efektivnější využívání materiálových zdrojů a zrychlení samotného procesu výstavby. Přestože celková situace na stavebním trhu není v posledních letech jednoznačně dynamická, lze konstatovat, že zájem o stavby na bázi dřeva zůstává stabilní a v některých segmentech postupně roste. V českém prostředí se dřevostavby prosazují zejména v oblasti rodinných domů, ale současně narůstá zájem také o jejich využití u atypických staveb, vícepodlažních obytných domů, veřejných budov a hybridních konstrukcí, kde je dřevo kombinováno například s betonem, ocelí nebo dalšími materiály. Tyto konstrukční přístupy umožňují lépe využít výhod jednotlivých materiálů a současně reagovat na požadavky architektury, statiky, požární bezpečnosti i uživatelského komfortu.

Širší uplatňování dřeva ve stavebnictví souvisí především se snahou snižovat environmentální dopady stavebního sektoru. Výroba tradičních stavebních materiálů, zejména cementu a oceli, společně s dopravou a stavebními procesy významně přispívá k produkci oxidu uhličitého a dalších skleníkových plynů (Huang et al., 2018). Výstavba a provoz budov se zároveň podílejí přibližně 34 % na globální spotřebě energie a 37 % na emisích souvisejících s energií a procesy (United Nations Environment Programme, 2022). Dřevo proto představuje materiálovou alternativu s potenciálem snížit emisní a surovinovou náročnost staveb, přičemž současně nabízí nízkou objemovou hmotnost, dobré tepelně-technické vlastnosti, příznivý poměr pevnosti a hmotnosti, možnost prefabrikace, rychlou montáž a schopnost vázat uhlík. Díky těmto vlastnostem se uplatňuje nejen u rodinných domů, ale také u vícepodlažních a hybridních staveb, kde může konkurovat konvenčním konstrukčním systémům (Ramage et al., 2017; Mergel et al., 2024).

Rozvoj moderních dřevěných konstrukcí je úzce spojen s používáním inženýrských výrobků ze dřeva. Mezi významné konstrukční materiály patří zejména lepené lamelové dřevo, které vzniká spojováním pevnostně tříděných lamel za pomoci konstrukčních lepidel. Tento způsob výroby umožňuje omezit vliv přirozených vad rostlého dřeva, dosáhnout vyšší rozměrové stability a vytvářet prvky větších délek, průřezů nebo zakřivených tvarů. Konstrukční lepené

hranoly tak nacházejí uplatnění u prvků s většími rozpony, například u rámců, vazníků, oblouků nebo střešních a stropních nosných systémů (ČSN EN 14080, 2013).

Vedle běžně používaných jehličnatých dřevin se v posledních letech zvyšuje pozornost také vůči listnatým dřevinám, mezi které patří dub. Dubové dřevo se vyznačuje vyšší hustotou, dobrými mechanickými vlastnostmi, estetickou hodnotou a přirozenou trvanlivostí. Současně je však dub z hlediska lepení technologicky náročnější dřevinou, a to zejména v důsledku vyšší hustoty, výraznější anatomické struktury, obsahu tříslovin a extraktivních látek, které mohou ovlivňovat smáčivost povrchu, penetraci lepidla a tvorbu kvalitního lepeného spoje. V podobě lepeného lamelového dřeva může představovat vhodný materiál pro nosné konstrukce, u nichž je požadována vyšší únosnost, tuhost nebo menší průřezové rozměry. Jeho použití však zároveň klade vyšší nároky na technologii výroby, zejména na kvalitu povrchu lamel, volbu vhodného lepidla, vlhkost dřeva a celkovou spolehlivost lepeného spoje (Aicher et al., 2014).

Přestože dřevo disponuje řadou výhod, nelze opomenout faktory, které jeho použití v nosných konstrukcích omezují nebo vyžadují zvláštní návrhová opatření. Patří mezi ně zejména citlivost na vlhkostní změny, možnost biologického napadení, potřeba konstrukční ochrany a otázka chování při požáru. Z hlediska reakce na oheň je dřevo hořlavým materiálem, avšak z hlediska požární odolnosti vykazují masivní dřevěné prvky poměrně předvídatelné chování. Při působení vysokých teplot dochází k postupnému zuhelnatění povrchové vrstvy, která zpomaluje pronikání tepla do nezasaženého jádra průřezu. Návrh dřevěných konstrukcí na požární odolnost je proto možné provádět pomocí normových postupů, například metodou redukovaného průřezu podle Eurokódu 5 (ČSN EN 1995-1-2, 2006).

U lepených konstrukčních prvků však požární problematika nezahrnuje pouze samotné dřevo, ale také chování lepených spojů a konstrukčních lepidel při zvýšených teplotách. Vlivem ohně dochází v průřezu prvku k výraznému teplotnímu gradientu, úbytku vlhkosti, změnám mechanických vlastností dřeva a současně k možnému poklesu pevnosti a adheze lepeného spoje. Tyto jevy mohou být významné zejména u lepeného lamelového dřeva z listnatých dřevin, kde je kvalita lepení ovlivněna vyšší hustotou materiálu, strukturou dřeva, obsahem extraktivních látek a povrchovou úpravou lamel. Z tohoto důvodu je nezbytné věnovat pozornost nejen únosnosti samotného dřevěného prvku, ale také stabilitě a spolehlivosti lepeného spoje v podmínkách zvýšené teploty.

2 HYPOTÉZY A CÍLE PRÁCE

Práce je založená na následujících vědeckých hypotézách:

1. Navrhnutý systém lepidla je z hlediska termomechanických vlastností vhodný pro lepení konstrukčního lamelového dřeva dubu.
2. Navrhnutý systém lepení pro lepené lamelové dřevo dubu splňuje požadavky na požární odolnost dle relevantních norem.
3. Sestavený teoretický model na ověření charakteristik chování konstrukčního prvku lepeného lamelového dřeva dubu v závislosti na teplotě vhodně aproximuje experimentálně naměřené hodnoty.

Z hypotéz vychází následující hlavní cíl práce:

Základním cílem práce je výzkum chování lepidel při působení zvýšených teplot iniciovaných hořením a interakce těchto lepidel s povrchem dřeva dubu pro lepení konstrukčního lepeného lamelového dřeva dubu při splnění požadavků na požární odolnost. Cíle budou naplněny vývojem systému lepení dřeva dubu, realizací testů stanovení požární odolnosti u nosných konstrukčních prvků lepeného lamelového dřeva dubu dle relevantních norem, a sestavení teoretického modelu pro ověření charakteristik chování konstrukčního prvku v závislosti na teplotě iniciované požárem.

Díličními cíli práce jsou:

1. Stanovit a porovnat vliv vybraných chemických modifikačních prostředků na adhezi povrchu dřeva dubu v interakci s lepidly.
2. Stanovit a porovnat charakteristiky chování vybraných konstrukčních lepidel pro lepení dřeva dubu v inkriminovaných teplotních rozsazích.
3. Stanovit optimalizovaný systém pro lepení konstrukčního lamelového dřeva dubu v kontextu požadavků na požární odolnost.
4. Realizovat zkoušky požární odolnosti na konstrukčních prvcích lepeného lamelového dřeva dubu dle relevantních norem.
5. Sestavit teoretický model pro ověření charakteristik chování konstrukčního prvku lepeného lamelového dřeva dubu v závislosti na teplotě pro ověření experimentálně realizovaných zkoušek.

3 LITERÁRNÍ PŘEHLED

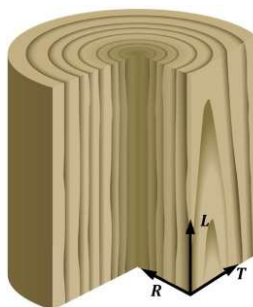
Obsahem této kapitoly je současný stav poznání v oblastech výroby konstrukčních materiálů na bázi dřeva a jeho využití v nosných konstrukcích. Pozornost je věnována zejména vlastnostem dubového dřeva, technologii lepení, typům používaných adheziv, mechanickému chování lepených spojů a vlivu zvýšených teplot na jejich pevnostní charakteristiky. Součástí přehledu je také rozbor, termického zatěžování dřevěných materiálů a základních principů požární odolnosti lepených konstrukčních prvků.

3.1 Stavba dřeva a jeho vlastnosti

Pro dobré porozumění vlastnostem dřeva je třeba ovládat problematiku struktury a anatomie dřeva. Dřevo je známé jako organický materiál rostlinného původu. Z biologického hlediska jde o soubor rostlinných pletiv s převážně zdřevnatělou buněčnou stěnou jednotlivých buněk. Převážná část buněk, které dřevo utváří, má podlouhlý charakter a jsou orientovány rovnoběžně s podélnou osou kmene, což naznačuje, že samotný vzhled dřeva bude ovlivněn řezným úhlem, který bude sevřen s axiální osou kmene. S tím jsou také spojeny vlastnosti dřeva, protože dřevo je anizotropní, hygroskopický, heterogenní a pórovitý materiál s velkou variabilitou vlastností.

3.1.1 Makroskopické znaky dřeva

V dřevařské praxi je zavedena určitá terminologie. Základem je rozlišování tří základních řezů: příčný (P), radiální (R) a tangenciální (T). Příčný řez je veden rovinou, která je ortogonální k podélné ose kmene. Radiální řez prochází rovinou kmene rovnoběžně s podélnou osou kmene, zatímco tato rovina vede zmiňovanou osou. Oproti tomu u tangenciálního řezu rovina není vedena



Obr. 1 Řezy a směry ve dřevě (Castanié et al., 2024)

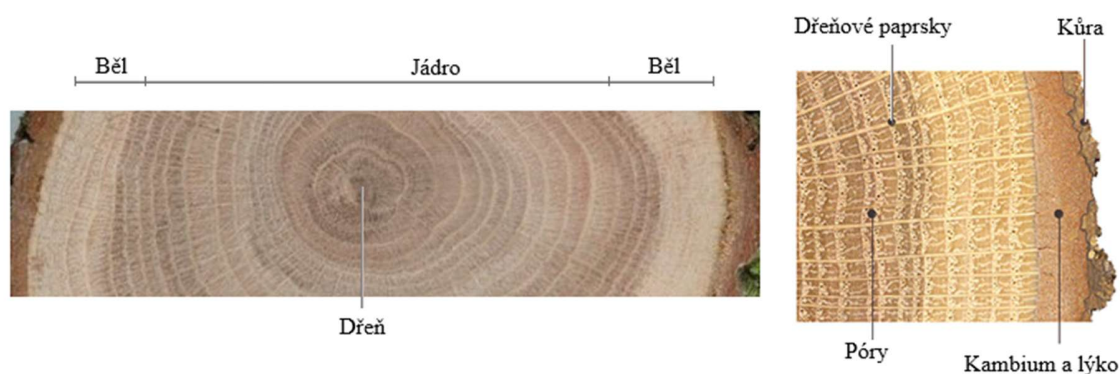
osou kmene, jedná se tedy z o tečnu k jednomu z letokruhu z pohledu příčného řezu (Požgaj et al., 1993).

Dřevo kvůli tvaru, postavení a velikosti buněk, s ohledem na podíl jarního a letního dřeva, vykazuje anizotropní charakter, jinými slovy rozdílné vlastnosti u dřevěných materiálů a materiálů na bázi dřeva v závislosti procházejícím směru. Jsou rozlišovány tři základní směry (obrázek 1): Axiální (L), Radiální (R) a Tangenciální (T). Axiální neboli podélný směr, je veden rovnoběžně s osou kmene, radiální směr zas probíhá v kolmé rovině k letokruhům a tangenciální směr se vyznačuje tečným směrem k letokruhům.

V makroskopickém měřítku se dřevo skládá z několika prvků, jako je: jádro, běl, letokruhy (jarní a letní část), zralé dřevo, dřeňové paprsky, pryskyřičné kanálky, cévy, suky a doplňkové makroskopické znaky. Jsou to tedy znaky, které jsou patrné pouhým okem, popřípadě lupou či digitálním mikroskopem a jsou charakteristické pro jednotlivé dřeviny.

3.1.2.1 Makroskopické znaky dřeva dubu

Dřevo dubu je ceněno pro svou výraznou kresbu, dobré mechanické vlastnosti a přirozenou trvanlivost. Lze ho použít v mnoha odvětvích, např. ve stavebnictví, nábytkářství, truhlářství, bednářství a sudařství, podlahářství a v dýhárenském průmyslu. Toto dřevo je i z historického pohledu uznávané jako materiál s širokým použitím, a to díky své estetické hodnotě a pevnosti a přirozené trvanlivosti (Chuteira, 2012; Chuteira & Grao, 2013). Právě pochopení samotných vlastností dubového dřeva je zásadní pro jeho správné použití. Struktura dubového dřeva se skládá z různých typů buněk, které jsou složitější než struktura dřeva jehličnanů (Farmer, 1981).



Obr. 2 Příčný řez kmene, s popisky jednotlivé struktury (Stockist, 2026)

Dubové dřevo se řadí mezi listnaté kruhovitě pórovité dřeviny a je charakteristické svou kresbou, žlutohnědým až tmavě hnědým jádrem a úzkou, světle hnědou bělí. V případě, že je vystaveno delšímu kontaktu s vodou, dochází k jeho tmavnutí a je-li ve vodě uloženo, zcela zčerná (Dzurenda, 2018). Jedná se o těžké, tvrdé, husté, velmi pevné, pružné a relativně dobře štípatelné dřevo (Balabán, 1955; Wagenführ, 2006).

Jak je možné vidět na obrázku 2, tak dubové dřevo má krásně rozlišené jádro a běl s charakteristickou kruhovitě pórovitou stavbou a zřetelně viditelnou hranici mezi letokruhy. Cévy (tracheje) v jarním dřevě jsou patrné jako malé otvory s kruhovitým průřezem na transverzálním řezu a v podélných řezech jako malé trhliny (Carlquist, 2013). Velký počet dřeňových paprsků je viditelný na příčném řezu, kde vybíhají kolmo k letokruhům jako světlé tenké paprsky. Tangenciální řez prezentuje dřeňové paprsky jako 7 cm dlouhé pruhy, kdežto radiální řez jako tzv. zrcátka o různých velikostech (Grosser & Teetz, 1998; Kobayashi, 2019).

3.1.3 Mikroskopická stavba dřeva

Dřevo spadá do velké skupiny mnohobuněčných rostlin. Právě buňky, které ho tvoří se často odlišují (tvarem, stářím, umístěním, fyziologickou funkcí). Jakmile dojde k oddělení mateřské buňky kambiální iniciálou či jejího derivátu, nastává složitý proces diferenciací buňky na určitý anatomický element dřeva (cévy, tracheidy, libriformní vlákna aj.). Diferenciace se skládá ze třech základních kroků, kdy v prvním se utváří tvar daného elementu a velikost, přičemž buněčná stěna je tvořena ze střední lamely a primární stěny za účasti cytoplazmy. Při druhém kroku vznikají jednotlivé vrstvy sekundární buněčné stěny, přičemž buňky stále obsahují cytoplazmu. Třetí krok přináší proces lignifikace buněčné stěny, vyčerpává se cytoplazma a buňky prakticky odumírají, až na buňky parenchymatické, jež si po určitou dobu ponechají buněčný obsah (Gandelová et al., 2009).

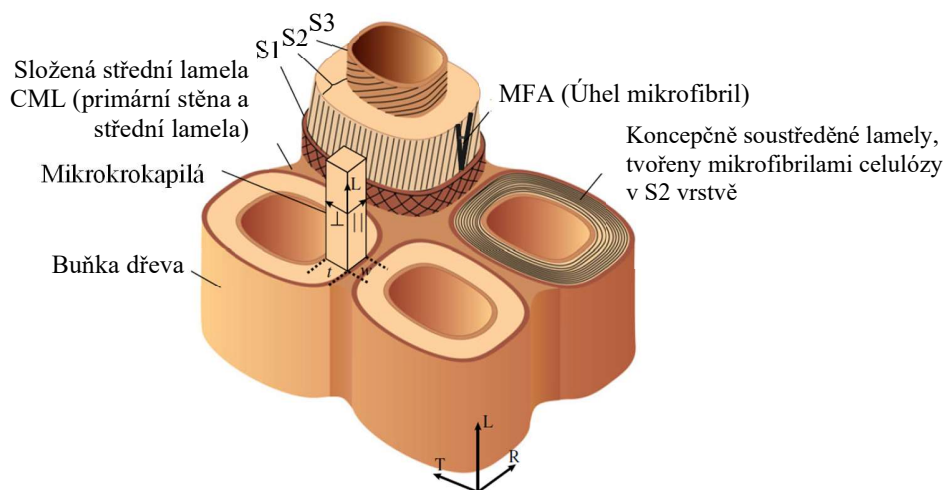
Lze konstatovat, že jehličnaté dřevo má povahu jednodušší struktury než listnaté dřevo, a to proto, že se skládá z omezeného počtu jednotného typu buněk. Oproti tomu listnaté dřevo se obvykle skládá z větší počtu těchto axiálních typů buněk s mnohem rozsáhlejší buněčnou morfologií.

3.1.4.1 Mikroskopická stavba dřeva dubu

Dřevo dubu je specifické značným počtem velkých cév s jednoduchou nebo mřížovitou perforací o hladkých a hustě tečkovaných stěnách. Výskyt cév ve dřevě je různý, lze je pozorovat jako samostatné cévy, nebo jako seskupení 2 až 4 cév (Grosser, 1977). Tracheje letního dřeva o průměru 0,01 – 0,05 mm se zužují až na 20 μm tangenciálního průměru, při sestavení v radiálních řadách, u kterých dochází ke střídání s pruhy libriformních vláken a dřevního parenchymu. Cévy jarního dřeva, které jsou složeny z cévních článků s jednoduchou perforací mají průměr lumenu 0,1 až 0,4 mm a v lumenech je evidován častý výskyt thyl (Ehmcke et al., 2014). Z celkového objemu dubového dřeva se podíl cév pohybuje v rozsahu od 7 do 40 % v závislosti na šířce ročních letokruhů. Elementární pletivo, mimo letní cévy, je složeno z libriformních vláken a dřevního parenchymu a hojně zastoupení vláknitých tracheid. Podíl dřevních vláken na celkovém objemu dubového dřeva je 40 až 60 % (Požgaj et al., 1993).

3.1.5 Submikroskopická stavba

Dle výše uvedeného je patrné, že u dřeva převládá tzv. odumřelá část, respektive část z odumřelých anatomických elementů, tedy z buněčných stěn a lumenů. Buňky dřeva, konkrétně



Obr. 3 Schéma vrstvy buněčné stěny v buněčné struktuře dřeva (Rafsanjani et al., 2014)

buněčné stěny propůjčují dřevu většinu vlastností. Buněčná stěna (obrázek 3) disponuje velmi pravidelnou strukturou a je složena ze třech hlavních oblastí: střední lamely (ML), primární stěny

(P) a sekundární stěny (S_1 , S_2 , S_3) (Panishin & Zeeew, 1980). Střední lamela (ML) spojuje jednotlivé buňky k sobě, má vysoký obsah ligninu a z mechanického hlediska ovlivňuje soudržnost pletiva, a to hlavně při tahu kolmo na vlákna. Primární stěna (P) je strukturálně odlišená od střední lamely. Po chemické stránce se skládá z celulózy, hemicelulózy a pektinů, jež podporují flexibilitu primární stěny při růstu buňky. Obsah ligninu je v této vrstvě velmi nízký až zanedbatelný (Veytsman & Cosgrove, 1998). Vyznačuje se převážně náhodnou orientací celulózových mikrofibril, jakožto dlouhých, tenkých celulózových vláken, které jsou orientované v různých úhlech od 0 do 90° a umožňuje expanzi a tvarování buňky způsobenou růstem. Další vrstva buněčné stěny je sekundární vrstva, jenž je rozdělená do tří vrstev S_1 , S_2 , S_3 . Je tou nejdůležitější částí, která určuje vlastnosti buňky a tím i vlastnosti dřeva. Tloušťka sekundární buněčné stěny je výrazně větší než u primární a dělí se na tři vrstvy: S_1 – vnější vrstva s úhlem orientace mikrofibril 50–70°, S_2 – střední vrstva s úhlem orientace mikrofibril 5–30° a S_3 – vnitřní vrstva s úhlem orientace 60–90°. Samotný rozdíl mezi jednotlivými vrstvami je tedy úhel orientace, respektive orientace mikrofibril s podélnou osou buňky (Sjöström, 1993; Ek et al., 2009). Po této vrstvě přichází na řadu lumen, což je prázdný prostor, který neovlivňuje vlastnosti dřeva. K celkovému pochopení jsou na obrázku 3 vyobrazeny jednotlivé části buněčné stěny (Gierlinger et al., 2012).

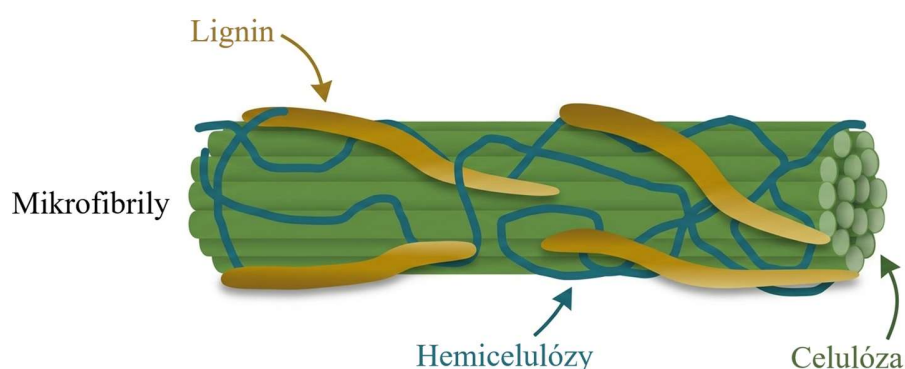
3.1.6 Chemické složení dřeva

Jedná se o přírodní materiál, který představuje složitý komplex makromolekulárních látek, jehož hlavními složkami jsou organické látky: uhlík (49,5 %), kyslík (44,2 %), vodík (6,3 %) a dusík (do 1 %), ze kterých jsou pak utvořeny složité organické látky dělicí se na: celulózu, hemicelulózu a lignin, dále pak na průvodní látky, jež jsou obsaženy v buněčných dutinách ve formě extraktivních látek (sacharidů, glykosidů, tuků, proteinů, barviv atd.) (Sjöström, 1993; Wyman, 2007; Lynd et al., 2008; Langan et al., 2014; Zhang et al., 2022).

Hlavní složku dřeva tedy tvoří převážně cukerné polymery: celulóza je zastoupena ze 40–45 %, je to základní látka buněčné stěny, z chemického pohledu polysacharid, vzniklý řetězením molekul glukózy (β -D-glukopyranózy). Makromolekula celulózy je spojena do pravidelných svazků zvaných mikrofibrily (obrázek 4), následně spojeny na šířku do větších útvarů nazvaných fibrily. Toto propojení vytváří tvar sítě (Loader et al.,

2003; Le Floch et al., 2015). Hemicelulózy jsou zastoupeny z 20–30 % a patří rovněž k polysacharidům, chemické složení je velice blízké celulóze, avšak s kratším řetězcem makromolekul s průměrným polymeračním stupněm 150 až 250. Jsou chemicky méně stálé a snadno se ze dřeva hydrolyzují (O'Dwyer, 1939). Tyto sacharidové struktury jsou dále propojeny s ligninem, jehož podíl se pohybuje mezi 18–35 %. Jedná se o aromatický podíl dřeva, tvoří přibližně pětinu až třetinu sušiny dřeva, mechanicky zpevňuje buněčnou stěnu, obsahuje fenolickou složku a omezuje bobtnání (Hrčka, 2018).

Minoritní složkou dřeva jsou anorganické látky, zejména minerální sloučeniny přítomné pouze v malém množství. Patří mezi ně soli draslíku, křemíku, sodíku, vápníku, manganu, hořčíku, hliníku a železa, které při spalování vytvářejí popel (Sun & Sun, 2002). Další skupinu tvoří extraktivní látky neboli sekundární metabolity obsažené ve dřevě a kůře, mezi které patří třísloviny, flavonoidy, lignany, stilbeny, vosky, cukry a terpenoidy. U dubového dřeva mají významné zastoupení zejména třísloviny neboli taniny, které ovlivňují kyselost, smáčivost a chemickou reaktivitu povrchu, a mohou proto nepříznivě působit na vytvrzování některých adhesiv a kvalitu lepeného spoje. Terpenoidy zahrnují acyklické a cyklické uhlovodíky i jejich oxidované deriváty, například alkoholy, aldehydy, ketony a karboxylové kyseliny. Přírodní směsi těchto látek rostlinného původu se označují jako silice nebo éterické oleje (Sjöström & Alén, 2013).



Obr. 4 Schématické znázornění struktury hlavních složek dřeva (Morena & Tzanov, 2022).

3.2 Vybrané fyzikální vlastnosti dřeva

Pochopením anatomické a chemické struktury lze konstatovat, že dřevo řadíme do skupiny anizotropních materiálů, tzn. že fyzikální vlastnosti závisí na směru, ve kterém jsou měřeny. Dle výše uvedeného je patrné, že dřevo není homogenní materiál a některé vady mohou přímo ovlivňovat jeho fyzikální vlastnosti (Požgaj et al., 1993). Dřevo dubu letního (*Quercus robur* L.) se prezentuje vysokou hustotou, velkou tvrdostí, houževnatostí, a je dlouhodobě trvanlivé, a to zejména pod vodou či na suchu. Jak výše bylo uvedeno disponuje výraznou strukturou a obsahuje vysoké množství tříslovin, tedy velice dobře odolává povětrnostním vlivům (Santos et al., 2012).

3.2.1 Hustota dřeva

Jako jedna z hlavních fyzikálních vlastností dřeva je považována hustota / objemová hmotnost ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) vzorku materiálu, za předem specifikovaných podmínek (vlhkost, stlačení, objem 1 m^3) je definovaná vztahem dle ČSN 49 0108 (1993):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

kde m hmotnost vzorku materiálu opět ve specifikovaných podmínkách (kg),
 V objem vzorku materiálu (m^3).

Druhy dřevin je možné dělit dle jejich hustoty, avšak toto dělení se může v dostupných literaturách lišit, a to hlavně v rozsahu hustot, do kterých jsou jednotlivé druhy dřevin zařazeny. Dle Čunderlíka (2009) jsou dřeviny děleny dle hustoty suchého dřeva následovně:

- velmi lehké ($<400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) např.: topol,
- lehké ($400\text{--}500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) např.: jedle, smrk, borovice,
- mírně těžké ($500\text{--}600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) např.: vrba, javor, modřín,
- středně těžké ($600\text{--}700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) např.: jilm, **dub**, buk, jasan
- těžké ($>700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) např.: habr, akát.

Na základě odlišných charakteristik poměrových veličin lze rozlišovat několik typů hustoty. U dřeva se zpravidla uvádí hustota dřevní substance, hustota dřeva a redukovaná hustota dřeva (Matovič, 1993).

V zahraniční literatuře je dub klasifikován jako zástupce skupiny listnatých dřevin (hardwoods), která je obecně charakterizována vyšší objemovou hmotností a zpravidla i vyššími mechanickými parametry ve srovnání s jehličnatými dřevinami. Toto zařazení vychází z anatomické struktury dřeva, zejména z vyššího podílu vláknitých buněk a komplexnějšího uspořádání pletiv, což se přímo odráží v jeho fyzikálních a mechanických vlastnostech. Objemová hmotnost dubového dřeva je závislá na obsahu vlhkosti. Při referenční vlhkosti 12 % se obvykle pohybuje přibližně v rozmezí $650\text{--}800\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Vzhledem k silné korelaci mezi objemovou hmotností a ostatními fyzikálními i mechanickými charakteristikami je tato veličina považována za tzv. vůdčí parametr dřeva, neboť významně ovlivňuje jeho pevnost, tuhost, tepelně-technické vlastnosti i chování při zvýšených teplotách (Desch & Dinwoodie, 1996; Kaplan et al., 2018). Závislost mezi hustotou dřeva a mechanickými vlastnostmi je složitá, neboť pevnost dřeva závisí na množství dřevní hmoty v jednotce objemu, ale také na stavbě dřeva, avšak některé hodnoty testů ukazují jasné korelace. Například modul pružnosti E při tlakovém působení ve směru podél vláken či reologické konstanty s hustotou dřeva mají kladný lineární vztah (Marela & Čufar, 2013; Uzcategui et al., 2020).

3.2.2 Vlhkost dřeva

Další významná fyzikální vlastnost je vlhkost dřeva w (%), kdy se jedná o poměr hmotnosti vody k hmotnosti sušiny dřevní hmoty, pokud je vyjadřována vlhkost absolutní w_{abs} , či k hmotnosti mokrého dřeva, pak se jedná o vlhkost relativní w_{rel} . Vlhkost dřeva se stanovuje vztahem:

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (2)$$

$$w_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 \quad (3)$$

kde m_w hmotnost vzorku materiálu ve vlhkém stavu (kg),
 m_0 hmotnost vzorku materiálu ve vysušeném stavu (po vysušení při teplotě $103 \pm 2\text{ °C}$) (kg).

Jelikož je dřevo hygroskopický materiál, tedy materiál přijímající vlhkost z okolního prostředí, tak z hlediska použitelnosti je vlhkosti rozhodující vlastnost. Obsah vody ve dřevě ovlivní, zda tvar a rozměry materiálu zůstanou neměnné či dojde ke změně. Pokud by došlo k nedodržení základních vztahů dřevo/voda, mohlo by dojít nejen k narušení vzhledu a funkčnímu použití daného výrobku, ale i k znehodnocení výrobku ze dřeva. Glass & Zelinka (2021) se ve své studii věnují vztahu dřevem a vodou a popisují, kdy a jak obsah vlhkosti ovlivňuje rozměry, mechanické vlastnosti, tepelnou vodivost a jiné, a uvádí, jak s vlhkostí ve dřevě pracovat. Podobný výzkum zkoumající účinky obsahu vlhkosti na mechanické vlastnosti dubového dřeva vedli Korkmaz & Büyüksarı (2019). Z jejich výsledků vyplývá, že vlhkost měla statisticky významný negativní vliv na všechny měřené mechanické vlastnosti dubového dřeva, přičemž největší pokles byl prokázán u pevnosti v tlaku. Güntekin & Aydin (2013) taktéž potvrdili vliv zvyšující se vlhkosti na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a nastínili procentuální hodnoty vlhkostního stavu.

3.2.3 Tepelné vlastnosti dřeva

Tepelné vlastnosti dřeva jsou důležité pro mnohé inženýrské a stavební aplikace, a to od konstrukcí po požární bezpečnost či samotné zpracování dřeva. Níže je uveden výčet hlavních veličin.

Teplotní roztažnost

U těles způsobuje zvyšování teploty rychlejší pohyb molekul, a tím i zvyšování jeho energie, která má za následek změny rozměrů. Tzv. teplotní roztažnost je charakterizována koeficientem teplotní roztažnosti α_i ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), jenž je definován podílem změny nového rozměru a rozměru původního při lineární závislosti na teplotě. Veličina je definována rovnicí:

$$\alpha_i = \frac{l_T - l_0}{l_0 \cdot \Delta T} \quad (4)$$

kde l_0 počáteční rozměr (m),
 l_T rozměr po změně teploty ΔT (m).

Tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita c ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) představuje materiálový parametr, jenž udává množství energie potřebné ke zvýšení teploty jednotkové hmotnosti (1 kg) dřeva o 1 K; je dán vztahem:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (5)$$

kde Q množství tepla (J),
 m hmotnost tělesa (kg),
 ΔT rozdíl teplot (K).

Měrná tepelná kapacita dřeva je ovlivněna především teplotou a vlhkostí, zatímco vliv hustoty a druhu dřeva je ve srovnání s těmito faktory méně výrazný.

Přenos tepla je fyzikální proces závislý na vlastnostech prostředí a na mechanismech popsaných příslušnými fyzikálními zákony. Ve dřevě se mohou vyskytnout všechny tři základní druhy přenosu tepla. V závislosti na uvedených faktorech rozlišujeme tři základní formy přenosu tepla (Horáček, 1998; ČSN 73 0540-1, 2005; Drysdale, 2011):

- Vedení (kondukce),
- Proudění (konvekce),
- Sálání (radiace).

Vedení (kondukce) tepla

K přenosu tepla vedením (kondukcí) dochází převážně v pevných látkách, kde se tepelná energie šíří prostřednictvím mikroskopických interakcí částic bez makroskopického pohybu hmoty (Hahn & Özisik, 2012). V případě dřeva je nutné zohlednit jeho anizotropní a heterogenní charakter. Tepelná vodivost se liší ve směru podél vláken a napříč vláknům a její hodnota je ovlivněna hustotou, obsahem vlhkosti a teplotou.

Přenos tepla vedením je popsán zákony formulovanými J. Fourierem, konkrétně prvním a druhým Fourierovým zákonem. První Fourierův zákon vyjadřuje závislost hustoty tepelného toku na teplotním gradientu a předpokládá ustálené teplotní pole v homogenním, izotropním prostředí. Vztah lze zapsat ve tvaru (Fourier, 1822):

$$\vec{q} = -grad\ T = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (6)$$

kde $grad\ T$ teplotní spád ($K \cdot m^{-1}$),
 $\vec{q}$ vektor hustota tepelného toku ($W \cdot m^{-2}$),
 λ součinitel tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).

Záporné znaménko vyjadřuje, že teplo se šíří z oblastí vyšší teploty do oblastí nižší teploty.

V praxi stavební tepelné techniky se první Fourierův zákon často používá také v integrálním tvaru pro ustálené jednorozměrné vedení tepla rovinnou vrstvou tloušťky. Tento tvar vyjadřuje vztah mezi tepelným tokem, teplotním rozdílem a tloušťkou vrstvy:

$$\frac{Q}{S \cdot t} = \lambda \cdot \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (6a)$$

kde $T_2 - T_1$ teplotní rozdíl (K),
 t čas (s),
 S plocha kolmá ke směru šíření tepla (m^2),
 Q množství přeneseného tepla (J),
 $x_2 - x_1$ tloušťka vrstvy (m),
 λ součinitel tepelné vodivosti ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$).

U vrstvených materiálů, mezi které lze zařadit také některé konstrukční výrobky ze dřeva, není výsledná tepelná vodivost určena pouze vlastnostmi samotného dřeva, ale také skladbou jednotlivých vrstev a směrem tepelného toku. Hrčka & Babiak (2017) uvádějí, že dřevo je z hlediska tepelných vlastností ortotropní materiál, jehož součinitel tepelné vodivosti závisí na anatomickém směru, tedy zejména na směru podél vláken a napříč vláknům. U vrstvených dřevěných materiálů se proto uplatňuje nejen přirozená anizotropie dřeva, ale také vliv uspořádání jednotlivých vrstev.

Při vedení tepla kolmo na vrstvy se jednotlivé vrstvy chovají jako tepelné odpory zapojené v sérii. Výsledný, resp. ekvivalentní, součinitel tepelné vodivosti kolmo na vrstvy $\lambda_{\perp}$ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) lze v tomto případě vyjádřit vztahem:

$$\lambda_{\perp} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}} \quad (7)$$

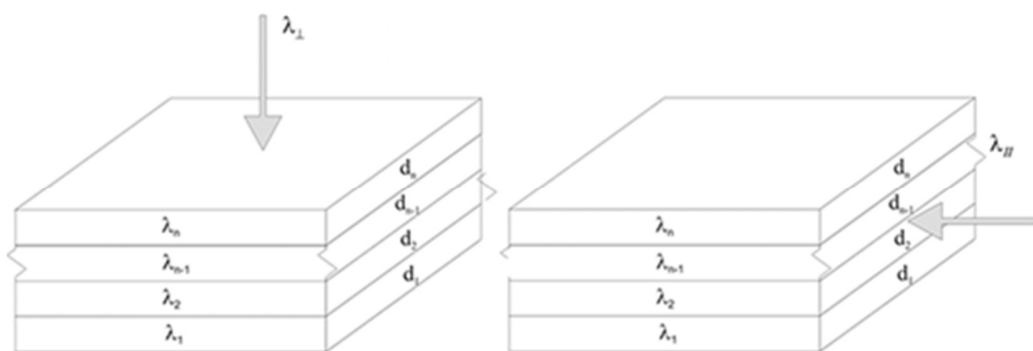
kde d_i tloušťka i -té vrstvy (m),
 n počet vrstev,
 λ_i součinitel tepelné vodivosti i -té vrstvy ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Při vedení tepla rovnoběžně s vrstvami se jednotlivé vrstvy naopak uvažují jako paralelně uspořádané vodivé cesty. Ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti rovnoběžně s vrstvami je potom možné stanovit podle vztahu:

$$\lambda_{\parallel} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (8)$$

kde d_i tloušťka i -té vrstvy (m),
 n počet vrstev,
 λ_i součinitel tepelné vodivosti i -té vrstvy ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Z uvedených vztahů vyplývá, že stejný vrstvený materiál může vykazovat rozdílnou tepelnou vodivost v závislosti na směru působení teplotního gradientu (obrázek 5).



Obr. 5 Základní vzor vrstev tepelného toku v kompozitní stěně během vedení (Hrčka & Babiak, 2017)

Tento princip je důležitý zejména při popisu šíření tepla v lepeném lamelovém dřevě a dalších vrstvených dřevěných kompozitech, kde může být průběh teplotního pole ovlivněn jak směrem vláken, tak orientací a tloušťkou jednotlivých vrstev. Při hodnocení chování dřeva za zvýšených teplot je proto nutné pracovat s efektivními tepelnými vlastnostmi odpovídajícími skutečné skladbě materiálu a směru tepelného toku (Hrčka & Babiak, 2017).

Pro obecný případ trojrozměrného teplotního pole v ustáleném stavu bez vnitřních zdrojů tepla lze vedení tepla vyjádřit diferenciální rovnicí:

$$0 = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (9)$$

Vzhledem k tomu, že u dřeva je tepelná vodivost směrově, teplotně i vlhkostně závislá, je vyžadován přesný popis vedení tepla a zohlednění anizotropních a teplotně proměnných materiálových parametrů.

Na rozdíl od ustáleného stavu, kdy se rozložení teploty v čase nemění, popisuje druhý Fourierův zákon neustálené (časově proměnné) teplotní pole. Jeho obecná formulace vyjadřuje vztah mezi časovou změnou teploty a jejími prostorovými změnami v trojrozměrném prostoru (Fourier, 1822):

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (10)$$

kde T teplota (°C),
 t čas (s),
 x, y, z kartézský souřadnicový systém,
 λ součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),
 ρ objemová hmotnost materiálu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
 c měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Rovnice vedení tepla pro ustálený stav představuje speciální případ druhého Fourierova zákona, kdy se zanedbá časová závislost teplotního pole:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

Pro homogenní materiál s konstantními tepelnými vlastnostmi lze druhý Fourierův zákon zjednodušit zavedením součinitele teplotní vodivosti a , který vyjadřuje schopnost materiálu reagovat na změnu teplotních podmínek. Tento parametr je definován vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (12)$$

kde λ součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),
 ρ objemová hmotnost materiálu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
 c měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Opět je důležité uvědomění, že hodnotu a je ovlivněna hustotou, vlhkostí a teplotou a taktéž může být směrově závislá, což je nutné zohlednit při popisu šíření tepla za zvýšených teplot.

Proudění (konvekce) tepla

K přenosu tepla prouděním (konvekci) dochází v kapalných a plynných látkách, kde je teplo přenášeno současně vedením a makroskopickým pohybem tekutiny.

Rozlišuje se proudění přirozené (volné), které vzniká v důsledku rozdílů hustoty způsobených teplotními změnami, a proudění vynucené, které je vyvoláno vnějšími účinky, například prouděním spalín při hoření nebo nuceným pohybem vzduchu (Moreira et al., 2019; Naterer, 2021).

Intenzita přestupu tepla konvekci je ovlivněna vlastnostmi tekutiny, charakterem proudění, geometrií prostoru a velikostí teplotního rozdílu mezi povrchem tělesa a okolím. V technické praxi jsou tyto vlivy zahrnuty do součinitele přestupu tepla h , který vystupuje v Newtonově zákoně ochlazování:

$$q_{conv} = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (13)$$

kde q_{conv} hustota tepelného toku při proudění ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$),
 h součinitel přestupu tepla ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$),
 T_s teplota povrchu pevné látky ($^{\circ}\text{C}$),
 T_∞ teplota okolní tekutiny ($^{\circ}\text{C}$).

Sálání (radiace) tepla

Šíření tepla sáláním (radiací) představuje přenos energie prostřednictvím elektromagnetického záření, zejména v oblasti infračerveného spektra. Každé těleso o teplotě vyšší než 0 K vyzařuje tepelnou energii, přičemž intenzita vyzařování závisí na jeho teplotě

a povrchových vlastnostech (Modest & Mazumder, 2021). Celkový sálavý tok dopadající na povrch materiálu se rozděluje na pohlcenou, odraženou a prošlou složku (Naterer, 2021):

$$\varphi_S = \varphi_A + \varphi_R + \varphi_T \quad (14)$$

kde φ_S celkový sálavý tok dopadající na povrch materiálu (W),
 φ_A část energie pohlcená (absorbovaná) povrchem materiálu (W),
 φ_R část energie odražená povrchem materiálu (W),
 φ_T část energie procházející (transmitovaná) povrchem materiálu (W).

Po vydělení celé rovnice dopadajícím sálavým tokem φ_S získáme bezrozměrný vztah ve tvaru:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (15)$$

kde α absorptivita,
 ρ odrazivost,
 τ transmitace (propustnost) materiálu.

Uvedený vztah (15) vyjadřuje energetickou bilanci záření na rozhraní prostředí a materiálu. Jinými slovy, veškeré dopadající záření musí být buď absorbováno, odraženo, nebo materiálem propuštěno, žádná část energie nemůže „zmizet“. V případě dřeva, které je z hlediska tepelného záření neprůsvitné, je transmitovaná složka zanedbatelná ($\varphi_T \approx 0$), takže vztah se zjednodušuje na:

$$\varphi_S = \varphi_A + \varphi_R \quad (16)$$

Z tohoto vyplývá, že velikost pohlcené složky přímo ovlivňuje nárůst teploty povrchu dřeva, a tím i následné šíření tepla do jeho objemu vedením (Bergman, 2011).

Stefan–Boltzmannův zákon popisuje intenzitu tepelného záření vyzařovaného povrchem tělesa v závislosti na jeho absolutní teplotě. Podle tohoto zákona je hustota vyzařovaného tepelného toku q_{rad} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) úměrná čtvrté mocnině teploty tělesa, přičemž skutečné materiály vyzařují méně než ideální černé těleso, což je vyjádřeno emisivitou povrchu (Incropera et al., 2011). Matematicky lze vztah zapsat ve tvaru:

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (17)$$

kde ε emisivita (-),
 σ Stefanova – Boltzmanova konstanta (přibližně $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$),
 T_∞ teplota okolní tekutiny (K),
 T_s teplota povrchu materiálu (K).

3.3 Vybrané mechanické vlastnosti dřeva

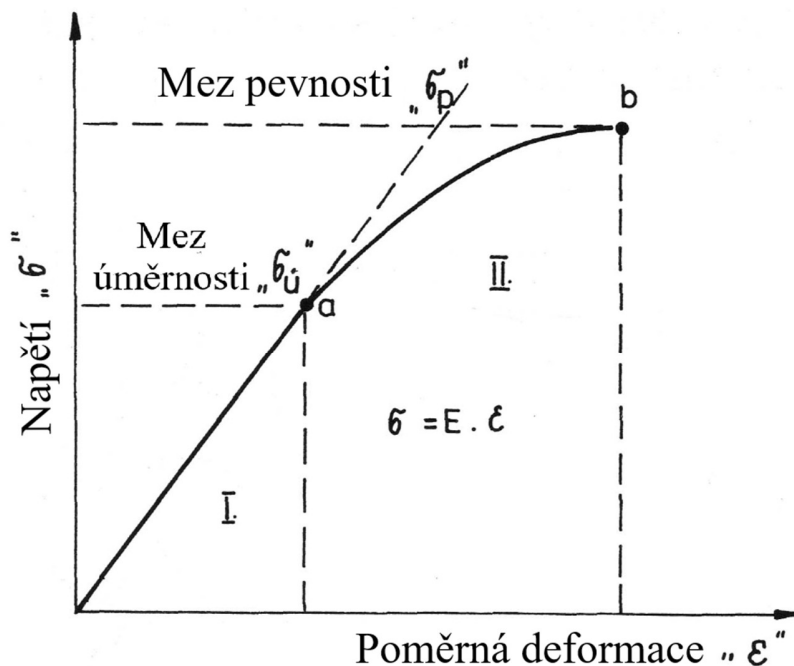
Do skupiny vybraných mechanických vlastností patří zejména pružnost a pevnost. Hlavní výhodou dřeva je, že při relativně nízké hmotnosti vykazuje velice dobrou pevnost. Mechanické vlastnosti se dělí do dvou skupin, a to na základní a odvozené. Do skupiny základních mechanických vlastností jsou zařazeny: pevnost, pružnost, plastičnost, houževnatost a do skupiny odvozených pak tvrdost a další. Požgaj et al. (1993) uvádějí hodnoty mechanických vlastností v tabulce 1.

Tab. 1 Pevnostní charakteristiky vybraných dřevin (Požgaj et al., 1993)

Dřevina	Modul pružnosti při ohybu [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]		Pevnost v tlaku [MPa]		Pevnost ve smyku [MPa]
			podélná	příčná	podélná	příčná	
borovice	12 000	100	104	3	55	7,7	10
buk	16 000	123	135	7	62	9,5	8
dub	13 000	110	90	4	65	11	11
jedle	11 000	73	84	2,3	47	-	5
smrk	11 000	78	90	2,7	50	5,8	6,7

3.3.1 Pevnost dřeva

Definovat pevnost dřeva je možné jako schopnost materiálu odolávat proti porušení, jenž je způsobeno účinkem mechanického zatížení. Tato vlastnost je kvantitativně vyjádřena hodnotou napětí, při níž dochází k porušení materiálu a narušení jeho vnitřní soudržnosti. Hodnota napětí, při níž dochází k porušení materiálu, se označuje jako mez pevnosti (Šlezingerová, 1998).



Obr. 6 Obecný pracovní (napětíově – deformační) diagram (Požgaj et al., 1993)

Na obrázku 6 je uveden obecný napětíově-deformační diagram. Diagram je rozdělen na dvě části, kdy první část představuje tzv. lineární oblast deformační čáry, která končí v bodě (σ_i), jež představuje mez úměrnosti (mez pružnosti). Je-li těleso zatěžováno do meze úměrnosti a dojde-li k uvolnění působících sil, tak se těleso vrací do původního stavu, neboť vzniklé deformace jsou pružné (elastické) a nedochází k trvalým změnám, a to z důvodu rovnoměrně rozloženého napětí a deformace, jenž definuje Hookeův zákon a platí vztah (Bodig & Jayne, 1982):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (18)$$

kde σ napětí (Pa),
 E Youngův modul pružnosti (Pa),
 ε poměrná deformace (-).

Druhá část pracovního diagramu začíná nad bodem úměrnosti (σ_u) a končí na mezi pevnosti (σ_p). Tato oblast již není lineární, tzn. že při stále rostoucím napětí dochází k růstu deformace, avšak tento poměr již není v lineární shodě a dochází k lokálním změnám ve struktuře daného materiálu (Green et al., 1999; Hibbeler, 2017). Dojde-li k odstranění působících sil, deformace v oblasti nad mezí úměrnosti zcela nezaniká. V pružně-visko-plastické oblasti, tedy v části napětí-deformačního diagramu, se současně uplatňuje pružná, časově závislá viskoelastická a nevratná plastická deformace (Požgaj et al., 1993). Mechanická odezva materiálu se zde odchyluje od lineárního průběhu a deformace není již plně vratná a po uvolnění sil zůstává trvalá složka přetvoření. K následnému porušení materiálu dochází při dosažení napětí převyšujícího mez pevnosti (σ_p) (Arriaga et al., 2023).

Na molekulární úrovni jsou deformace do meze pevnosti spojeny především s namáháním sekundárních intermolekulárních vazeb, především vodíkových vazeb mezi polymerními řetězci základních složek buněčné stěny (celulózy, hemicelulóz a ligninu). Dochází k jejich postupnému narušování a přeskupování, zatímco kovalentní vazby polymerního skeletu zůstávají převážně zachovány (Pereira et al., 2003). Deformace tak probíhá především změnou prostorového uspořádání makromolekul a na submikroskopické úrovni se projevuje posunem a změnou orientace fibrilární struktury buněčné stěny bez vzniku makroskopických poruch (Stevanovic, 2016). Zatěžováním nad mez úměrnosti (σ_p) dochází k porušování vodíkových vazeb i stabilnější částí molekulární struktury, což vede k nevratným změnám polymerních řetězců a vzniku plastické deformace (Winandy & Rowell, 2005).

Zvýšená teplota tento proces významně ovlivňuje. S rostoucí teplotou dochází ke zvýšení pohyblivosti polymerních řetězců a oslabení vodíkových vazeb, což vede ke snížení tuhosti materiálu a poklesu modulu pružnosti. Dále zvýšená teplota snižuje mezní napětí, při kterém materiál přechází z pružného do plastického stavu (Hon & Shiraishi, 2000). Oslabuje se struktura buněčné stěny vlivem degradace hemicelulóz a změn ligninu a výsledkem je výraznější rozvoj visko-elastického a plastického chování, urychlení vzniku nevratných deformací a snížení meze pevnosti materiálu (Rowell, 2005).

V literatuře se vyskytuje mnoho různých pevností, které se dělí podle fyzikálních povahy veličin na:

- Konvenční pevnost – lze definovat jako maximální napětí dosažené při zatížení, vztažena k původnímu průřezu zkušebního tělesa. V případě dřeva se tento princip uplatňuje zejména při stanovení konvenční meze pevnosti v tlaku kolmo na vlákna, která je definována na základě normativně stanovených kritérií deformace.
- Ideální pevnost – představuje nejvyšší teoreticky dosažitelnou pevnost dané dřeviny za definovaných podmínek zatěžování. Tento přístup je využitelný především u homogenních materiálů, jako jsou kovy nebo polymery. U dřeva je vzhledem k jeho složité chemické skladbě a heterogenní struktuře teoretické stanovení této pevnosti značně obtížné až nereálné.
- Skutečná pevnost – tato pevnost popisuje reálný stav napětí v okamžiku selhání zkušebního tělesa. V literatuře je jako příklad často uváděno jednoosé zatížení zkušebního vzorku v tahu. Pevnost je zde definována jako poměr mezní síly k ploše příčného průřezu zkušebního tělesa:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{S} \quad (19)$$

kde σ_{max} normálové napětí (Pa),
 F_{max} síla na mezi pevnosti (N),
 S plocha (mm²).

Z hlediska konstrukčního využití dřeva je kromě samotného stanovení pevnosti důležité také její normové zařazení. V evropském prostředí je pevnostní klasifikace konstrukčního dřeva vymezena normou ČSN EN 338 (2016), která stanovuje pevnostní třídy a příslušné charakteristické hodnoty mechanických vlastností a hustoty (obrázek 7). Norma rozlišuje pevnostní třídy pro jehličnaté dřevo a topol, označované písmenem C, a pevnostní třídy pro listnaté dřevo, označované písmenem D.

Označení	Veličina	Jehličnaté a topolové dřevo												Listnaté dřevo					
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70
N/mm ²																			
$f_{m,k}$	Pevnost v ohybu	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70
$f_{t0,k}$	Pevnost v tahu rovnoběžné s vlákny	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42
$f_{t90,k}$	Pevnost v tahu kolmo k vláknům	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$f_{c0,k}$	Pevnost v tlaku rovnoběžné s vlákny	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34
$f_{c90,k}$	Pevnost v tlaku kolmo k vláknům	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
$f_{v,k}$	Pevnost ve smyku	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
kN/mm ²																			
$E_{0,mean}$	Střední hodnota modulu pružnosti rovnoběžné s vlákny	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20
$E_{0,05}$	5% kvantil modulu pružnosti rovnoběžné s vlákny	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
$E_{90,mean}$	Střední hodnota modulu pružnosti kolmo k vláknům	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47	0,50	0,64	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
G_{mean}	Střední hodnota modulu pružnosti ve smyku	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
kg/m ³																			
ρ_k	Hustota	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	590	650	700	900
ρ_{mean}	Střední hodnota hustoty	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080

Obr. 7 Třídy pevnosti a charakteristické hodnoty pro konstrukční dřevo (ČSN EN 338, 2016)

3.3.1.1 Dělení pevnosti dle způsobu a času zatížení

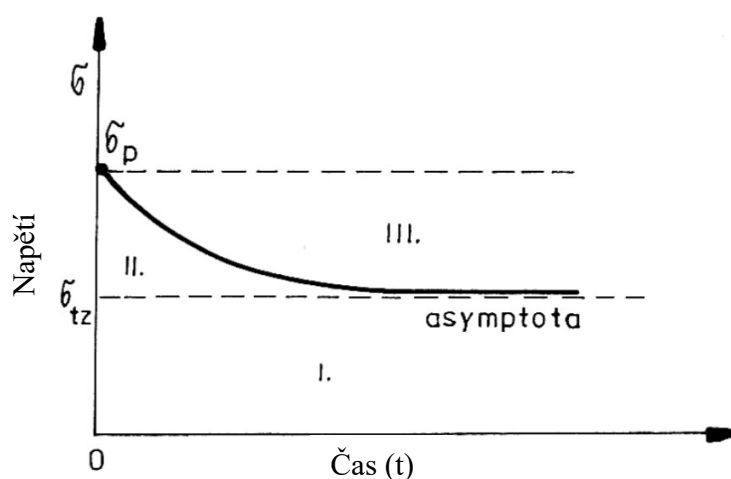
Pevnostní charakteristiky materiálu jsou výrazně ovlivněny způsobem zatěžování a dobou působení. Lze tedy tato kritéria zatížení klasifikovat jako statické, dynamické, trvalé statické a trvalé (dynamické) kmitavé. Při dynamickém zatížení je materiál vystaven náhlému působení síly plné intenzity, zpravidla v časovém intervalu milisekund.

Dynamické zatížení je charakterizováno náhlým působením síly plné intenzity v krátkém časovém intervalu, obvykle v řádu milisekund. Jeho účinek se hodnotí na základě množství vykonané (absorbované) práce, resp. energie přenesené na materiál. Vzhledem k tomu, že tato práce je zaměřena na hodnocení únosnosti nosníku při zvýšených teplotách, je pozornost soustředěna spíše na statické zatěžování.

Statické zatěžování (trvalé)

Statické zatížení má kontinuální charakter s rovnoměrně narůstající intenzitou, přičemž rychlost jeho aplikace je podstatně nižší než rychlost šíření deformace v materiálu. Materiál tak má dostatek času reagovat na působící zatížení. V odborné literatuře je doba od zahájení zatěžování do porušení tělesa uváděna různě. Obvykle se pohybuje v rozmezí přibližně 120–240 sekund (Côté & Kollmann, 1984). Při aplikaci normových postupů se však doba zatěžování může v závislosti na konkrétní zkušební metodě výrazně lišit. Například norma

ČSN 49 0115 (1979) při stanovení meze pevnosti ve statickém ohybu předepisuje čas zatěžování 90 ± 30 s. Oproti tomu ČSN EN 408+A1 (2012) doporučuje, aby maximální síly bylo dosaženo v čase 300 ± 120 s. Normy tedy zpravidla určují časový interval, ve kterém má dojít k porušení zkušebního tělesa, případně k dosažení maximální síly, nikoli přímo rychlost nárůstu napětí. V odborné literatuře se přesto objevuje doporučení, aby rychlost nárůstu napětí nepřesáhla $8,33 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$, přičemž tato hodnota je vztažena k nárůstu napětí ve zkušebním tělese. Kritériem tohoto zatěžování je zpravidla mez pevnosti (vzorec 19), jejíž překročení vede k porušení zkušebního tělesa.

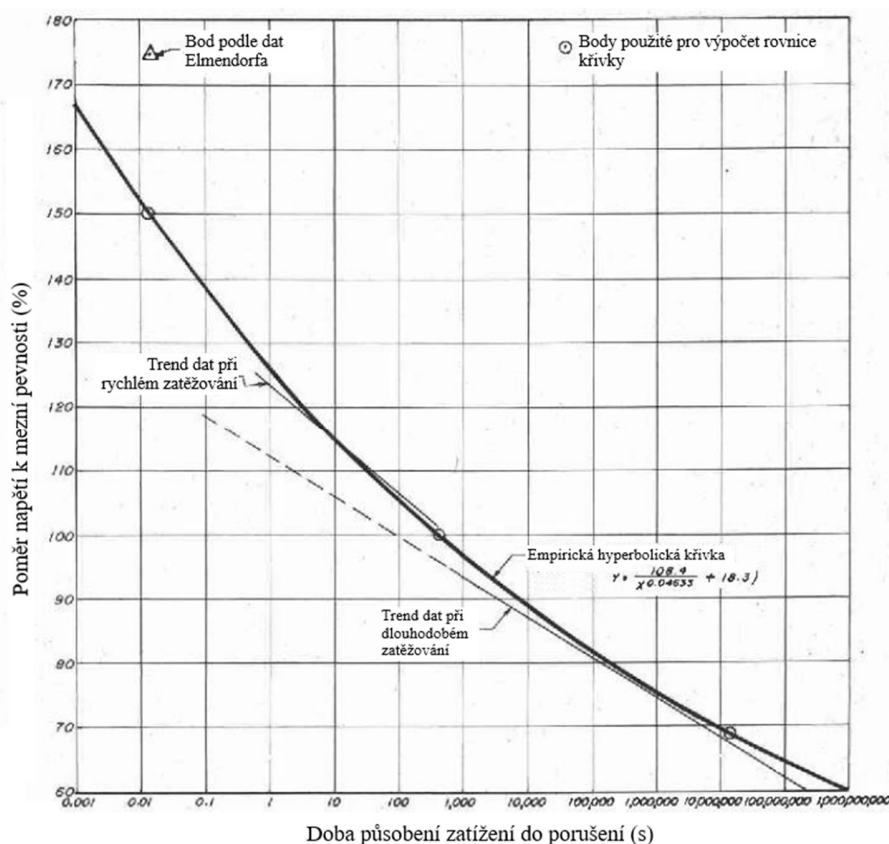


Obr. 8 Diagram trvalého zatížení (Požgaj et al., 1993)

Při trvalém statickém zatížení je únosnost materiálu, potažmo dřeva, podmíněna nejen velikostí působícího napětí, ale také délkou jeho působení. Trvalá statická pevnost tak představuje napětí, které je materiál schopen přenášet po dlouhou dobu bez porušení. Závislost pevnosti na době zatížení je vyjádřena křivkou trvalého zatížení, uvedenou na obrázku 8, která umožňuje identifikovat jednotlivé oblasti časově závislého chování materiálu (Halama et al., 2011). Z obrázku 8, převzatého z práce Požgaj et al. (1993), je patrné, že pevnost dřeva není konstantní veličinou, ale funkcí času. Z dlouhodobého hlediska je proto únosnost dřeva výrazně nižší než jeho krátkodobá pevnost. První oblast lze definovat jako oblast bezpečného dlouhodobého zatížení – nachází se ve spodní části pod asymptotou meze dlouhodobé pevnosti (σ_{tz}) a naznačuje nízké napětí, u kterého nedochází k porušení ani při dlouhé době působení. Deformace zde může postupně vznikat, ale nedochází k překročení únosnosti. Často jsou v této oblasti řešeny návrhy dřevěných

konstrukcí. Druhá oblast je ohraničena křivkou trvalého zatížení a její asymptotou σ_{tz} a definuje stav, kdy je dřevo namáháno nad svou mez trvalé pevnosti, což v této zóně predikuje postupnou degradaci vnitřní struktury materiálu a nárůst deformací (dotvarování) v čase. Třetí oblast také nazývána jako oblast krátkodobé pevnosti definuje zónu, které je primárně ovlivněna rychlostí působení vnějších sil. Napětí v této oblasti dosahuje hodnot krátkodobé meze pevnosti materiálu. (Thurston, 1881; Hoffmeyer, 2003; Wu et al., 2021).

Vztah mezi napětím a dobou trvání zatížení lze také graficky znázornit pomocí Madisonovy křivky, která vyjadřuje závislost mezi velikostí napětí a délkou jeho působení. Z konstrukčního hlediska je přitom doba zatížení významným parametrem ovlivňujícím únosnost dřevěných prvků. Právě experimentální studie dokládají, že dlouhodobé zatížení může vést k postupnému poklesu pevnosti dřeva. Práce Wu et al. (2021) ukazuje, že při dlouhodobém zatížení dochází k postupnému snižování pevnosti a modulu pružnosti dřeva. Thurston (1881) zjistil, že vzorky dřeva v ohybu zatíženém napětíovým poměrem



Obr. 9 Madisonova křivka (Wood, 1951)

0,6 (úroveň zatížení lze vyjádřit pomocí napět'ového poměru, který je definován jako poměr aplikovaného napětí ke krátkodobé pevnosti) dojdou k destrukci za 8 až 15 měsíců. Napět'ový poměr (stress ratio) SR (-) je definován vztahem dle Zhao et al. (2023):

$$SR = \frac{\sigma}{f} \quad (19)$$

kde σ aplikované napětí (Pa),
 f krátkodobá pevnost materiálu (Pa).

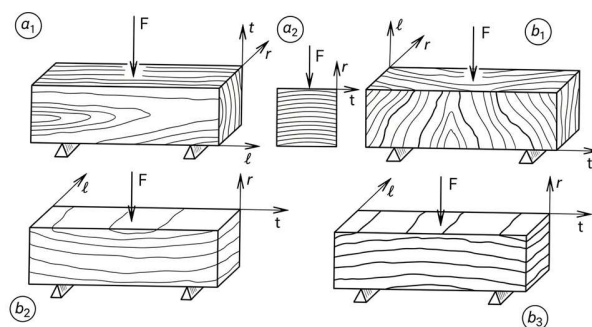
Na obrázku 9 je znázorněna Madisonova křivka, kde je znázorněno více křivek reprezentujících jednotlivé série experimentálních výsledků. Tyto křivky ukazují rozptyl naměřených hodnot a společně vymezují průměrný trend závislosti pevnosti dřeva na době trvání zatížení (Wood, 1951; Madsen, 1979).

Pevnost dřeva v ohybu

Při hodnocení mechanických vlastností je důležité specifikovat způsob namáhání materiálu, přičemž u zkušebních vzorků dřeva je nutné zohlednit zejména směr vláken a orientaci letokruhů. Podle výše uvedeného rozdělujeme pevnost dřeva v ohybu na:

- pevnost v ohybu kolmo na vlákna (vlákna se shodují s podélnou) v radiálním či tangenciálním směru,
- pevnost v ohybu ve směru vláken (na čelní plochu nebo kolmo k ní).

Pevnost dřeva v ohybu kolmo na vlákna nachází významné užití v praxi (nosníky, trámy či lamelové prvky) (Bohannon, 1966). Z obrázku 10 (b1), 10 (b3) a 10 (b4) je patrné, že při zatížení dřeva ve směru vláken, kdy síla působí rovnoběžně s jejich průběhem, dosahuje pevnost dřeva



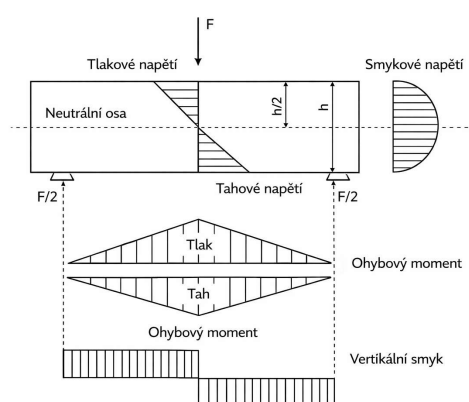
Obr. 10 Pevnost dřeva ve statickém ohybu (Matovič, 1993)

přibližně 5–10 % pevnosti v ohybu kolmo na vlákna, při němž zatěžující síla působí kolmo na jejich směr. Právě toto zatěžování obrázek 10 (a1) a 10 (a2) je nejvíce využívané a také nejvíce testované. Zatěžující síla působí kolmo na vlákna, a to buď v tangenciálním 8 (a1) či radiálním 10 (a2) směru (Babiak & Dubovský, 2001; Holan & Merenda, 2008). Takto testovaná tělesa definuje i zkušební norma ČSN 49 0115 (1979), kdy zkoušky probíhají na tělesech, jež jsou zatěžována kolmo na vlákna v tangenciálním směru, tedy na radiální plochu zkušebního tělesa. U jehličnatých dřevin bývá pevnost v tangenciálním směru přibližně o 10–12 % vyšší než v radiálním směru, zatímco u listnatých dřevin je tento rozdíl podstatně menší a obvykle nepřesahuje 2–4 %. Stanovení pevnosti v ohybu se provádí podle normy ČSN 49 0115 (1979) na zkušebních tělesech o rozměrech 20×20×300 mm. Tato norma definuje vztah pro výpočet pevnosti v ohybu σ_{max} (MPa) následovně:

$$\sigma_{max} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (20)$$

kde F_{max} maximální možné zatížení (N),
 L vzdálenost mezi podpěrami zkušebního stroje (mm),
 h výška zkušebního tělesa (mm),
 b šířka zkušebního tělesa (mm).

Takto zatěžovaná tělesa jsou vystavena tzv. kombinovanému zatěžování, tedy stavu, při kterém vzniká složitý napěťový stav. Tento stav Babiak & Dubovský (2001) popisuje na obrázku 11. Při ohýbání – deformování tělesa vzniká na horní straně tlakové napětí a na spodní tahové. Uprostřed namáhaného tělesa vzniká tzv. neutrální vrstva, ve které nevzniká



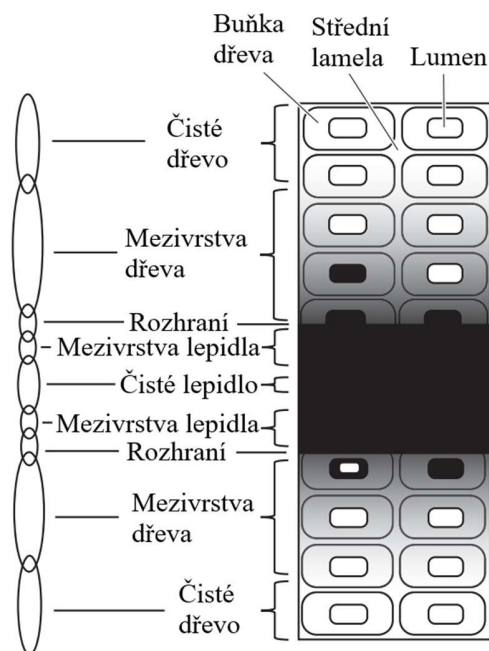
Obr. 11 Jednoduchý ohyb (napěťové stavy a ohybový moment) (Babiak a Dubovský, 2001)

ani jedno z výše uvedených napětí. V oblasti neutrální osy nedochází k tahovým ani tlakovým deformacím, avšak vzniká zde smykové napětí. Se vzrůstající vzdáleností od neutrální osy se zvyšuje velikost normálového napětí, což se projevuje nárůstem tahových a tlakových deformací (Požgaj et al., 1993; Babiak & Dubovský, 2001).

Dubové dřevo se vyznačuje vysokou hustotou, pevností a tuhostí, což jej předurčuje k využití v konstrukčních aplikacích. Jeho mechanické chování je však výrazně ovlivňováno zejména vlhkostí a teplotou, které mohou měnit pevnostní charakteristiky, modul pružnosti i průběh deformace při zatížení. Tyto faktory je nutné zohlednit především u lepených konstrukčních prvků, kde ovlivňují nejen chování samotného dřeva, ale také kvalitu a dlouhodobou spolehlivost lepeného spoje. Následující kapitola je proto zaměřena na problematiku lepení dřeva a faktory ovlivňující vznik a vlastnosti lepeného spoje.

3.4 Lepení

Lepení lze definovat jako spojení dvou pevných těles pomocí lepidla, které vyplňuje mezeru mezi spojovanými povrchy a je schopno přenášet mechanické síly mezi těmito tělesy. Při lepení dřeva může lepidlo pronikat pod povrch materiálu a částečně infiltrovat lumeny buněk i strukturu buněčných stěn. Dle Marra (1992) lze rozdělit lepené spoje na jednotlivé



Obr. 12 Model lepeného spoje (dřevo – lepidlo) (Marra, 1992)

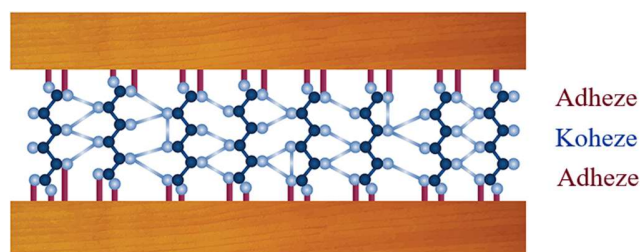
oblasti, které reprezentují postupný přenos mezi dřevem a lepidlem. Na obrázku 12 je viditelný spoj, který může být chápán jako řetězec článků, přičemž celkovou pevnost určuje vždy nejslabší článek (Marra, 1992). První část představuje čisté dřevo, jež není ovlivněno lepidlem. Na tuto část navazuje mezní vrstva, která představuje oblast dřeva ovlivněnou lepidlem. Dochází zde k několika procesům (průnik lepidla do lumenů buněk, částečná infiltrace do buněčných stěn, chemická či fyzikální modifikace polymeru buněčné stěny). V této oblasti již dřevo má odlišné mechanické vlastnosti oproti čistému dřevu, a to z důvodu změny (zpevnění, oslabení) buněčné struktury (Frihatr, 2012). Rozhraní dřevo – lepidlo představuje přechodovou hranici mezi lepidlem a dřevem, kde dochází k tvorbě adhezni vazby (mechanické zakotvení, mezimolekulární interakce (vodíkové vazby, Van der Waalsovy síly atd.)). Stabilita této vazby je zásadní pro přenos napětí mezi oběma materiály (Nearn, 1965; Konnerth, 2006). Chyba spoje může vzniknout právě v této části. Mezní vrstva lepidla, tedy část ovlivněná přítomností dřeva. Zde v této oblasti mohou nastat změny stupně polymerace, změny struktury polymerní sítě, interakce s extraktivními látkami dřeva či změny vlhkosti. Čisté lepidlo je lepidlo ve střední části lepené spáry, které přenáší zatížení mezi dvěma kusy dřeva. Při úplné infiltraci adhesiva do dřeva nemusí souvislá vrstva adhesiva vzniknout. (Nearn, 1974; Hunt et al., 2014).

Pro vytvoření kvalitního lepeného spoje je nezbytné, aby lepidlo za podmínek lepení vykazovalo dostatečnou tekutost, resp. vhodné reologické vlastnosti, které umožní jeho pronikání do struktury dřeva a zajišťují účinný kontakt mezi spojovanými povrchy (Sandberg, 2016). Lepení nabízí větší flexibilitu a vyžaduje méně pracovního prostoru ve srovnání s konvenčním mechanickým spojením. Poskytuje nám možnost velice silného spojení s lineárně rozloženým napětím. Jedná se tedy o velice zásadní techniku spojování při výrobě dřevěných konstrukčních prvků. Schopnost lepení je ovlivněna jak povrchovými, tak fyzikálními vlastnostmi dřeva, zejména hustotou, pórovitostí, obsahem vlhkosti a rozměrovými změnami (Vick, 1999). Hustota je hrubým ukazatelem spojitelnosti velké škály druhů dřeva. U materiálů s vysokou hustotou dochází k obtížnému lepení. Vzhledem k silnějším buněčným stěnám a menšímu objemu lumenu proniká lepidlo do struktury dřeva obtížněji, takže důležité mechanické propojení lepidla je omezeno na hloubku jedné až dvou buněk. Ke stlačení pevnějšího, tužšího dřeva s vysokou hustotou je zapotřebí mnohem větší tlak, aby došlo ke kontaktu mezi povrchem dřeva a lepidlem. K obtížím při lepení výrazně

přispívají také silné napětí, které vzniká u druhů s vysokou hustotou při změnách rozměrů v důsledku změn obsahu vlhkosti (Sterley, 2004; Rusakov et al., 2020). Dřeviny s vyšší hustotou, tedy i tvrdostí, jako je například dub, mají často vysoký obsah tříslovin (taninů), vosků, pryskyřic, fenolických látek, jak bylo uvedeno výše. Tyto aspekty snižují smáčivost povrchu, mohou chemicky inhibovat vytvrzení lepidel či vytvářet hydrofobní bariéru (Pizzi & Mittal, 2018). Právě tyto mechanismy omezují penetraci lepidla, což vede ke snižování pevnosti lepeného spoje.

3.4.1 Teorie lepení

Jak už bylo uvedeno výše, tak lepení znamená spojení dvou ploch, ať už stejných či odlišných, prostřednictvím lepidla, které se vyznačuje dobrou přilnavostí (adhezí) k povrchům obou spojovaných materiálů. Lepidla se v okamžiku nanášení nebo aktivace nacházejí v kapalném stavu, jelikož jedině tak dojde k dokonalému přilnutí k povrchu lepených materiálů (Mittal, 2015). Absolutní pevnost spoje závisí na celé řadě parametrů, které pevnost lepeného spoje ovlivňují (Pocius, 2021). Správná adheze (obrázek 13) je základní předpoklad dobré pevnosti spoje. Pokud lepidlo dostatečně pevně nepřilne k materiálu, dojde k rozlepení na rozhraní lepidlo – lepený spoj. Pakliže se tak stane, je soudržnost (koheze) i samotná pevnost materiálu vyšší než adheze. Pro správné pochopení vzniku adhezních sil existují dva teoretické modely (Frihart, 2005). První model teorie lepení klade důraz na mechanické vazby, které se uplatňují u členitých či porézních povrchů, kdy lepidlo při lepení zatéká do pórů a nerovností v materiálu a po samotném vytvrzení lepidla vytvoří tzv. pevný zámek mezi lepeným materiálem a lepidlem (Packham, 2003). Druhý model teorie upřednostňuje chemické vazby, jež jsou jak u porézních struktur, tak i u absolutně hladkých povrchů. Tyto teorie jsou založeny na působení slabých Van der Waalsových elektrických sil vznikajících mezi molekulami lepidla a lepeného materiálu, ale především na chemické reakci

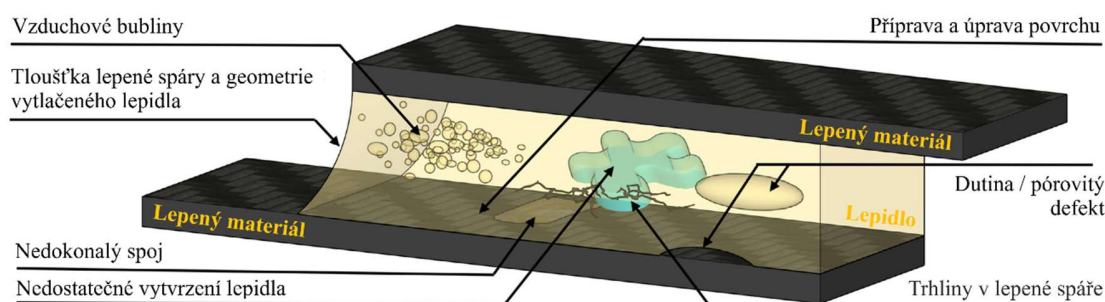


Obr. 13 Schéma přilnavosti (adheze) a soudržnosti (koheze) (Ülker, 2016)

lepidla s lepeným materiálem, proto se často spojují materiály s reaktivními povrchy či se povrchy chemicky upravují, aby docházelo k chemickým reakcím mezi lepidlem a materiálem za vzniku kovalentních vazeb (Kinloch, 1987). Je nutné si uvědomit, že ačkoli některé teorie lepení zdůrazňují mechanické aspekty a jiné zase kladou větší důraz na chemické, tak chemická struktura a interakce určují mechanické vlastnosti a mechanické vlastnosti určují sílu, která je soustředěna na jednotlivé chemické vazby. Je tedy zřejmé, že chemické a mechanické aspekty jsou propojeny a není možné je považovat za zcela odlišné entity (Frihart, 2005).

3.4.2 Faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje z důvodu kvality povrchu a struktury dřeva

Adhezi povrchu a kvalitu lepeného spoje ovlivňuje celá řada faktorů. Chemické složení dřeva, jako faktor ovlivňující lepený spoj, je nutné nepodcenit. Jelikož dřevo je organický materiál, vykazuje každý druh dřeviny odlišné vlastnosti. Migrace extraktivních látek na



Obr. 14 Schématické znázornění vad spoje (Dachev et al., 2025)

povrch dřeva mění vlastnosti dřeva jako adherendu (Sixta, 2006). Extrakty mění smáčivost a vytvrzovací vlastnosti lepidel. Požadovaný poměr smáčivosti a propustnosti je někdy ovlivněn extraktivními látkami, čímž se snižuje pevnost a výkon lepidel. Hse et al. (1988) zkoumali, které extraktivní látky ovlivňují adhezi. Ze studie vyplývá, že usazeniny extraktivních látek blokují ukotvení lepidel, že chemická nekompatibilita mezi extraktivními látkami vede k nižší adhezi. Bockel et al. (2017) pro lepší přizpůsobení se současnému problému adheze zvolili dvousložkový polyuretan a prokázali, že extraktivní látkami významně ovlivňují proces vytvrzování dvousložkového polyuretanového lepidla (2C PUR). Vliv extraktivních látek byl hodnocen pomocí ATR-FTIR spektroskopie a reologických

měření. Některá extraktiva urychlují reakci (např. kyselina octová, linolová), zatímco jiné ji zpomalují (např. terpeny a aldehydy), přičemž všechny vedly ke snížení elastického modulu (G') po 12 hodinách. Tyto změny se následně promítly i do mechanických vlastností lepených spojů, které vykazovaly mírné snížení pevnosti. Výsledky dále ukazují, že extraktivní látky ovlivňují reologické chování polyuretanových lepidel, přičemž výrazný vliv byl zaznamenán zejména u sacharidových složek, jako je škrob. Celkově lze konstatovat, že PUR lepidla jsou citlivá na chemické složení dřeva a přítomnost extraktivních látek, které mohou negativně ovlivňovat kvalitu lepeného spoje. Problematikou vlivu extraktivních látek na lepení dřeva se zabývala i řada dalších autorů (Browne & Brouse, 1929; Nussbaum & Sterley, 2002). Pro jednodušší objasnění, co vše může ovlivňovat lepenou spáru, je na obrázku 14 schematicky znázorněn průřez lepeným spojem, v němž jsou vyznačeny typické oblasti výskytu hlavních defektů, jako jsou nedokonalý spoj, dutiny, pórovitost, nedostatečné vytvrzení lepidla a degradace podkladu. Pro eliminaci těchto nedostatků je možné povrch dřeva modifikovat.

Dřevo představuje přírodní materiál s mimořádně širokým aplikačním potenciálem, daným jeho příznivým poměrem pevnosti a hmotnosti, obnovitelností a možnostmi technologického zpracování. Pokrok v oblasti polymerní chemie a materiálového inženýrství vedl k vývoji modifikovaných dřevěných materiálů s výrazně zlepšenými fyzikálními, chemickými, mechanickými a biologickými vlastnostmi (Gérardin, 2016). Tyto úpravy umožňují zvýšení rozměrové stability, trvanlivosti a jednotnosti povrchových vlastností dřeva, čímž se rozšiřují jeho možnosti použití v náročných aplikacích. Díky kombinaci estetických kvalit, zlepšených vlastností a snížených nároků na údržbu se modifikované dřevo stalo atraktivní alternativou k tradičním konstrukčním materiálům, včetně některých kovů a slitin, zejména v průmyslových a stavebních aplikacích (Kumar et al., 1994). Modifikace dřeva je možné rozdělit na:

Chemická modifikace

Stav povrchu dřeva je jedním z nejdůležitějších faktorů prodloužené trvanlivosti lepeného dřeva a pouze čerstvý, vysoce energetický povrch zaručuje optimální podmínky přilnavosti (Dougal et al., 1980; Nussbaum 1999). Ztráta schopnosti lepivosti s rostoucím věkem povrchu dřeva je fenomén, který vzbudil zájem několika výzkumných pracovníků (Chen,

1970; Troughton & Chow, 1971; Gardner et al., 1991; Nylund et al., 1998; Nussbaum, 1999; Wålinder, 2000). Back (1991) testoval aktivaci dřevěného povrchu oxidační předúpravou pro zlepšení lepivosti. Oxidační odstraňování nízkoenergetického povrchového filmu na dřevě, vytvořeného během skladování nízkomolekulárními oleofilními materiály, jako jsou vosky a mastné kyseliny, je považováno za nejúčinnější předúpravu. Zavarin (1984) zas otestoval lepicí směs vyhořelého síranového louhu, furfurylalkoholu a maleinového anhydridu s oxidační aktivací povrchu. Z výsledků bylo patrné, že oxidační činidlo zlepšilo adhezi lepidla, ale po dlouhodobém vystavení vlhkosti došlo k poškození lepicí směsi. Také existují výzkumy, kde autoři lepení popisují transport lepidla z buňky do buňky skrze póry, avšak transport lepidla nemusí být vždy rovnoměrný, a tím může docházet k oslabování pevnosti spoje. Kamke & Lee (2007) ve svém výzkumu tuto problematiku řeší aplikací hloubkové penetrace na povrch dřeva. Tento proces probíhající na makroskopické, mikroskopické a chemické úrovni, kdy významně ovlivňuje mechanické i fyzikální vlastnosti materiálu a kvalitu lepeného spoje. Optimální míra penetrace je klíčová pro dosažení vyváženého poměru mezi mechanickým zakotvením a soudržností lepicí vrstvy (Bolton et al., 1988). Wang et al. (2019) se svým týmem zkoušeli otestovat, zda dojde ke zlepšení adhezivních vlastností dubového dřeva při aplikaci penetrace. Výsledky prokázaly, že se zvýšila adheze, což se projevilo na krytí povrchu nátěrem. Pozitivní vliv chemické předúpravy byl zaznamenán také ve studii Tymyk et al. (2013), kteří použili peroxid vodíku pro modifikaci povrchu dřeva a prokázali zvýšení jejich adhezivních vlastností.

Termomechanická modifikace

Jednou z hlavních nevýhod dřeva je hygroskopičnost vyplývající z jeho polárního charakteru. Sorpční desorpce vody způsobuje bobtnání a sesychání dřeva. Tepelná modifikace tento nežádoucí jev podstatně snižuje (Yildiz et al., 2006; Aydemir et al., 2011). Bohužel stejné chemické změny, které snižují sorpci vody, mění polární charakter materiálu a vedou k horšímu smáčení tepelně ošetřeného dřeva vodou ředitelnými lepidly (Chang & Keith, 1978; Aydemir et al., 2011). Leszczyńska et al. (2018) měli za cíl vyhodnotit, jak některé úpravy ovlivňující pevnost ve smyku a smáčivost u vybraných dřevin. Některé nedávné studie prokázaly vliv předpařené úpravy na konečnou kvalitu dubového dřeva (Ferrari et al., 2013). Jednou z vybraných dřevin bylo i dubové dřevo, které bylo pařeno při

110 °C po dobu 24 hod. Následně byl materiál vložen na tři hodiny do sušárny a sušen při teplotě 160 °C. Výsledek zkoušky ukázal, že smáčivost takto upraveného dřeva k danému lepidlu byla špatná. Rovněž se předpokládalo, že vystavení vzorku podmínkám vodního stresu by mohlo způsobit silné snížení pevnosti ve smyku. Tato hypotéza byla potvrzena (Torado et al., 2015). Do podobné práce se zapojili i Boruszewski et al. (2011), kteří zkoumali lepivost tepelně modifikovaného buku za použití komerčních lepidel. Jednalo se o melamin-močovino-formaldehyd (MUF) a melamin-formaldehyd (MF) a dvousložkový polyuretan (PUR). Dřevo buku (*Fagus sylvatica* L.) bylo upraveno podle dvou teplotních režimů: 160 °C a 190 °C (Widmann, 2007). Smykové pevnosti spojů byly poté stanoveny podle normy EN 205 (2003). Výsledky ukázaly, že tepelně modifikované bukové dřevo lze účinně lepit nejen komerčně dostupnými PUR lepidly, ale také MF a MUF lepidly.

Modifikace povrchu plazmou

V posledních letech se studené plazmy používají ke změně povrchových vlastností dřeva, a to za účelem zlepšení přilnavosti lepicích vláken nebo ke zvýšení depozice tenkých vrstev polymerů na povrch kovů, skel a plastů (Hall et al., 1969; Kaplan & Rose, 1991). Plazma za studena byla použita ke zlepšení vlastností smáčení a přilnavosti dřeva (Sakata et al., 1993; Podgorski et al., 2000; Rehn et al., 2003; Bente et al., 2004) a dřevěných kompozitů (Gindl et al., 2004; Wolkenhauer et al., 2008). Předpokládá se, že modifikace plazmou povede ke zvýšené polaritě povrchu, která je výsledkem oxidační reakce vedoucí k tvorbě hydroxylových, karboxylových, aldehydových a jiných polárních funkčních skupin (Odrášková et al., 2008). Povrchová úprava plazmou ukazuje obrovský potenciál pro zlepšení přilnavosti lepidel ke dřevu. V důsledku toho jsou možné výhody nových kombinací materiálů (Custodio et al., 2008). Klébert et al. (2022) uvedli, že plazmová modifikace může zvýšit povrchovou energii a adhezi dřeva, přičemž její účinnost závisí na druhu použitého plynu a na parametrech plazmového systému. Nevýhodou této metody je vyšší technologická a ekonomická náročnost ve srovnání s běžnými chemickými postupy.

Smáčivost povrchu lepeného dřeva

Smáčivost představuje schopnost kapaliny, v tomto případě lepidla, rozprostřít se po povrchu pevné látky a vytvořit s ní dostatečně těsný kontakt. Jedním ze základních ukazatelů smáčivosti je kontaktní úhel, který vzniká na rozhraní tří fází – pevné látky, kapaliny

a okolního prostředí, zpravidla vzduchu (Wu, 1982). Kontaktní úhel kapaliny s pevným povrchem je praktickým měřítkem smáčivosti a zároveň indikátorem afinity kapaliny k danému povrchu. Obecně platí, že čím menší je kontaktní úhel, tím lepší je smáčení povrchu, zatímco větší kontaktní úhel značí horší rozliv kapaliny a nižší adhezi k podkladu (Seregi et al., 2026).

Měření kontaktního úhlu lze provádět různými metodami, nejčastěji však sledováním tvaru kapky kapaliny nanesené na rovný pevný povrch (Shi & Gardner, 2001). Rovnovážný tvar kapky je ovlivněn působením povrchových a mezifázových napětí mezi pevnou látkou, kapalinou a plynnou fází. Tento vztah je popsán Youngovou rovnicí, která vyjadřuje rovnováhu sil působících na rozhraní těchto tří fází (Young, 1805; Boyd, 1942). V případě lepení dřeva je smáčivost významným faktorem, protože ovlivňuje schopnost lepidla pronikat do povrchových vrstev dřeva, vytvořit dostatečnou adhezni vazbu a tím přispět ke kvalitě a pevnosti lepeného spoje (Papp & Csiha, 2017).

Drsnost povrchu lepeného dřeva

Drsnost povrchu dřeva je významným faktorem ovlivňujícím kvalitu lepeného spoje. Při hodnocení povrchové struktury lze vycházet z profilové metody podle ČSN EN ISO 4288 (2023), která stanovuje pravidla pro posuzování struktury povrchu a vyhodnocování parametrů drsnosti. Samotné parametry profilu, například R_a , R_z nebo R_t , jsou definovány v normě ČSN EN ISO 4287 (2023) (ČSN EN 4287, 1999; ČSN EN 4288, 1999). U dřeva je hodnocení drsnosti specifické, protože výsledný profil povrchu není ovlivněn pouze způsobem obrábění, ale také anatomickou stavbou materiálu, zejména pórovitostí, směrem vláken a rozdíly mezi jarním a letním dřevem (Cheng & Xiuzhi, 2012). Z hlediska lepení proto nelze drsnost posuzovat izolovaně, ale vždy ve vztahu k dřevině, způsobu opracování a použitému lepidlu (Söğütü, 2017).

Priměřené zdrsnění povrchu může zlepšit smáčivost, zvětšit kontaktní plochu a podpořit mechanické zakotvení lepidla ve struktuře dřeva. Nadměrná drsnost však může vést k nerovnoměrné tloušťce lepicí spáry, horšímu kontaktu mezi lepenými plochami nebo k nadměrné penetraci lepidla do dřeva (Özakin & Gültekin, 2025). Výsledná pevnost spoje je proto dána rovnováhou mezi smáčením povrchu, penetrací lepidla a vytvořením souvislé

lepící vrstvy. Experimentální studie ukazují, že vyšší drsnost nemusí vždy znamenat vyšší pevnost lepeného spoje. Söğütli (2017) uvádí, že u některých dřevin a lepidel byly vyšší pevnosti dosaženy při nižších hodnotách drsnosti. Podobně Leggate et al. (2021) prokázali, že způsob mechanické přípravy povrchu ovlivňuje smáčivost, propustnost i pevnost lepeného spoje. Optimální drsnost povrchu je tedy nutné chápat jako technologický parametr, který může při vhodné úpravě povrchu přispět ke zvýšení adheze, avšak pouze v kombinaci se správně zvoleným lepicím systémem a podmínkami lisování (Jakub & Martino, 2005).

Faktorů ovlivňujících kvalitu lepeného spoje je celá řada. Mezi další je možné zařadit: vliv vad a struktury povrchu dřeva, rozměrová stabilita a vnitřní pnutí dřeva při změnách teploty a vlhkosti, polarita a již zmiňovaná smáčivost povrchu lepeného dřeva, drsnost (broušení a frézování) a rychlost oxidace povrchu dřeva po jeho opracování.

Faktorů ovlivňujících kvalitu lepeného spoje z důvodu typu použitého adheziva je také mnoho např: adheze a koheze, chemické složení lepidel, princip vytvrzování, podmínky vytvrzování (teplota, tlak, pH), viskozita lepidla, tloušťka a rovnoměrnost nánosu lepidla, reologie lepidla při nanášení a reologie lepidla při vytvrzení.

Faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje z důvodu fyzikálních vlastností a okrajových podmínek vyplývajících z teorie lepení a technologie lepení jsou: technologické podmínky lepení, teplota, relativní vlhkost vzduchu, tlak, způsob aplikace adheziva na povrch dřeva.

3.4.3 Termosetické modifikace a penetrace povrchu dřeva před lepením

Kvalita lepeného spoje dřeva není určena pouze vlastnostmi použitého lepidla, ale také charakterem povrchové vrstvy adherendu a vlastnostmi rozhraní mezi dřevem a polymerní složkou. Dřevo je porézní, anizotropní a chemicky heterogenní materiál, u něhož mohou výslednou adhezi ovlivňovat zejména smáčivost povrchu, drsnost, vlhkost, anatomická stavba, permeabilita (pronikání), přítomnost extraktivních látek a schopnost lepidla nebo penetračního systému pronikat do povrchových vrstev. Z hlediska funkce lepeného spoje je proto významná nejen vlastní lepicí vrstva, ale také tzv. interfázová oblast, ve které dochází k vzájemnému ovlivnění dřeva a polymerního systému (Frihart & Hunt, 2021).

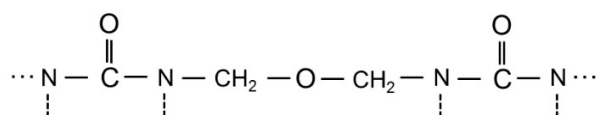
Penetrace povrchu dřeva před lepením představuje specifický způsob modifikace, při němž penetrační prostředek vstupuje do povrchových pórů, lumenů buněk, mikrotrhlin a dalších kapilárních struktur dřeva (Furuno et al., 2004). Tím může docházet ke zpevnění povrchové vrstvy, omezení její lokální nesoudržnosti a vytvoření stabilnější přechodové oblasti mezi dřevem a následně naneseným lepidlem. Průnik polymerní složky do struktury dřeva zároveň ovlivňuje mechanické zakotvení, kontaktní plochu mezi dřevem a polymerem a rozložení napětí v oblasti lepené spáry. Příliš nízká penetrace však může vést k nedostatečnému propojení s povrchem dřeva, zatímco nadměrná penetrace může způsobit ochuzení vlastní lepicí spáry o potřebné množství lepidla (Kamke & Lee, 2007).

Význam povrchové modifikace je zvláště důležitý u dřevin s vyšší hustotou, výraznou anatomickou stavbou nebo vyšším obsahem extraktivních látek (Bockel et al., 2018). U listnatých dřevin mohou extraktivní látky ovlivňovat polaritu, smáčivost a permeabilitu povrchu, a tím i interakci mezi adherendem a lepicím systémem. V případě dubového dřeva je nutné zohlednit nejen jeho vysokou hustotu a výraznou pórovitou stavbu, ale také chemické složení povrchové vrstvy, které může ovlivňovat průnik a vytvrzování lepidla. Modifikace povrchu před lepením proto může představovat vhodný způsob, jak stabilizovat rozhraní dřevo–lepidlo a snížit variabilitu vlastností lepeného spoje (Bockel et al., 2019). Sahula et al. (2023) se ve své práci věnovali vlivu chemické modifikace povrchu jádrového dřeva dubu (*Quercus robur*) na pevnost lepeného spoje při použití jednosložkového PUR lepidla určeného pro konstrukční aplikace v interiéru i exteriéru. Autoři uvádějí, že aplikace vybraných chemických modifikátorů na lepené povrchy přispěla k neutralizaci tříslovin v povrchových vrstvách dubového dřeva, čímž došlo ke zlepšení adheze. Výsledky zkoušek podélné smykové pevnosti v tahu potvrdily pozitivní vliv povrchové modifikace na pevnost lepeného spoje.

V souvislosti s polyuretanovými lepidly je významná také aplikace primerů nebo penetračních systémů, které mohou ovlivnit chování lepidla v interfázové oblasti mezi dřevem a lepicí vrstvou. U jednosložkových polyuretanových lepidel byla popsána schopnost primerů ovlivňovat infiltraci jejich složek do buněčných stěn dřeva, průnik lepidla do buněčných lumenů a tloušťku výsledné lepicí spáry. Tyto změny mohou přispívat ke stabilizaci rozhraní dřevo–lepidlo a k příznivějším mechanickým vlastnostem lepeného

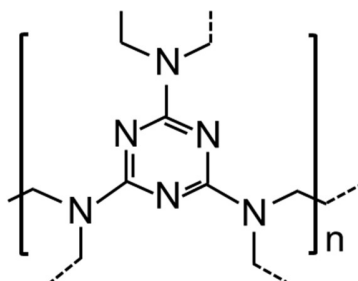
spoje. Böger et al. (2024) uvádějí, že aplikace primerů vedla u spojů lepených 1K-PUR lepidlem ke zvýšení průniku lepidla do lumenů buněk v interfázové oblasti, ke snížení tloušťky lepicí spáry a ke zvýšení tahové smykové pevnosti, což potvrzují i Luedtke et al. (2015).

Pro modifikaci penetračních systémů lze využít také termosetické pryskyřice, které po vytvrzení vytvářejí prostorově zesíťovanou polymerní strukturu. Mezi významné termosetické systémy patří melamin-formaldehydová, močovino-formaldehydová a fenol-formaldehydová pryskyřice, které se vyznačují dobrou mechanickou, tepelnou a chemickou stabilitou (Kamarudin et al., 2020).



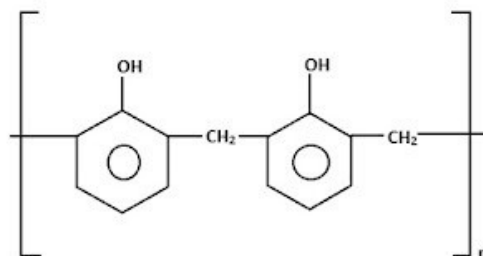
Obr. 15 Močovino-formaldehydové pryskyřice UF (Netzsch, 2026)

Močovino-formaldehydové pryskyřice (obrázek 15), označované jako UF pryskyřice, patří mezi aminoplastické termosetické, resp. reaktoplastické pryskyřice. Vznikají reakcí močoviny s formaldehydem, při níž dochází nejprve k hydroxymethylaci močoviny a následně ke kondenzačním reakcím methylovaných meziproduktů. Během vytvrzování se vytvářejí zejména methylenové a methylenetherové vazby, které propojují jednotlivé molekulární jednotky do prostorově zesíťené struktury (Pizzi & Mittal, 2003). Po vytvrzení je výsledná pryskyřice nerozpustná a netavitelná, což je typické pro termosetické systémy. UF pryskyřice se vyznačují rychlým vytvrzováním, světlým zbarvením a dobrou pevností v suchém prostředí, jejich omezením je však nižší odolnost vůči vlhkosti a zvýšené teplotě, při nichž může docházet k hydrolýze vazeb a poklesu stability lepeného spoje (Conner, 1996).



Obr. 16 Melamin-formaldehydové pryskyřice (Netzsch, 2026)

Melamin-formaldehydové pryskyřice (obrázek 16), označované jako MF pryskyřice, rovněž patří mezi aminoplastické termosetické pryskyřice. Vznikají reakcí melaminu s formaldehydem, kdy nejprve dochází k methylovalaci aminových skupin melaminu a následně ke kondenzačnímu zesíťování. Při vytvrzování vzniká prostorově propojená polymerní síť tvořená především methylenovými a methylenetherovými vazbami (Frihart, 2005). Díky struktuře melaminu, zejména přítomnosti triazinového kruhu a více reaktivních aminových skupin, může vytvrzená MF pryskyřice vytvářet stabilnější a hustěji zesíťovanou termosetickou strukturu než UF systémy. Po vytvrzení je nerozpustná, netavitelná a vykazuje vyšší odolnost vůči vlhkosti, vodě, zvýšené teplotě a chemickému působení, přičemž její nevýhodou je vyšší cena (Frihart & Hunt, 2021).



Obr. 17 Vzorec fenol-formaldehydové pryskyřice (Novolak, 2006)

Fenol-formaldehydová pryskyřice (obrázek 17), patří mezi termosetické, resp. reaktoplastické pryskyřice. Vzniká polykondenzační reakcí fenolu s formaldehydem, zpravidla za přítomnosti kyselého nebo zásaditého katalyzátoru. V první fázi reakce dochází ke vzniku hydroxy-methylovaných fenolů a nízkomolekulárních prepolymerů, které jsou ještě zpracovatelné a schopné další reakce. Při následném vytvrzování probíhají kondenzační reakce, při nichž se jednotlivé fenolické jednotky propojují zejména methylenovými a methylen-etherovými můstky. Výsledkem je prostorově zesíťovaná termosetická struktura, která je po vytvrzení nerozpustná, netavitelná a vykazuje vysokou odolnost vůči vlhkosti, zvýšené teplotě a chemickému působení. Tyto vlastnosti jsou důvodem využití fenol-formaldehydových pryskyřic v konstrukčních a dlouhodobě exponovaných aplikacích na bázi dřeva

V kontextu konstrukčních dřevěných prvků vystavených vlhkosti a zvýšené teplotě lze fenol-formaldehydové pryskyřice považovat za nejvhodnější ze srovnávaných systémů díky

jejich vysoké odolnosti a dlouhodobé stabilitě. V této práci je proto fenol-formaldehydová pryskyřice využita jako modifikační složka akrylátové penetrace pro předúpravu povrchu dubového dřeva. Takto vytvořená přechodová vrstva mezi dřevem a polyuretanovým lepidlem může ovlivnit povrchové vlastnosti dřeva, charakter interfáze a výsledné chování lepeného spoje.

3.4.4 Druhy lepidel

Pro lepení masivního dřeva se užívají lepidla na bázi termoplastů a termosetů. Typy lepidel, která se mohou použít pro lepení nosného konstrukčního dřeva, jsou omezeny normativně, především normami ČSN EN 301 (2014) a ČSN EN 15425 (2023). Pro konstrukční účely se převážně využívají lepidla na bázi termosetů, a to z důvodu jejich příznivých mechanických vlastností a stability spoje. Většina lepidel určených pro lepení konstrukčního dřeva je však optimalizována pro dřevo smrku, nikoli pro dřevo dubu, které se vyznačuje vyšším obsahem taninů a odlišným chemickým složením.

3.4.4.1 Močovino-formaldehydová lepidla (UF)

Močovino-formaldehydová (UF) lepidla patří do skupiny formaldehydových lepidel, která mají několik silných pozitivních aspektů, kterými jsou velmi nízké náklady, nehořlavost, velmi rychlé vytvrzení a světlá barva. Jedná se o největší třídu aminoplastových pryskyřic a jsou také převládajícími lepidly pro interiérové výrobky. Hlavní nevýhodou UF lepidel je jejich nízká odolnost proti vodě a mají vysokou poruchu spoje při zrychlených testech stárnutí (Niemz, 1983). Další oblastí zájmu je dlouhodobá hydrolytická nestabilita těchto adhezivních polymerů, které obecně vykazují nejmenší trvanlivost ze všech formaldehydových kopolymerových lepidel (Pizzi, 1983). Předpokládá se, že UF lepidla depolymerizují, což vede k pokračující emisi formaldehydu. UF lepidla se obvykle používají při výrobě výrobků používaných v interiérech, zejména překližky, DTD a MDF desek, protože expozice vlhkosti vede k rozpadu reakcí tvořících vazbu. Nadměrné vystavení teplem povede také k chemickému rozpadu vytvrzených UF lepidel (Pizzi, 2003).

3.4.4.2 Fenol-formaldehydová lepidla (PF)

Fenol-formaldehydová (PF) lepidla patří do skupiny fenolických lepidel vyvinutých na počátku dvacátého století (Detlefsen, 2002). Využití lepidel bylo převážně v laminacích a kompozitních materiálech, a to z důvodu vynikající trvanlivosti, dobré přilnavosti ke dřevu, vysokou pevností vytvořené polymerní sítě a vynikající stabilitou. Převážně se lepidla používají při výrobě překližek a OSB desek, které jsou vystaveny abiotickým faktorům (Vazquwz, 1995).

3.4.4.3 Melamin-formaldehydová lepidla (MF)

Melamin-formaldehydová (MF) lepidla patří do skupiny aminoplastických lepidel, které se vyznačují vysokou odolností proti vodě, ale oproti jiným formaldehydovým lepidlům jsou barevně světlá. Nevzniká tmavá spára od lepidla. Asi nejčastěji se tato lepidla používají pro výrobu překližovaných materiálů do interiéru a z části i do exteriéru, DTD desek, dekorativních laminátů a jiných (Dunky, 2003). K omezení těchto lepidel došlo z důvodů vysokých nákladů na pořízení, což vedlo k použití melamin-močovino-formaldehydových (MUF) lepidel. Váhový poměr melamin/močovina u MUF lepidel byl 40/60. Lepidla byla pro použití v exteriéru nevhodná. Pryskyřice na bázi melaminu používané jako lepidla na dřevo představují jednu z největších skupin aminoplastických pryskyřic. Binder & Dunky (2020) popsali analytické metody ke stanovení chemické identity komplexních směsí. Ze studie vyplývá, že pryskyřice na bázi melaminu vykazují vyšší odolnost vůči hydrolýze ve srovnání s pryskyřicemi UF.

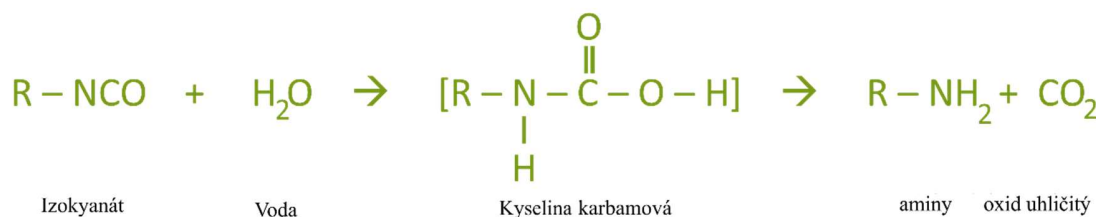
3.4.4.4 Izokyanátová lepidla a jejich polymery (MDI)

Několik tříd lepidel používaných při lepení dřeva zahrnuje použití izokyanátů vzhledem k jejich reaktivitě se skupinami, které obsahují reaktivní vodíky jako jsou aminové a alkoholové skupiny. Toto umožňuje velkou flexibilitu při výrobě produktů, protože mohou samy polymerovat či reagovat s mnoha dalšími monomery. Právě izokyanáty se často používají k výrobě polyuretanu (Sandberg, 2016). Polymerní difenylmethan diizokyanáty se standardně používají při lepení dřeva. Vyšší cena tohoto lepidla je kompenzována rychlou reakční činností (Sun, 1994). Za nevýhodu MDI lepidel lze považovat jejich reaktivitu

a zdravotní rizika spojená s expozicí izokyanátům, jež vede k nutnému používání chemických respirátorů. Právě Booth et al. (2009) se věnovali výzkumu, ve kterém nasbírali velké množství průmyslových dat, přes 8000 vzorků vzduchu, u kterého byla naměřena koncentrace MDI. Data byla sbírána 15 let a bylo provedeno 606 průzkumů u 251 společností. Nasbíraná data ukazují, že koncentrace MDI ve vzduchu na pracovištích jsou ve většině případů výrobních operací extrémně nízká. Většina (74,6 %) koncentrací MDI ve vzduchu byla nedetekována, tj. pod limity kvantifikace (LOQ).

3.4.4.5 Polyuretanová lepidla (PU)

Polyuretany patří mezi nejdůležitější třídy speciálních polymerů. Jedná se o extrémně velké a komplexní molekuly vyráběné kombinací velkého počtu jednodušších molekul nazývaných jako monomery. Monomery jsou nízkomolekulární sloučeniny charakterizované specifickými fyzikálně-chemickými vlastnostmi (např. molekulová hmotnost, teplota varu, teplota tání či krystaličnost), které se během polymerace spojují za vzniku polymerních řetězců nebo prostorově zesíťovaných struktur, jejichž výsledné vlastnosti se výrazně liší od vlastností výchozích monomerů. Na rozdíl od monomerů polyuretany, stejně jako ostatní polymery, nejsou tvořeny jednotnou molekulární strukturou, ale představují soubor makromolekul s různou molekulovou hmotností a částečně odlišnou strukturou. Jejich vlastnosti jsou proto vyjádřeny jako průměrné hodnoty, což souvisí s polydisperzitou polymerního systému (Szycher, 1999). Molekulová hmotnost polyuretanů přitom značně ovlivňuje jejich fyzikální vlastnosti. Polymerní řetězce mohou vykazovat různou prostorovou strukturu a mohou být lineární, rozvětvené nebo zesíťované. Polyuretany se vyskytují jako kopolymery, jejichž makromolekuly jsou tvořeny nejméně dvěma druhy monomerů (Mittal & Pizzi, 1999). Kopolymery se mohou vyskytovat jako náhodné, střídavé, segmentované, blokové nebo štěpené. Polyuretany jsou charakterizovány interakcemi působícími uvnitř



Obr. 18 Reakce izokyanátu s H_2O

makromolekul a mezi nimi. Nejvýznamnější roli přitom hrají kovalentní vazby, jejichž disociační energie představuje míru stability polymeru a určuje jeho odolnost vůči tepelnému rozkladu (Kinloch, 1987).

Původně byla polyuretanová lepidla vyvíjena jako dvousložkové systémy, jejichž princip spočíval v chemické reakci vícesytných alkoholů (polyolů) s vícefunkčními izokyanáty za vzniku uretanových vazeb (-NH-CO-O-), které vytvářejí prostorově zesíťovanou polymerní strukturu (Selbo, 1975). Postupem času došlo k vývoji jednosložkových polyuretanových lepidel, u kterých taktéž docházelo k reakci polyolu s izokyanátem, avšak izokyanátu bylo použito ve větším množství (Strobech, 1990). V pryskyřici tak zůstaly nezreagované izokyanátové skupiny a ty jsou citlivé na vodu, alkoholy, aminy, kyseliny atd. Při následném působení vzdušné vlhkosti na lepidlo dojde k rozkladu izokyanátové skupiny a k zahájení síťující reakce.

Obrázek 18 reprezentuje reakci izokyanátu na vodu. Tento proces je v chemii znám jako pění. Meziproduktem, který vzniká při této nestabilní reakci je kyselina karbamová, a k rozkladu dochází za vzniku aminu a oxidu uhličitého. Je tedy nutné jednosložkové polyuretany uchovávat v suchu (Rowell, 2005). V polyuretanech na bázi lineárního polyolu, izokyanátu a prodlužovače řetězce se zdá, že morfologie polymeru hraje významnou roli v jeho celkových pevnostních charakteristikách. Morfologie a fázová separace jednotlivých složek polyuretanu přitom významně ovlivňují jeho adhezivní vlastnosti, a to jak před, tak po působení hydrolytických procesů. Bylo prokázáno, že efektivita mikrofázové separace, tvorba struktur stabilizovaných vodíkovými vazbami i průběh hydrolytické degradace v oblastech tvrdých segmentů výrazně závisí na složení lepidla. Vlivu prostředí na polyuretanová lepidla je možné odolávat tak, že zvolíme správné polyuretanové komponenty (Kovačević, 1993). Polyolovou složku je možné dále modifikovat, protože před smícháním nereaguje. Z těchto důvodů představuje dvousložkový polyuretan zajímavou alternativu k adhezivním systémům bez formaldehydu v konstrukcích z tvrdého dřeva. Po druhé světové válce se lepidla na bázi fenol-resorcinol-formaldehydu (PRF) začala stále více uplatňovat při lepení konstrukčního dřeva. Signifikantní pro lepidla na bázi PRF je tvorba tmavě hnědé až černé lepené spáry a vysoká pevnost spoje, a to i za podmínek zvýšené vlhkosti. Světová zdravotnická organizace zveřejnila v roce 2002 informace

o formaldehydu jako o karcinogenu (WHO, 2006). Z těchto důvodů jsou aktivně vyvíjeny adhezivní systémy bez obsahu formaldehydu nebo se sníženým obsahem formaldehydu. Výhodou polyuretanových lepidel je, že neobsahují žádný formaldehyd nebo rozpouštědla, mají potenciál pro strukturální lepení tvrdého dřeva a existuje zde možnost výzkumu tenké lepené spáry (Bockel et al., 2019). Norma ČSN EN 15425 (2023) definuje požadavky na tahovou pevnost ve smyku jednosložkových polyuretanových lepidel v suchém i vlhkém stavu. Zatímco v suchých podmínkách tyto lepené spoje obvykle požadovaným hodnotám vyhovují, při zvýšené vlhkosti dochází často k jejich poklesu pod stanovené limity (Brandmair et al. 2012).

Dle výzkumu, který provedli Uysal & Özçifci (2006), došlo k ověření vlastností polyuretanového lepidla na různých druzích dřeva, které byly vystaveny zkoušce proti vodě. Z výsledku bylo patrné, že u jednosložkového polyuretanu došlo k významnému snížení pevnosti, oproti suchému stavu (López-Suevos & Richter 2009; Kläusler et al., 2014). Výzkum na konci 20. století vedl k významnému pokroku v oblasti polyuretanových lepidel. Vick & Okkonen (1998) prokázali, že použití vazebného činidla hydroxymethylresorcinolu (HMR) výrazně zvyšuje odolnost lepených spojů vůči delaminaci. (Vick & Christiansen, 1998). Při zkoušce odolnosti vůči deformaci, při statickém zatížení, odolaly polyuretanové vazby extrémní teplotě a relativní vlhkosti po dobu 60 dnů bez deformace (Vick & Okkonen 2000). Aplikaci již zmiňovaného vazebného činidla HMR popsali Son et al. (2005) ve své práci. Cílem výzkumu bylo studovat účinek zpracování HMR na tepelné a dynamicko-mechanické vlastnosti javorové dýhy. Protože Vick (1995) uvedl, že HMR zvyšuje adhezi dřeva a že fyzikálně spřahuje epoxidové lepidlo s ligno-celulózou dřeva, čímž vytváří vazby s mimořádně vysokou strukturální trvanlivostí, tak Son et al. (2005) namočili do roztoku HMR dýhy po dobu 15 až 30 min s následným osušením při předem definovaných podmínkách vlhkostního stavu a teploty. Data z dynamicko-mechanické tepelné analýzy (DMTA) a diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) ukázala, že posun teploty skelného přechodu (T_g) u hemicelulóz byl v důsledku ošetření HMR zanedbatelný či žádný. Na základě teoretické analýzy bylo zjištěno, že HMR vykazuje vyšší schopnost rozpouštět lignin. Na základě těchto zjištění se předpokládá, že HMR může působit jako změkčovadlo ligninu. Somani et al. (2003) se ve své studii zabývali polyuretanovými lepidly z obnovitelných zdrojů, které budou mít nízké náklady a biologickou rozložitelnost, což je

z environmentálního pohledu důležité. Byla syntetizována polyuretanová lepidla ze tří různých polyesterových polyolů připravených reakcí derivátu ricinového oleje s dioly (glykoly) a dále reagujících s diizokyanátovými adukty. K přípravě různých kompozic byly použity odlišné poměry izokyanátových (NCO) a hydroxylových (OH) skupin. Polyoly a polyuretany byly charakterizovány pomocí infračerveného spektrometru s Fourierovou transformací (FTIR). Účinek poměrů NCO/OH, typů před reagovaných izokyanátů (pre-polymerů) a délky řetězce glykolů byl hodnocen na základě pevnosti lepeného spoje dřevo-dřevo, konkrétně změny smykové pevnosti po expozici zkušebních těles ve horké a studené vodě, kyselému a alkalickému prostředí. Tepelná stabilita těchto polyuretanových lepidel byla stanovena termogravimetrickou (TGA) analýzou. TGA analýza prokázala dvoustupňový průběh tepelného rozkladu, zahrnující rozklad uretanových vazeb (~260 °C) a následnou degradaci polyolové složky (~450 °C). Liu et al. (2017) ve své studii uvádějí, že menší a jednotněji distribuovaný WPU0002 (vodní polyuretany na bázi rostlinného oleje) je schopen snadněji interagovat a vytvořit silnější propojovací síť s proteiny než WPU0500. Silnější interakce mezi WPU0002 a proteinem vede ke zvýšení viskozity a vazebné síly. Směsná lepidla WPU – SPI (izolační sójový protein) vykazují výrazně zlepšenou pevnost ve vlhku, což ukazuje jejich potenciál jako lepidel na dřevo.

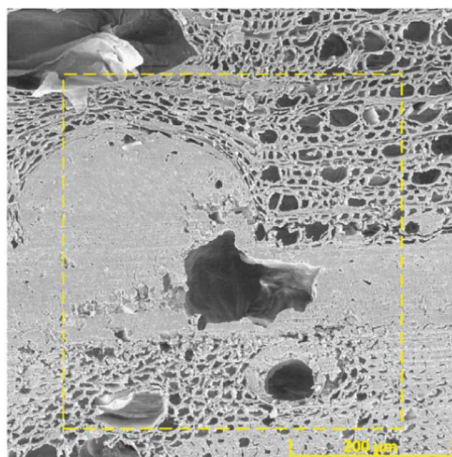
Dalším možným způsobem, jak zlepšit reakci s polárními skupinami dřeva je aplikace polymerní methylen-difenyl-diizokyanátové pryskyřice (pMDI). Lepidlo vyniká svými vlastnostmi, jako je krátká doba vytvrzení a vynikající pevnost (Zhou & Fraizer, 2001). Jsou-li dodrženy vhodné podmínky, je pMDI schopno kovalentně reagovat s dřevní substancí prostřednictvím hydroxylových skupin přítomných v celulóze, hemicelulózách a ligninu, za vzniku uretanových vazeb. Tím dochází k vytvoření chemicky vázaného rozhraní mezi lepidlem a dřevem, které zvyšuje adhezi a stabilitu spoje. Současně mohou izokyanátové skupiny reagovat s vlhkostí obsaženou ve dřevě za vzniku aminů, které dále reagují s izokyanáty za vzniku močovinových vazeb, čímž dochází k dodatečnému zesíťování systému. Výsledkem je vznik nových reaktivních míst a zesílené polymerní síť v oblasti rozhraní, což přispívá ke zvýšení mechanické pevnosti a odolnosti spoje vůči vlhkosti (Zhang et al., 2018). Již existuje mnoho výzkumů a prací, jak zlepšit pevnost a kvalitu lepeného spoje

kombinací standardně průmyslově vyráběných lepidel s různými aditivy (Bockel et al., 2019).

Studie ukazují, že spolehlivost a strukturální pevnost lepených nosníků do značné míry závisí na tom, jaký typ lepidla výrobce zvolil. To je důvod, proč se dnes pro lepení lamel u lepených nosníků používají lepidla EPI. Emulzní polymerní izokyanátová lepidla (EPI) jsou dvousložkové lepicí systémy sestávající z emulzí na vodní bázi vytvrzovaných izokyanátovým síťovacím činidlem. První lepidla EPI vznikla v Japonsku v druhé polovině dvacátého století. Jednalo se o nejvíce používané lepidlo (Pagel & Luckman, 1984; Qiao et al., 2000; Hu et al., 2006). Grøstad (2012) a Pagel & Luckman (1984) uvádí, že tato lepidla se vyznačují velmi dobrou přilnavostí k většině dřevin a mohou také lepit dřevo na kov, např. hliník se dřevem. Lepidla EPI jsou vytvrzována za studena, mohou však být vytvrzována i za zvýšené teploty či pomocí vysoko-frekvenčního ohřevu. Vyznačují se rychlým vytvrzováním i při pokojové teplotě, mají světlou barvu, nízké dotvarování a vysokou odolnost proti teplu a vlhkosti. Typickým využitím je výroba masivních dřevěných panelů různých typů, nosných konstrukcí (glulamových trámů, I-nosníků apod.) (Gruber & Powell, 1986). Grøstad & Bredesen (2014) ve své práci popisují vlastnosti lepidel EPI, a aktuální stav používání EPI v lamelovém dřevě. Z uvedených poznatků je patrné, že pro křížem vrstvené dřevo (CLT) lze použít systémy s nízkou viskozitou lepicí směsí. Díky rychlému nastavování a vysoké flexibilitě s ohledem na metody vedoucí ke zlepšení aplikačního procesu (vlhkost a teplota) se ukázalo, že systémy jsou pro budoucí výrobní linky velmi slibné. Nízké rozprostření lepidla ve srovnání s kondenzačními pryskyřicemi, činí lepicí systémy EPI cenově konkurenceschopnými nebo dokonce cenovými vůdci. Bila et al. (2021) hodnotili kvalitu dřevěných panelů z méně používaných exotických dřevin u kterých byly lepeny pouze okraje. Použita byla EPI a PVAc lepidla. Výzkum prokázal, že EPI lepidlo vykazovalo lepší vlastnosti ve srovnání s PVAc lepidly D3 a D4. EPI lepidla mají ojedinělou vlastnost v tom, že přísada na bázi emulze může být smíchána tak, aby při měření vykazovala nižší hodnoty skelného přechodu (T_g) a s tím spojenou minimální teplotu formování filmu (MFFT), což zjednoduší vytvoření kvalitního lepidlového filmu při optimálních teplotách. Díky tomuto bude u lepené spáry dosaženo vysoké odolnosti proti vysokým teplotám a vlhkosti. Skelný přechod bude pak vykazovat vyšší hodnoty z důvodů izokyanátových zesíťovacích reakcí. Do této doby se jen málo výzkumů zabývalo výzkumem T_g u emulzí,

kteřé následně měly vliv na T_g lepené spáry. Qiao et al. (2000) otestovali strukturální lepidla na dřevo na bázi poly (vinyl-acetát) a na bázi polymerů/izokyanátů (EPI). Změny teplot T_g vytvrzovaných emulzí ve vztahu k nemodifikované poly (vinyl-acetát) emulzi byly měřeny pomocí diferenční skenovací kalorimetrie (DSC), indikují změny chemické struktury vyplývající z modifikace poly (vinyl-acetát) emulze. Výsledky zkoušek výkonnosti jsou interpretovány na základě viskoelastického chování lepidlového filmu. K porovnání s izokyanátovými tvrdidly byly ve studii použity jiné typy síťovadel.

V poslední době dochází ke zlepšování účinnosti lepidel, stále častěji jsou vyvíjena nová lepidla či lepidla různě modifikovaná. Právě modifikací lepidel lze vytvořit spoj, který poskytne maximální pevnost a kvalitu lepeného spoje (Kolar & Müller, 2018). De Avila Bockorny et al. (2016) se svým týmem popsali, jak modifikací TPU lepidla zvýší adhezi. Pro zvýšení adheze byly vyzkoušeny dva procesy předúpravy. Výsledky dvoufázového mokrého mycího procesu, který představoval konvenční postup na bázi rozpouštědla, jenž zahrnuje jak aplikaci rozpouštědla, tak krok separace prášku, byly porovnávány s výkonem jednokrokového suchého plazmového procesu. Typ procesu neovlivnil velikost a aglomerační chování částic a oba procesy byly účinné při zlepšování pevnosti spoje podle výsledků testu odlupování. V další studii testoval Hýsek et al. (2018) modifikovaná PU lepidla, v této studii se zaměřili na zvýšení účinnosti lepidel pomocí recyklovaných pěn, respektive jejich částic (velikost částic byla 10 až 40 μm). Pozorovanými vlastnostmi byly kontaktní úhel mezi dřevem a kapkou lepidla a pevnost lepených spojů (pevnost ve smyku). Z výsledků bylo vyvozeno, že kontaktní úhel se zvětšoval s nárůstem



Obr. 19 Mikroskopická analýza SEM - PU lepidlo na dubovém dřevě (Hýsek et al., 2024)

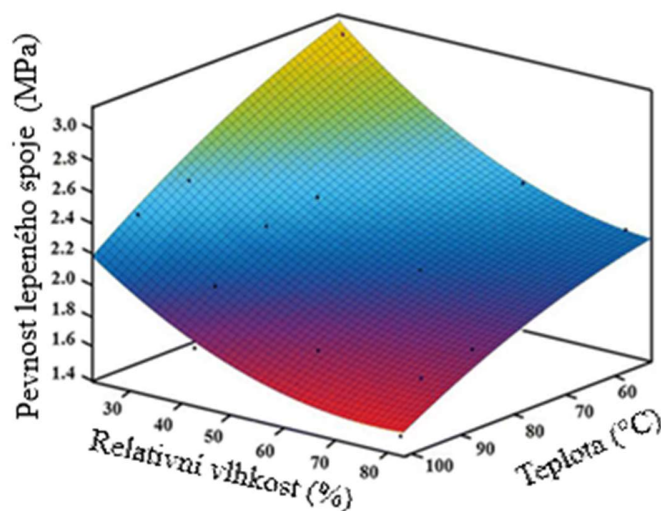
plniva (ve sledovaném rozsahu od 0 % do 15 % plniva). Obsah plniva ovlivnil i pevnost lepených spojů a jejich tepelnou stabilitu. Při kondicionování ve studené vodě pevnost spojů s rostoucím obsahem plniva klesala, zatímco po varu ve vodě naopak vykazovala nárůst. V další publikaci Hýsek et al. (2024) byly testovány nestandardní systémy lepidel pro lepení dřeva, jako jsou prášková lepidla či bikomponentní vlákna. Jako referenční systém byla zvolena polyuretanová lepidla, která při lepení dubového dřeva vykazovala nejvyšší smykovou pevnost. Výsledek skenovací elektronové mikroskopie (SEM) obrázek 19, kde je patrné, že PU lepidlo dokonale proniká do mikroskopické stavby dřeva a vzniká tak pevný mechanický spoj.

3.4.3 Tepelné vlastnosti PUR lepidel

Tepelné vlastnosti polymerních lepidel představují klíčový faktor ovlivňující jejich funkčnost, spolehlivost a dlouhodobé chování v konstrukčních aplikacích. Působení zvýšené teploty může vést ke změnám ve fyzikálním i chemickém uspořádání polymerní struktury, což se následně promítá do mechanických vlastností lepeného spoje konstrukčního materiálu (Lodge & Hiemenz, 2020). Tepelná degradace polyuretanů je primárně způsobena omezenou stabilitou uretanových vazeb ($-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$), které jsou náchylné k termickému štěpení. Při zvýšených teplotách dochází k rozkladu těchto vazeb, což vede k depolymerizaci materiálu a vzniku nízkomolekulárních produktů, jako jsou izokyanáty, alkoholy, aminy, oxid uhličitý a další těkavé sloučeniny (Woods, 1990; Duquesne et al., 2001).

Jedním z klíčových parametrů je teplota skelného přechodu (T_g), která představuje hranici mezi skelným a kaučukovitým stavem polymeru. Pod touto teplotou se materiál chová jako tuhý a křehký, zatímco nad T_g dochází ke zvýšení pohyblivosti polymerních řetězců, což vede ke snížení tuhosti a pevnosti lepidla. V oblasti teplot blízkých T_g tak může docházet k výraznému poklesu mechanických vlastností lepených spojů (Young, & Lovell, 2011). Právě Galvez et al. (2020) se věnovali vlivu teploty na mechanické vlastnosti polyuretanových lepidel, které studovali na spojích různých materiálů. Bylo zjištěno, že jak jednosložková, tak dvousložková lepidla vykazují odlišné chování v závislosti na expozičních podmínkách, přičemž změny teploty ovlivňují jejich pevnost i tvrdost. Analýzy pomocí DSC a infračervené spektroskopie potvrdily, že tyto změny souvisejí s úpravami

struktury polymeru. Přesto si lepidla zachovala dobré vlastnosti pro konstrukční použití i za nepříznivých podmínek. Na tyto poznatky navazují další studie Viana et al. (2017), Na et al. (2018) a Romano et al. (2024), které zdůrazňují kombinovaný vliv teploty a vlhkosti jako klíčových faktorů ovlivňujících chování lepených spojů. Se zvyšující se relativní vlhkostí dochází k lineárnímu poklesu pevnosti spoje, zatímco se zvyšující se teplotou je tento pokles výraznější a má exponenciální charakter. Současně dochází ke snižování tuhosti spojů a ke změnám mechanismu porušení, přičemž vlhkost iniciuje



Obr. 20 Trojrozměrný graf - vliv teploty a vlhkosti na pevnost spoje (Na et al., 2018).

přechod mezi typy porušení a zvýšená teplota tento proces dále podporuje. Tyto výsledky potvrzují významný vliv hygro-termálních podmínek na degradaci mechanických vlastností polyuretanových lepených spojů. Trojrozměrná odezvová plocha na obrázku 20 znázorňuje závislost pevnosti lepeného spoje na teplotě a relativní vlhkosti. Z grafu je patrné, že se zvyšující se teplotou i relativní vlhkostí dochází k postupnému poklesu pevnosti spoje. Nejvyšší hodnoty pevnosti jsou dosaženy při nízkých teplotách a nízké vlhkosti, zatímco nejnižší pevnosti odpovídají kombinaci vysoké teploty a vysoké relativní vlhkosti.

Při dalším zvyšování teploty dochází k tepelnému rozkladu polyuretanového systému. Tento proces probíhá zpravidla ve dvou stupních, přičemž první je spojen s rozkladem uretanových vazeb (přibližně v rozmezí 200–300 °C) (Chattopadhyay & Webster, 2009) a druhý s degradací polyolové složky

(cca 350–500 °C). Tepelný rozklad je doprovázen vznikem nízkomolekulárních produktů, jako jsou oxid uhličitý, oxid uhelnatý, aminy či aromatické sloučeniny (Montaudo, 1984; Zhang et al., 2009).

Zvýšená teplota vede ke snížení mechanických vlastností polyuretanových lepidel v důsledku změn v jejich polymerní struktuře a poklesu tuhosti. Při návrhu lepených konstrukčních prvků je proto nutné zohlednit citlivost těchto lepidel na teplotní zatížení.

3.5 Konstrukční lepené lamelované dřevo

Konstruované výrobky ze dřeva představují konstrukční kompozity, které se významně uplatňují ve stavebnictví. Jejich mechanické a fyzikální vlastnosti jsou ovlivněny zejména kvalitou vstupní suroviny, výrobním procesem a způsobem konečného použití (Lam, 2001).

Lepené lamelové dřevo se v Evropě začalo používat koncem 19. století. Tento materiál je tvořen lamelami řeziva, které jsou vzájemně spojeny lepidlem tak, aby vlákna jednotlivých lamel probíhala rovnoběžně s podélnou osou prvku (obrázek 21). Lepené lamelové dřevo se běžně vyrábí z řeziva s obsahem vlhkosti přibližně 10–16 %. Jeho pevnostní charakteristiky dosahují výrazně vyšších hodnot v podélném směru než ve směru příčném (Issa & Kmeid, 2005). Ve srovnání s masivním dřevem vykazuje lepené lamelové dřevo příznivější mechanické vlastnosti a současně umožňuje efektivnější využití kulatiny vytěžené z lesa (Derkowsky et al., 2022). Použití masivních dřevěných hranolů ve stavebnictví je do určité míry omezeno především výskytem přirozených vad dřeva



Obr. 21 Lepené lamelové dřevo (LIGNAU, 2026)

a limitními rozměry dostupné kulatiny. U větších průřezů se mohou výrazněji projevovat nedostatky související se sesycháním a borcením, případně s výskytem suků a trhlin. Tyto faktory mohou negativně ovlivňovat mechanické vlastnosti materiálu i estetický vzhled jeho povrchu (Council, 1991). Rozvoj zpracovatelských technologií umožňuje kvalitnější přípravu a sušení řeziva, stejně jako vyřezávání vadných či poškozených částí materiálu (Ross, 2010; Rowell, 2005). Díky tomu je možné vyrábět konstrukční dřevěné prvky s příznivějšími mechanickými vlastnostmi a zároveň efektivněji zhodnocovat dřevní hmotu (Guitard, 1994). Materiály určené pro nosné stavební konstrukce, vyráběné převážně z hranolů, fošen nebo lamel, lze obecně označit jako konstrukční dřevo.

Z hlediska technických požadavků je nutné jednotlivé konstrukční výrobky ze dřeva rozlišovat nejen podle jejich skladby a výrobního postupu, ale také podle příslušného normového zařazení. Lepené lamelové dřevo, označované také jako glulam, případně v německé terminologii jako BSH (Brettschichtholz), je vymezeno normou EN 14080 (2013). Tato norma je v jednotlivých členských státech převzata jako národní norma, například v České republice jako ČSN EN 14080 (2013) a v Německu jako DIN EN 14080 (2013). Norma stanovuje požadavky na lepené lamelové dřevo, lepené rostlé dřevo, lepené lamelové dřevo s velkými zubovitými spoji a složené, resp. blokově lepené, lepené lamelové dřevo určené pro použití v pozemních stavbách a mostech. Současně specifikuje minimální výrobní požadavky, zásady posuzování shody a požadavky na značení těchto lepených výrobků ze dřeva.

Konstrukční výrobky ze dřeva zahrnují několik materiálových skupin, které se liší skladbou, způsobem výroby i normovým zařazením. K nejčastěji používaným patří konstrukční masivní dřevo, v praxi často označované jako KVH, lepené lamelové dřevo, označované také jako BSH nebo glulam, dvouvrstvé a třívrstvé lepené konstrukční prvky a atypické velkorozponové lepené konstrukce.

3.5.1 Využití dubového dřeva do konstrukčních prvků staveb

V současné době roste zájem o průmyslově vyráběné konstrukční výrobky ze dřeva, které mohou v některých aplikacích částečně nahrazovat materiály s vyšší environmentální zátěží, zejména beton a ocel. Na trhu dlouhodobě dominují konstruované dřevěné výrobky vyráběné

převážně z jehličnatých dřevin, zejména ze smrku, borovice nebo jedle (Thormark, 2006). Vedle environmentálních aspektů je významným důvodem využívání dřeva také jeho estetická hodnota, přirozený vzhled a pozitivní vnímání v architektonických aplikacích (Gaston, 2014; Gosselin et al., 2017).

Dubové dřevo představuje z hlediska konstrukčního využití perspektivní listnatou dřevinu. Vyznačuje se vysokou hustotou, příznivými mechanickými vlastnostmi, výraznou kresbou a přirozenou odolností vůči některým biotickým i abiotickým vlivům. Díky těmto vlastnostem může být vhodné pro nosné konstrukční prvky, u nichž je kromě únosnosti požadována také estetická kvalita povrchu, například u konstrukcí koncertních a sportovních hal, sakrálních staveb nebo reprezentativních veřejných objektů (Xu & Li, 2021; Boguszevska et al., 2025). Ve srovnání se smrkovým dřevem má však dub vyšší hustotu, vyšší obsah extraktivních látek a specifickou anatomickou stavbu. Tyto charakteristiky mohou negativně ovlivňovat smáčivost povrchu, penetraci lepidla a interakci lepidla s buněčnou stěnou, což se může projevit sníženou kvalitou a pevností lepeného spoje (Gall et al., 2025).

Možnosti využití dubového dřeva v lepených konstrukčních prvcích byly předmětem několika experimentálních studií. Shedlauskas et al. (1996) se zabývali vývojem kombinovaných lepených lamelových nosníků z červeného dubu s cílem dosáhnout návrhové pevnosti v ohybu 16,5 MPa a modulu pružnosti 12,4 GPa. V rámci výzkumu bylo hodnoceno 30 nosníků ve dvou rozměrových variantách. Cílem bylo ověřit použitelnost postupů podle normy ASTM D3737 (2018) pro predikci návrhového napětí a tuhosti lepených lamelových nosníků a současně posoudit navrženou rovnici zohledňující objemový účinek. Výsledky ukázaly, že postup podle ASTM D3737 (2018) může být použit pro uspokojivou predikci pevnosti a tuhosti lepených lamelových nosníků z červeného dubu.

Problematikou lepených spojů u listnatých dřevin se zabývali také Morin-Bernard et al. (2020). Jejich výzkum byl zaměřen na posouzení pevnosti lepeného spoje mezi lamelami dřeva za suchých a vlhkých podmínek u zkušebních sestav vyrobených z různých druhů listnatého dřeva a lepených pomocí konstrukčních lepidel. Výsledky ukázaly, že za suchých podmínek dosahovalo dubové dřevo průměrné pevnosti ve smyku 20,5 MPa, což představovalo nejvyšší hodnotu ze sledovaných listnatých dřevin. Volba

lepidla neměla za suchých podmínek zásadní vliv na pevnost ve smyku, avšak rozdíly mezi lepidly se výrazněji projevily při hodnocení ve vlhkém prostředí. Dlouhodobým chováním lepených lamelových nosníků z červeného dubu se zabývali Manbeck et al. (1999), kteří v rámci pětiletého experimentu sledovali chování podélných lepených lamelových nosníků použitých v mostní konstrukci. Výsledky zatěžovacích zkoušek ukázaly dobrou shodu mezi předpokládanými a experimentálně zjištěnými průhyby. Při použití tuhosti jednotlivých lamel jako prediktoru se vypočtené a pozorované průhyby lišily přibližně o 7 %. Současně bylo zaznamenáno zvýšení tuhosti konstrukce v důsledku spolupůsobení mezi mostovkovým panelem a podélnými nosníky, což potvrzuje význam správného zohlednění kompozitního působení v návrhu dřevěných konstrukcí. Studii lepených lamelových prvků z dubového dřeva (*Quercus robur*) se věnovali i Báder et al. (2025) a prokázali, že použití dýhové výztuže na tahové straně průřezu může výrazně zlepšit jejich ohybové vlastnosti. Zatímco dvouvrstvé a třívrstvé prvky dosahovaly pevnosti v ohybu 59,0–63,7 MPa, čtyřvrstvé a pětivrstvé konfigurace dosáhly přibližně 80 MPa. Statický modul pružnosti se pohyboval v rozmezí 11,2–12,1 GPa. Výsledky ukazují potenciál využití dubového dřeva nižší jakosti pro konstrukční lepené prvky. Fahrni et al. (2019) se zabývali požárními zkouškami lepených lamelových nosníků, u nichž byly předem určeny lokální mechanické vlastnosti materiálu, včetně polohy suků, oslabených míst, zubovitých spojů, hustoty a pevnostních charakteristik. Autoři ukázali, že vyhodnocení požární odolnosti lepeného lamelového nosníku je ovlivněno nejen rozměrem průřezu a postupem zuhelnatění, ale také lokálními nehomogenitami dřeva a skutečným rozložením mechanických vlastností v nosníku.

Uvedené studie potvrzují, že dubové dřevo má potenciál pro využití v nosných lepených konstrukčních prvcích. Současně je však nutné zdůraznit, že technologická a návrhová omezení nejsou specifická pouze pro dubové dřevo, ale obecně se týkají lepených dřevěných konstrukčních prvků. V případě dubu mohou být tato omezení výraznější zejména vzhledem k jeho anatomické stavbě, vyšší hustotě, obsahu extraktivních látek a odlišnému chování při lepení. Zásadní pozornost je proto nutné věnovat kvalitě lepeného spoje, vlhkostním podmínkám, volbě vhodného lepidla, pevnostnímu třídění lamel a dlouhodobému chování prvků při mechanickém i environmentálním zatížení.

3.5.2 Konstrukční využití listnatého dřeva dubu

Dřevo je přírodní konstrukční materiál, který je díky svým fyzikálním, mechanickým a technologickým vlastnostem dlouhodobě využíván v řadě průmyslových odvětví (Bodig & Jayne, 1982). Ve stavebnictví se uplatňuje zejména jako materiál s příznivým poměrem mezi pevností a objemovou hmotností, dobrou opracovatelností a obnovitelným původem. V posledních desetiletích dochází k výraznému rozvoji konstrukčních systémů na bázi dřeva, zejména v souvislosti s využíváním lepeného lamelového dřeva, křížem vrstveného dřeva a dalších konstruovaných výrobků ze dřeva (Dukarska & Mirski, 2023). Význam těchto materiálů dokládá také jejich rostoucí uplatnění ve výškových a vícepodlažních stavbách. Příkladem může být budova Mjøstårnet v norském Brumunddal, která patří mezi nejvýznamnější realizace výškových dřevěných staveb využívajících lepené lamelové a křížem vrstvené prvky (Liven & Abrahamsen, 2023). Dalším příkladem rozvoje vícepodlažních konstrukcí na bázi dřeva je hybridní objekt v kampusu University of British Columbia ve Vancouveru, jehož návrh a konstrukční řešení jsou spojovány s rozvojem moderních dřevěných a hybridních nosných systémů (Tannert & Moudgil, 2017).

Současně se v evropském prostředí zvyšuje zájem o využití listnatých dřevin ve strukturálních aplikacích (Krackler et al., 2011). Tento trend souvisí jednak s dostupností a dosud nedostatečným využitím evropských zdrojů listnatého dřeva, jednak se snahou o podporu druhově pestřejší skladby lesních porostů a vyšší materiálové zhodnocení dřevní suroviny. Mezi perspektivní dřeviny pro konstrukční využití lze řadit například jasan, buk, kaštan a dub (Aicher et al., 2014). Právě u listnatých dřevin je však nezbytné věnovat zvýšenou pozornost experimentálnímu stanovení mechanicko-fyzikálních parametrů, protože jejich vlastnosti jsou ovlivněny anatomicou stavbou, hustotou, vlhkostí, výskytem vad a způsobem technologického zpracování (Kovryga, 2023). Spolehlivé stanovení mechanicko-fyzikálních parametrů konstrukčního dřeva je základním předpokladem pro jeho návrhové použití v nosných konstrukcích. Mezi sledované parametry patří zejména hustota, vlhkost, modul pružnosti, pevnost v ohybu, pevnost v tlaku, pevnost v tahu a smykové vlastnosti (Van de Kulien et al., 2024). Pro konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo jsou zkušební postupy pro stanovení vybraných fyzikálních a mechanických vlastností definovány zejména normou ČSN EN 408+A1 (2012). V případě hodnocení vlivu zvýšené

teploty je nutné zohlednit nejen samotnou úroveň teplotní expozice, ale také dobu působení teploty, vlhkostní stav materiálu a skutečnost, zda je zkouška prováděna přímo za zvýšené teploty, nebo až po následném ochlazení zkušebních těles. Vedle evropské normy ČSN EN 408+A1 (2012) jsou pro stanovení ohybových vlastností konstrukčního dřeva využívány také americké normové postupy, zejména ASTM D198 (2022) a ASTM D4761 (2025). Norma ASTM D198 (2022) je zaměřena na statické zkoušky dřeva a výrobků na bázi dřeva ve skutečných konstrukčních rozměrech. Yang et al. (2015) ji využili při čtyřbodových ohybových zkouškách řeziva borovice (*Pinus elliotii*) pro stanovení statického modulu pružnosti a porovnání s nedestruktivními metodami hodnocení. Norma ASTM D4761 (2025) se používá pro stanovení mechanických vlastností pevnostně tříděného řeziva a dalších konstrukčních materiálů na bázi dřeva, včetně ohybové pevnosti a modulu pružnosti. Kitchens et al. (2016) tuto normu použili při ohybových zkouškách konstrukčního kompozitního dřeva SPSL, které lze v kontextu běžně používaných konstrukčních prvků ze dřeva považovat za nestandardní materiál. Vzorky byly zatěžovány ve třetinách rozpětí za účelem stanovení hodnot MOR a MOE. Jako další používaný zahraniční předpis lze uvést normu ISO 13910 (2014), která zahrnuje zkušební postupy pro stanovení mechanických vlastností konstrukčního dřeva. Studie porovnávající jednoosou tahovou zkoušku a tříbodový ohyb pro stanovení pevnosti v tahu kolmo k vláknům ukázala, že volba zkušební metody může významně ovlivnit výsledné hodnoty. Autoři proto navrhli úpravu vztahu uvedeného v ISO 13910 (2014) pro přesnější vyhodnocení výsledků tříbodové ohybové zkoušky (Nogueira et al., 2024).

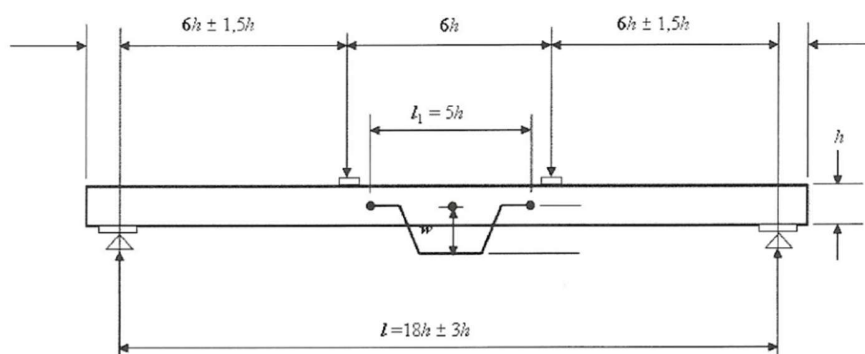
Následující podkapitoly jsou proto zaměřeny na metody stanovení pevnosti a tuhosti konstrukčního dřeva v ohybu, a to nejprve při referenční teplotě a následně za podmínek zvýšené teplotní expozice.

3.5.2.1 Stanovení pevnosti v ohybu bez teplotní expozice

Lepené lamelové dřevo patří mezi významné konstruované výrobky ze dřeva využívané v nosných stavebních konstrukcích. V evropském normovém prostředí jsou požadavky na lepené lamelové dřevo a lepené rostlé dřevo vymezeny normou ČSN EN 14080 (2013). Tato norma se vztahuje především na lepené výrobky ze dřeva vyráběné z jehličnatých dřevin a

topolu. V případě lepeného lamelového dřeva z listnatých dřevin je však problematika normového zařazení, výroby a návrhového využití složitější, neboť tyto materiály vykazují odlišnou anatomickou stavbu, vyšší hustotu a specifické fyzikální i mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu je využití listnatých dřevin ve strukturálních aplikacích dlouhodobě předmětem výzkumu, experimentálního ověřování i technické normalizace.

Rostoucí zájem o konstrukční využití listnatého dřeva souvisí zejména s jeho vysokou hustotou, pevností a potenciálem pro výrobu vysoce únosných konstrukčních prvků. V evropském prostředí se pozornost soustředí především na buk, dub, jasan a další listnaté dřeviny, které mohou představovat alternativu k tradičně používaným jehličnatým druhům. Potenciál bukového dřeva pro stavební aplikace byl v minulosti ověřován v řadě studií zaměřených na mechanické vlastnosti řeziva, lepení lamel a chování lepeného lamelového dřeva z listnatých dřevin (Glos et al., 2004; Frese & Blass, 2005; Glos & Denzler, 2006; Aicher & Ohnesorge, 2011; Cibecchini et al., 2016; Ehrhart et al., 2016a, b; Aicher & Reinhardt, 2007; Ohnesorge et al., 2010; Schmidt et al., 2010; Luedtke et al., 2015). Významné výsledky byly publikovány také pro bukové lepené lamelové dřevo. Ehrhart et al. (2018a) uvádějí, že bukové lepené lamelové dřevo může dosahovat pevnostních tříd až GL 55, tedy charakteristické pevnosti v ohybu 55 MPa, přičemž střední hodnota lokálního modulu pružnosti v ohybu dosahovala přibližně 16 200 MPa. Ve srovnání s běžně používaným lepeným lamelovým dřevem z jehličnatých dřevin, často zařazovaným do pevnostní třídy GL 24, tak listnaté dřeviny představují významný potenciál pro návrh štíhlejších a únosnějších konstrukčních prvků. Vyšší mechanická výkonnost může vést ke zmenšení průřezových rozměrů, efektivnějšímu využití materiálu a rozšíření architektonických možností dřevěných konstrukcí (Brunetti et al., 2020).



Obr. 22 Stanovení pevnosti v ohybu 4bodový ohyb, měření lokálního modulu pružnosti (ČSN EN 408+A1, 2012)

Experimentální stanovení pevnosti v ohybu a modulu pružnosti konstrukčního dřeva se v evropském prostředí provádí podle normy ČSN EN 408+A1 (2012). Norma stanovuje zkušební postupy pro určení vybraných fyzikálních a mechanických vlastností konstrukčního dřeva a lepeného lamelového dřeva, včetně modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu (obrázek 22). Při ohybové zkoušce je zkušební těleso prostě podepřeno a zatěžováno symetricky dvěma břemeny, čímž vzniká oblast konstantního ohybového momentu mezi zatěžovacími body. Toto uspořádání odpovídá čtyřbodové ohybové zkoušce a umožňuje hodnotit chování zkušebního tělesa při namáhání ohybem. Výpočet lokálního modulu pružnosti $E_{m,l}$ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$) je definován dle normovaného vztahu ČSN EN 408+A1 (2012):

$$E_{m,l} = \frac{al(F_2 - F_1)}{16l(w_2 - w_1)} \quad (21)$$

kde $F_2 - F_1$ přírůstek zatížení (N),
 $w_2 - w_1$ přírůstek deformace (mm) - odpovídající $F_2 - F_1$,
 l vzdálenost mezi podpěrami zkušebního stroje (mm),
 I moment setrvačnosti průřezu (mm),
 a vzdálenost mezi působištěm zatížení a nejbližší podporou při ohybové zkoušce (mm).

V rámci stanovení modulu pružnosti v ohybu norma rozlišuje lokální a globální modul pružnosti. Lokální modul pružnosti v ohybu je určován z deformace měřené v oblasti mezi zatěžovacími body, kde působí konstantní ohybový moment a vliv posouvajících sil je minimální. Výhodou této metody je skutečnost, že naměřená deformace odpovídá převážně čistému ohybovému namáhání. Nevýhodou je naopak vyšší citlivost na přesnost měření, správné umístění referenčních bodů, počáteční zakřivení nebo zkroucení zkušebního tělesa a relativně malé hodnoty měřených průhybů (Boström et al., 1996; Solli, 1996; Boström, 1997; Källsner & Ormarsson, 1999; Solli, 2000). Dalším omezením je skutečnost, že lokální modul pružnosti charakterizuje pouze část objemu zkušebního tělesa, a nemusí proto plně vystihovat variabilitu materiálu v celém prvku (Bogensperger et al., 2006).

V této práci je mechanická odezva materiálu hodnocena čtyřbodovou ohybovou zkouškou, při níž byl průhyb vzorku snímán výhradně v jeho středu, tedy v oblasti čistého ohybového momentu. Vzhledem k tomuto uspořádání, které eliminuje vliv poddajnosti zkušebního stavu a smykových deformací v místech podpor, experimentální data definují lokální modul pružnosti. Tomuto metodickému přístupu je striktně přizpůsobena i teoretická část práce a literární rešerše proto obsahuje schéma a výpočtové vztahy výhradně pro lokální modul pružnosti, zatímco globální varianta je z kontextu práce vynechána.

Experimentální hodnocení lepených prvků z dubového dřeva provedli například Tran et al. (2016), kteří se zaměřili na posouzení mechanických vlastností dubového dřeva v kontextu lepených konstrukčních prvků. Autoři provedli destruktivní čtyřbodové ohybové zkoušky lepených nosníků v plném měřítku podle ČSN EN 408+A1 (2012). Výsledky prokázaly příznivé mechanické vlastnosti dvouvrstvých a třívrstvých lepených dubových nosníků, a to z hlediska tuhosti i pevnosti, zejména ve srovnání s odpovídajícími prvky z masivního dřeva. Problematikou čtyřbodového ohybu lepeného lamelového dřeva z listnatých dřevin se dále zabývali Janowiak et al. (1995), Aicher et al. (2014) a Tran et al. (2014). Výzkum lepeného lamelového dřeva z dubu rozvíjeli také Camú & Aicher (2018), kteří odvodili pokročilý výpočetní model založený na metodě rozšířených konečných prvků. Tato metoda je vhodná zejména pro simulaci iniciace a šíření trhlin v heterogenních materiálech. U lepených lamelových nosníků z listnatých dřevin může být lomové chování ovlivněno jak vlastnostmi samotného dřeva, tak vlastnostmi lepených spojů, rozdílnou lomovou energií a lokální variabilitou modulu pružnosti (Lukacevic et al., 2017). Model byl ověřován na základě rozsáhlého souboru experimentálních dat zahrnujících mechanické vlastnosti lamel i výsledky zkoušek lepených lamelových prvků v reálných rozměrech.

3.5.2.2 Stanovení pevnosti v ohybu při zvýšených teplotách emitovaných požárem

U dřevěných konstrukčních prvků je vedle mechanických vlastností při referenční teplotě nezbytné hodnotit také jejich chování při zvýšených teplotách a v podmínkách požáru. Zvýšená teplota ovlivňuje fyzikální, chemické i mechanické vlastnosti dřeva, a tím také únosnost a spolehlivost nosných konstrukčních prvků. Z hlediska návrhu konstrukcí je proto důležité stanovit nejen počáteční mechanické parametry materiálu, ale také jejich změny

v důsledku teplotního namáhání. Požární odolnost dřevěných konstrukcí lze ověřovat experimentálně nebo výpočetně. Požární zkoušky poskytují přímé informace o chování konstrukčních prvků při požární expozici, jsou však časově i finančně náročné. Z tohoto důvodu se v inženýrské praxi často využívají zjednodušené výpočetní modely, které umožňují posoudit únosnost dřevěných prvků v požární situaci (Schaffer, 1984; Šejna et al., 2025). Simulace chování dřevěných prvků při požáru obvykle využívají efektivní materiálové vlastnosti, které zahrnují vliv degradace dřeva, tvorby zuhelnatělé vrstvy, rozvoje trhlin a změn probíhajících v průřezu prvku v důsledku teplotního zatížení (Schmid et al., 2012; Šejna et al., 2022).

Pro návrh dřevěných prvků vystavených standardnímu požáru je v Eurokódu 5 používána metoda redukovaného průřezu, označovaná jako RCSM (reduced cross-section method) (Friquin, 2011; Schmid et al., 2015). Tato metoda je součástí normy ČSN EN 1995-1-2 (2006) a vychází z předpokladu, že účinný průřez prvku lze stanovit odečtením zuhelnatělé vrstvy a vrstvy s nulovou pevností od původního průřezu. Takto stanovený efektivní průřez je následně posuzován podle běžných návrhových postupů pro dřevěné konstrukce. Metodu redukovaného průřezu lze použít pro posouzení různých způsobů namáhání, například ohybu, tlaku, tahu nebo vzpěru, pokud jsou splněny předpoklady dané normovým postupem (König, 2004; Lange et al., 2015). Metoda redukovaného průřezu byla původně navržena pro posuzování jednoduše podepřených lepených lamelových nosníků vystavených požáru (Schaffer, 1986). Při jejím převzetí do normového prostředí byla dále zjednodušena a rozšířena pro širší oblast použití u dřevěných konstrukčních prvků. V současné době představuje jeden ze základních zjednodušených přístupů pro ověřování únosnosti dřevěných prvků v požární situaci. Její výhodou je zejména relativní jednoduchost, přehlednost a praktická použitelnost při inženýrském návrhu.

Použitelnost metody redukovaného průřezu byla předmětem řady studií, které porovnávaly výsledky zjednodušených výpočtů s numerickými simulacemi a experimentálními daty (Schmid et al., 2010; Klippel et al., 2012). Tyto studie ukazují, že přesnost metody může být ovlivněna zejména způsobem namáhání, průřezovými rozměry prvku, typem dřeva, použitým lepidlem a charakterem požární expozice.

Z tohoto důvodu je při aplikaci metody vhodné zohlednit její zjednodušující předpoklady a interpretovat výsledky s ohledem na konkrétní podmínky posuzovaného konstrukčního prvku

(Pečenko et al., 2024).

Tato skutečnost je významná zejména proto, že mechanické vlastnosti dřeva se obecně snižují s rostoucí teplotou. Tepelná expozice vede ke změnám v chemické struktuře hlavních složek dřeva, zejména hemicelulóz, celulózy a ligninu, což se následně projevuje poklesem pevnosti a tuhosti. Podle Estevese & Pereiry (2009) a Gaffa et al. (2019) může po tepelné úpravě při teplotě přibližně 220 °C dojít k výraznému poklesu pevnosti v ohybu. Kačíková et al. (2013) uvádějí rychlý pokles pevnosti v ohybu již při teplotách okolo 160 °C, zatímco výraznější pokles modulu pružnosti byl pozorován při vyšších teplotách, přibližně okolo 220 °C. Winandy & Rowell (2005) považují z hlediska dlouhodobého působení teploty za bezpečnější oblast teploty pod přibližně 65 °C, při nichž ještě nedochází k výrazné teplotní degradaci mechanických vlastností dřeva. Působení zvýšené teploty ovlivňuje také fyzikální vlastnosti dřeva, zejména hustotu, vlhkostní stav, rozměrovou stabilitu a schopnost bobtnání a sesychání (Yildiz et al., 2006; Buchanan & Abu, 2017). Tyto změny souvisejí s odpařováním vody, tepelným rozkladem dřevních polymerů a při vyšších teplotách také s tvorbou zuhelnatělé vrstvy. V podmínkách požáru má zuhelnatělá vrstva významnou ochrannou funkci, protože zpomaluje přenos tepla do neporušeného jádra průřezu. Současně však dochází ke zmenšení účinného průřezu a k postupné degradaci mechanických vlastností zbývajících částí prvku. Právě tyto jevy jsou podstatné při návrhovém posuzování dřevěných prvků za požáru, neboť přímo ovlivňují velikost efektivního průřezu a mechanické vlastnosti materiálu uvažované ve výpočtu.

Vliv požární expozice na zbytkové mechanické vlastnosti lepeného lamelového dřeva byl předmětem řady experimentálních studií. Kačíková et al. (2020) se zabývali hodnocením vlivu ohně na zbytkové mechanické vlastnosti lepeného lamelového dřeva. Qin et al. (2021) zkoumali chování dřevěných prvků při zvýšených teplotách v kombinaci se čtyřbodovými ohybovými zkouškami. Autoři poukázali na skutečnost, že kombinované působení trvalého zatížení a termomechanického namáhání způsobeného požárem může urychlovat porušení konstrukčního prvku. Experimentálními zkouškami malých i velkorozměrových vzorků

konstrukčního dřeva vystavených požáru se zabýval také Menis (2012). Zkušební tělesa byla vystavena působení ohně z jedné nebo více stran a současně různým typům a úrovním mechanického zatížení. Výsledky experimentů byly porovnávány s výpočtovými postupy podle Eurokódu 5. Na základě tohoto porovnání bylo konstatováno, že vztahy uvedené v Eurokódu 5 mohou poskytovat poměrně přesné předpovědi chování dřevěných prvků při požární expozici, pokud jsou správně zohledněny okrajové podmínky zkoušky a charakter zatížení (Wiesner et al., 2019). Klippel & Frangi (2017) provedli rozsáhlé zkoušky zaměřené na vliv různých typů lepidel na chování lepených lamelových nosníků při současném mechanickém zatížení a požární expozici. Výsledky požárních zkoušek a navazujících numerických analýz ukázaly, že u lepeného lamelového dřeva namáhaného ohybem je vhodné věnovat pozornost vlivu tloušťky vrstvy s nulovou pevností. Norma EN 1995-1-2 (2007) uvažuje pro tuto vrstvu konstantní hodnotu $d_0 = 7$ mm, která je používána ve standardních návrhových postupech. Některé studie však upozorňují, že vhodnost této hodnoty může záviset na typu prvku, způsobu namáhání, průběhu požární expozice a použitém lepidle (Klippel et al., 2012; Klippel & Frangi, 2017).

V návaznosti na návrhové posuzování je nutné rozlišovat mezi výpočtovým stanovením požární odolnosti a experimentálním ověřením chování prvku při teplotní expozici. Pro stanovení pevnosti v ohybu je rozhodující mechanický zkušební postup, zatímco podmínky požární nebo teplotní expozice musí být definovány samostatně, zejména s ohledem na průběh teploty, charakter zkušební pece a způsob měření teplotního namáhání. V tomto kontextu je pro práci relevantní také norma ČSN EN 13381-7 (2019), která stanovuje zkušební postupy pro hodnocení příspěvku k požární odolnosti nosných dřevěných prvků a může být využita pro vymezení podmínek požární expozice, zkušebního uspořádání a následného výpočtového vyhodnocení. Její použití je proto vhodné chápat jako doplněk k mechanickému hodnocení pevnosti v ohybu při zvýšené teplotě, nikoli jako normu určující samotné stanovení mechanických vlastností dřeva.

3.6 Vliv zvýšených teplot na vlastnosti konstrukčního lepeného dřeva

Pro posouzení vlivu zvýšených teplot na pevnost konstrukčního dřeva je nezbytné vycházet z teorie hoření. Hoření je exotermická reakce doprovázená vývojem tepla a světla. Při této reakci se látka zahřátá na zápalnou teplotu rozkládá a uvolňuje hořlavé plyny, které reagují s kyslíkem za vývoje



Obr. 23 Trojúhelník hoření (RSBP spol. s r.o., 2026)

tepla. Uvolněné teplo následně ohřívá další materiál a podporuje pokračování hoření (Kačík et al., 2007). Hoření vzniká a probíhá vždy za určitých podmínek. Jejich základní vyjádření představuje trojúhelník hoření, který zahrnuje tři elementární složky: hořlavou látku, oxidační prostředek

a iniciační zdroj (obrázek 23). Pro hoření je podstatné, aby všechny složky byly přítomny v dostatečné míře. Mezi tyto složky patří:

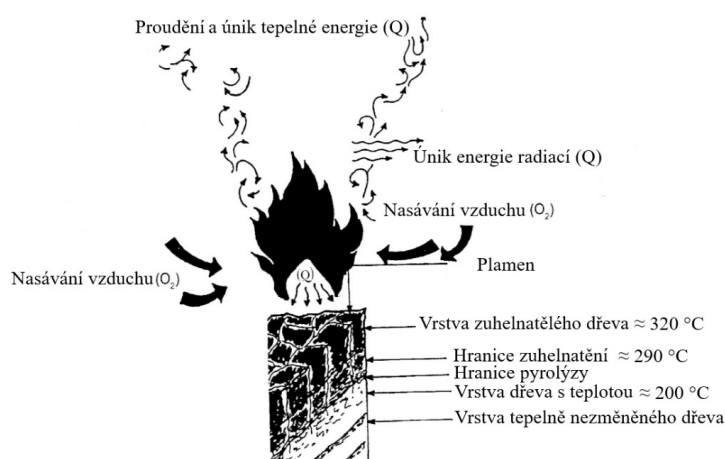
- Hořlavá látka (palivo), která se může vyskytovat v kapalném, plynném či pevném stavu. Spektrum paliv, kterých se to týká, je velmi široké. Od nejjednodušších plynných uhlovodíků (methan, ethan) až po pevné látky s vysokou molekulovou hmotností a velkou chemickou složitostí (přírodní celulóza či umělé polyuretany) (Mullerova, 2018).
- Oxidačním prostředkem je nejčastěji kyslík, popřípadě jiné oxidačně účinné prvky a sloučeniny.

- Iniciační zdroj může být obecně jakýkoliv zdroj s dostatečnou mírou pro iniciaci konkrétní látky či směsi za daných podmínek např. horký povrch, plameny a horké plyny, jiskry v případě tření dvou těles o sebe, elektrická zařízení a další (Kaltschmitt et al., 2016).

Po mnoho let byl proces hoření popisován pomocí trojúhelníku hoření. Další výzkumy však ukázaly, že nezbytnou součástí ohně je i čtvrtý prvek, kterým je chemická řetězová reakce (Kumar, 2022). Z tohoto důvodu byl koncept rozšířen na tetraedr hoření, označovaný také jako Fire Tetrahedron (obr. 23). Aby mohlo dojít k požáru, musí být přítomny všechny čtyři složky; odstranění kterékoliv z nich vede k přerušení hoření (Jamadar et al., 2021).

Exotermická chemická řetězová reakce v materiálu, tato řetězová reakce představuje klíčový mechanismus udržování hoření, probíhající v plynné fázi za účasti vysoce reaktivních radikálových částic ($H\cdot$, $O\cdot$, $OH\cdot$). Tyto radikály vznikají v důsledku tepelného rozkladu. Dochází tak k propagaci reakce, která je schopna se samovolně udržovat bez dalšího externího přívodu energie, jinými slovy tento mechanismus umožňuje pokračování hoření a jeho stabilitu (Kotilainen, 2000).

Při narušení podmínek hoření různými fyzikálními a chemickými metodami dochází ke zpomalení plamenného hoření a k preferenci tvorby dřevěného uhlí. Vznikající zuhelnatělá vrstva působí jako přirozená bariéra a současně jako retardér hoření (Reinprecht, 2008). Proces hoření dřeva je schematicky znázorněn na obrázku 24. Proces hoření dřeva a materiálů na bázi dřeva lze rozdělit do tří etap: iniciace, propagace a terminace.



Orb. 24 Mechanismus hoření dřeva (Reinprecht, 2008)

Etapa 1: Iniciace – zapálení dřeva

Dřevo se v přítomnosti kyslíku zapálí tehdy, když se v jeho blízkosti nachází dostatečně silný tepelný zdroj. Tento zdroj musí dodat určitý tepelný tok na jednotku plochy ($P/A \approx 10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Požadovaný tepelný tok je závislý na typu zdroje, např. sálavý musí být o 100–150 % vyšší než při působení plamene. Teplota zapálení (vznícení při sálání či vzplanutí při plameni) se běžně pohybuje v rozmezí 200 až 400 °C. Na tuto teplotu mají vliv faktory, jako jsou: doba ohřevu, vlhkost dřeva, poměr povrchu k objemu, drsnost povrchu a hustota dřeva (Chrebet & Balog 2010).

Etapa 2: Propagace – šíření plamene a hoření dřeva

Nejrychleji se plamen šíří po povrchu suchého dřeva s nízkou hustotou a drsným povrchem. Samotná rychlost hoření je ovlivněna vnitřními vlastnostmi dřeva a vnějšími podmínkami, přičemž v počáteční fázi hraje hlavní roli vnější zdroj energie (Kačíková et al., 2006). V rozvinuté fázi hoření se hlavním zdrojem tepla stává samotný hořící materiál, který exotermními reakcemi podporuje další průběh hoření. Samotné dřevo neshoří okamžitě na popel, ale odhořívá postupně a na povrchu se tvoří zuhelnatělá vrstva tak, jak je vidět na obrázku 24. Norma ČSN EN 1995-1-2 (2006) definuje zuhelnatělou vrstvu, nebo také jako hloubku zuhelnatění, jako vzdálenost mezi vnějším povrchem původního prvku a polohou čáry zuhelnatění. Tloušťku zuhelnatělé vrstvy lze stanovit na základě doby expozice požáru a odpovídající rychlosti zuhelnatění pro daný druh dřeva. Poloha rozhraní zuhelnatění se přitom uvažuje jako poloha izotermy o teplotě 300 °C. Hloubka zuhelnatění dřeva d_{char} (mm) je tedy lineárně závislá na čase expozice hoření a je dána vztahem dle normy ČSN EN 1995-1-2 (2006):

$$d_{char} = \beta_0 \cdot \tau \quad (22)$$

kde β_0 jednorozměrná rychlost zuhelnatění ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) – normovaný požár,

τ doba vystavení účinku (min).

Samotná rychlost odhořívání je závislá na čase a druhu (hustotě) dřeva, není tedy konstantní po celou dobu hoření, i když z hlediska výpočtu definovaného normou se rychlost zuhelnatění zjednodušuje. Např. smrkové dřevo ($\rho = 350\text{--}440 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) vykazuje hodnoty

	β_0 [mm/min]	β_n [mm/min]
a) Dřevo jehličnatých dřevin a buk Lepené lamelové dřevo s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ Rostlé dřevo s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,65	0,7 0,8
b) Dřevo listnatých dřevin Rostlé nebo lepené lamelové dřevo listnatých dřevin s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ Rostlé nebo lepené lamelové dřevo listnatých dřevin s charakteristickou hustotou $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,50	0,7 0,55
c) LVL s charakteristickou hustotou $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Desky Dřevěné obložení Překližka Desky na bázi dřeva jiné než překližky	0,9 ^a 1,0 ^a 0,9 ^a	– – –
^a Hodnoty platí pro charakteristickou hustotou 450 kg/m^3 a tloušťku desky 20 mm; pro ostatní tloušťky a hustoty viz 3.4.2(9).		

Obr. 25 Návrhové rychlosti zuhelnatění (ČSN EN 1995-1-2, 2006)

$\beta_0 \approx 0,65 - 0,8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, ale u dubu ($\rho \approx 700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) dochází k pomalému odhořívání $\beta_0 \approx 0,50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. U lepených konstrukčních materiálů může být rychlost odhořívání ovlivněna typem lepidla. Neopomenutelný vliv mají i další faktory, jako jsou tloušťka materiálu či tepelná vodivost. Obrázek 25 uvádí návrhové rychlosti zuhelnatění β_0 a β_n pro různé druhy dřevěných materiálů podle jejich typu a charakteristické hustoty, přičemž u listnatého dřeva s vyšší hustotou $\rho_k \geq 450 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ jsou uvažovány nižší hodnoty rychlosti zuhelnatění (ČSN EN 1995-1-2, 2006).

Etapa 3: Terminace – dohořívání dřeva (žhnutí)

Dohořívání představuje závěrečnou fázi hoření, spojenou s rozkladem zuhelnatělé vrstvy. Tato vrstva má přibližně 20 % původní hustoty a nízkou tepelnou vodivost. Proces žhnutí je charakterizován dvoustupňovou oxidací uhlíku, kdy dochází k přeměně $\text{C} \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$. Nad povrchem neshořelého dřeva vzniká zuhelnatělá vrstva, která působí jako retardér hoření. Tento aspekt je patrný z tepelné vodivosti, která je asi šestkrát nižší než u nepoškozeného dřeva. Pokud by došlo k odstranění této vrstvy, tak se celý proces (*iniciace – propagace – terminace*) opakuje (Osvald et al., 2009).

3.6.1 Termická degradace dřeva a chemické změny jeho hlavních složek

Zvýšená teplota iniciuje změny fyzikálních, chemických i strukturních vlastností dřeva, přičemž jejich rozsah je dán teplotou a dobou působení (Hill et al., 2021; Li et al., 2021). Již při teplotách do 100 °C dochází především k úbytku hmotnosti v důsledku odpařování volné a vázané vody. V širším rozmezí 20–150 °C tak probíhá zejména sušení dřeva, zatímco při vyšších teplotách se postupně uplatňují chemické degradační procesy. V teplotním intervalu 180–250 °C, typickém pro termickou modifikaci (např. Thermowood při 180 a 210 °C), dochází k výrazným změnám chemického složení. Při teplotách nad 250 °C se aktivují procesy vedoucí k zuhelnatění a vzniku oxidu uhličitého a dalších pyrolytických produktů.

Hemicelulózy jsou nejméně tepelně stabilní složkou dřeva a degradují jako první, a to již při relativně nízkých teplotách. Jejich rozklad je iniciován deacetylací, při níž vznikající kyselina octová snižuje pH prostředí a katalyzuje depolymerizační štěpení polysacharidových řetězců. Současně se štěpí glykosidové i některé C–C vazby, což vede ke snižování stupně polymerace a současnému zvýšení polydisperzity (Kubovský et al., 2020). S rostoucí teplotou dochází k úbytku jednotlivých sacharidů, přičemž kolem 230 °C již probíhá jejich výrazná degradace. Experimentálně bylo potvrzeno, že obsah hemicelulóz se při tepelné úpravě výrazně snižuje (až o cca 58,85 %), což má přímý dopad na mechanické vlastnosti dřeva (Sikora et al., 2018; Čabalová et al., 2018).

Celulóza je ve srovnání s hemicelulózami tepelně stabilnější díky své částečně krystalické struktuře. Při tepelném zatížení dochází k odbourávání amorfních oblastí, čímž se zvyšuje krystalinita a snižuje schopnost vázat vodu. V rozmezí přibližně 120–350 °C probíhají procesy termooxidace, dehydratace a depolymerace, které vedou ke snížení stupně polymerace. Při teplotách nad 300 °C se uplatňuje depolymerizace spojená se vznikem levoglukosanu jako hlavního produktu pyrolýzy celulózy, který se při teplotách blížících se 500 °C dále rozkládá na plynné produkty, dehtové látky a pevný zuhelnatělý zbytek. Míra degradace celulózy závisí na teplotě, době expozice a podmínkách prostředí.

Lignin je naopak termicky nejstabilnější složkou dřeva, což souvisí s jeho trojrozměrnou amorfní strukturou. V rozmezí 100–180 °C dochází k jeho plastifikaci, zatímco při vyšších teplotách probíhají chemické reakce spojené s odštěpováním

funkčních skupin (např. $-\text{OH}$, $-\text{OCH}_3$, $-\text{CH}_3$, $-\text{COOH}$) a štěpením vazeb, zejména $\beta\text{-O-}$ 4. V teplotním intervalu 150–300 °C dochází k depolymerizaci ligninu a uvolňování fenolických sloučenin, zatímco při teplotách 300–600 °C pokračuje rozklad štěpením dalších vazeb a současně probíhají kondenzační reakce vedoucí ke vzniku stabilnějších aromatických struktur. To se projevuje relativním nárůstem obsahu ligninu a extraktivních látek po tepelné úpravě (Sikora et al., 2018; Čabalová et al., 2018).

Experimentální studie potvrzují, že tyto chemické změny významně ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Kubovský et al. (2020) prokázali pomocí FTIR spektroskopie a chromatografie výrazné změny v polymerní struktuře dubového dřeva při teplotách 160–210 °C. Čabalová et al. (2018) dále uvádějí pokles obsahu holocelulózy v důsledku degradace glukózových sacharidů a zvýšení obsahu ligninu a extraktivních látek, přičemž změny ve struktuře ligninu vedou ke zvýšení poměru syringylových a guaiacylových jednotek. Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny především degradací hemicelulóz a snížením stupně polymerace celulózy, zatímco vliv změn ligninu je méně výrazný. Se zvyšující se teplotou obecně dochází ke zhoršování fyzikálních a mechanických vlastností, přesto může pevnost v tlaku při určitých teplotách (např. 180 °C) přechodně dosahovat vyšších hodnot, zatímco modul pružnosti nevykazuje výrazné změny.

Z hlediska požární bezpečnosti je významné zejména teplotní rozmezí 100–200 °C, ve kterém dochází k iniciaci degradačních procesů. Bednarek & Griškevičius (2008) uvádějí, že tepelný rozklad dubového dřeva začíná přibližně při 240 °C, přičemž největší hmotnostní úbytek nastává kolem 460 °C po 47 minutách expozice. Mechanické vlastnosti jsou přitom ovlivněny rozdílně. Pevnost v tlaku podél vláken zůstává relativně vysoká, zatímco pevnost v ohybu se s rostoucí teplotou snižuje. Použití dřeva v konstrukcích je proto limitováno požadavky na požární odolnost, zápalnost a šíření plamene (Wall, 2021).

3.6.2. Pyrolýza dřeva

Pyrolýza dřeva představuje proces termického rozkladu organické hmoty probíhající bez přístupu nebo při jeho omezeném přístupu kyslíku (Roberts, 1971). Tento proces navazuje na předcházející termickou degradaci jednotlivých složek dřeva a probíhá při teplotách

přibližně nad 250–300 °C. V důsledku pyrolýzy dochází ke štěpení chemických vazeb a vzniku plyných, kapalných a pevných produktů (Yaman, 2004).

V počáteční fázi pyrolýzy se jedná převážně o endotermický proces, při němž je energie spotřebovávána na rozklad struktury dřeva. S rostoucí teplotou přechází proces do fáze, kdy dochází k uvolňování hořlavých plynů, které mohou následně vstupovat do exotermických reakcí při jejich oxidaci v okolním prostředí. Mezi hlavní produkty pyrolýzy patří plyné složky (např. CO, CO₂, CH₄), kapalně produkty (dehtové látky) a pevný zbytek tvořený uhlíkatou vrstvou (Klass, 1998; Güllü & Demirbaş, 2001).

Vznikající plyny představují klíčový faktor pro rozvoj hoření, neboť jejich uvolňování a následná oxidace jsou hlavním zdrojem tepla při požáru dřevěných konstrukcí. Naopak uhlíkatá vrstva vznikající na povrchu dřeva působí jako tepelně izolační bariéra, která zpomaluje přenos tepla do vnitřních vrstev materiálu a tím omezuje další rozklad (Shafizadeh, 1982).

Rychlost těchto procesů je přitom zásadním parametrem ovlivňujícím průběh odhořívání dřeva. Rychlost pyrolýzy, resp. odhořívání, závisí především na teplotě a materiálových vlastnostech dřeva, zejména hustotě a chemickém složení. Pro její popis se často využívají kinetické modely vycházející z Arrheniovy rovnice, které zohledňují aktivační energii a reakční parametry jednotlivých složek dřeva.

3.6.3 Zohlednění uhlíkaté a pyrolýzní vrstvy při zvýšených teplotách

Z fyzikálního hlediska lze průřez dřevěného prvku vystaveného požáru rozdělit na uhlíkatou vrstvu, tepelně ovlivněnou, resp. pyrolýzní oblast, a dřevo, které nebylo působením zvýšené teploty významně ovlivněno (Schaffer, 1971; Buchanan, 2001). Uhlíkatá vrstva vykazuje velmi nízkou hustotu a její příspěvek k únosnosti průřezu je zanedbatelný. V přilehlé tepelně ovlivněné oblasti dochází v důsledku tepelné degradace polymerních složek dřeva k postupnému poklesu pevnosti a tuhosti (Zickler et al., 2006)

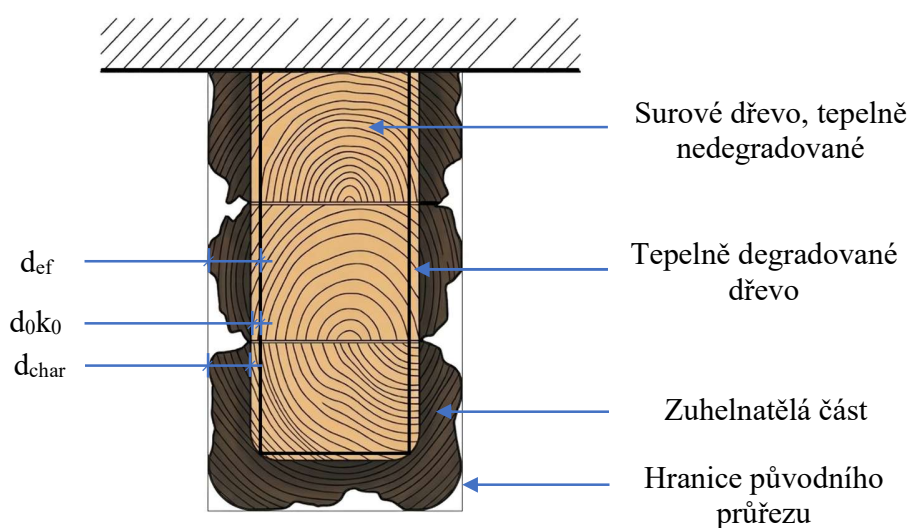
Při zjednodušeném návrhovém posouzení podle metody redukovaného průřezu se skutečný plynulý pokles mechanických vlastností nahrazuje idealizovaným

modelem. Z původního průřezu se odečte návrhová hloubka zuhelnatění a dále fiktivní vrstva s nulovou pevností a tuhostí. Zbývající část se označuje jako účinný průřez a při jeho posouzení lze uvažovat mechanické vlastnosti dřeva při běžné teplotě (obrázek 26). Efektivní hloubka redukce průřezu d_{ef} (mm) se stanoví dle vztahu:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0 \quad (23)$$

kde $d_{char,n}$ nominální návrhová hloubka zuhelnatění (mm),
 k_0 součinitel zohledňující dobu požární expozice (mm),
 d_0 tloušťka vrstvy s předpokládanou nulovou pevností a tuhostí (mm).

Norma ČSN EN 1995-1-2 (2006) uvažuje pro základní tloušťku vrstvy s nulovou pevností hodnotu ($d_0 = 7$ mm). Tato hodnota nepředstavuje skutečně měřenou tloušťku pyrolýzní oblasti, ale zjednodušený návrhový parametr, kterým se zohledňuje snížení pevnosti a tuhosti tepelně ovlivněného dřeva za hranicí zuhelnatění.



Obr. 26 Zbytkový a účinný průřez (ČSN EN 1995-1-2, 2006)

Je proto nutné rozlišovat mezi fyzikální pyrolýzní oblastí a normově definovanou vrstvou s nulovou pevností. Pyrolýzní oblast představuje skutečnou tepelně a chemicky degradovanou část dřeva, v níž se mechanické vlastnosti mění plynule. Naproti tomu vrstva s nulovou pevností je idealizovaný návrhový nástroj používaný v metodě redukovaného průřezu. U prvků opatřených požární ochranou

je počátek zuhelnatění oddálen nebo je rychlost zuhelnatění během chráněné fáze snížena. Po porušení nebo odpadnutí ochranné vrstvy však může následovat období rychlejšího zuhelnatění. Tento průběh je nutné odlišovat od časového vývoje normově uvažované vrstvy s nulovou pevností a zohlednit jej při stanovení návrhové hloubky zuhelnatění a účinného průřezu.

3.6.4 Normová teplotní křivka

Nominální teplotně-časové křivky představují zjednodušený způsob popisu tepelného namáhání konstrukcí při požáru. Vyjadřují časový průběh teploty plynů v okolí konstrukčního prvku, přičemž nezohledňují konkrétní geometrii požárního úseku, množství požárního zatížení, podmínky větrání ani fázi ochlazování. Jejich hlavním účelem je vytvoření jednotných a opakovatelných podmínek pro návrhové posouzení a experimentální stanovení požární odolnosti konstrukčních prvků (ČSN EN 73 0802, 2023).

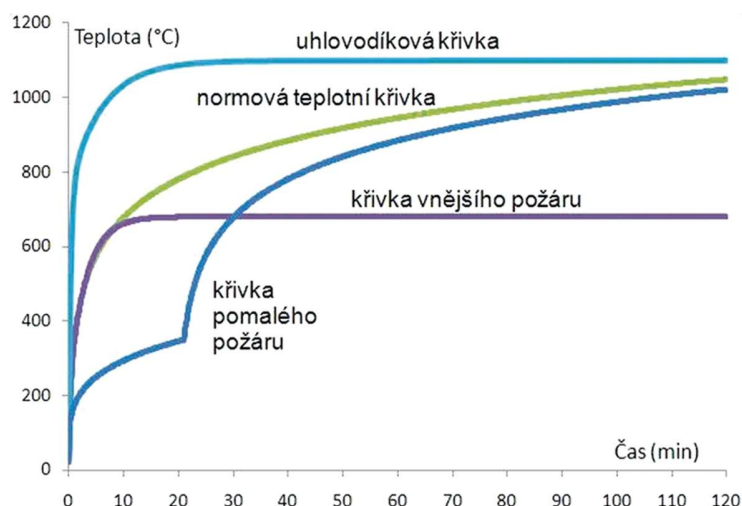
Mezi nominální teplotně-časové křivky patří normová teplotní křivka, uhlovodíková křivka a křivka vnějšího požáru. Jednotlivé křivky se liší rychlostí nárůstu teploty a dosaženou úrovní tepelného namáhání. Uhlovodíková křivka vykazuje velmi rychlý nárůst teploty a je určena zejména pro požáry kapalných uhlovodíků. Křivka vnějšího požáru naopak popisuje mírnější tepelné namáhání vnějších povrchů konstrukcí. Pro běžné požární zkoušky stavebních konstrukcí se nejčastěji používá normová teplotní křivka, která představuje model plně rozvinutého požáru v uzavřeném prostoru (ČSN EN 1363-1, 2021; ČSN EN 13501-2, 2017). Eurokód 1 uvádí normovou, uhlovodíkovou i křivku vnějšího požáru jako nominální modely tepelného zatížení. Normou ČSN EN 1363-1 (2021) definovaná teplotní křivka je dána vztahem:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8 \cdot t + 1) \quad (24)$$

kde θ_g teplota plynu v požárním úseku (°C),
 t čas (min).

Křivka vykazuje prudký nárůst teploty zejména v počáteční fázi požáru. Po 5 minutách dosahuje teplota přibližně 576 °C, po 10 minutách přibližně 678 °C, po 30

minutách přibližně 842 °C a po 60 minutách přibližně 945 °C. Teplota po celou dobu expozice roste a model nezahrnuje fázi dohořívání ani následného ochlazování. Normová křivka proto nepředstavuje přesný průběh konkrétního skutečného požáru, ale standardizované tepelné zatížení umožňující vzájemné porovnání výsledků požárních zkoušek (obrázek 27 – zelená křivka). Standardní požární křivka podle ČSN EN 1363-1 (2021) stanovuje teplotně-časové podmínky pro zkoušky požární



Obr. 27 Teplotní křivky (Konstrukce, 2026)

odolnosti stavebních prvků. Její průběh odpovídá normové teplotní křivce podle ISO 834-1 (1999), která je běžně využívána jako referenční model požárního namáhání konstrukcí (ČSN EN 1991-1-2, 2004; ČSN EN 13501-1, 2017; ČSN EN 1363-1, 2021). Při výpočtu přestupu tepla z plynného prostředí do povrchu konstrukce se pro normovou teplotní křivku uvažuje součinitel přestupu tepla prouděním $\alpha_c = 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ (Khelifa et al., 2024).

V experimentální části této práce byla normová teplotně-časová křivka použita jako řídicí průběh teploty ve zkušební peci. Její použití umožnilo vystavit zkušební tělesa definovanému a reprodukovatelnému tepelnému namáhání a následně vyhodnotit změny pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v závislosti na době a intenzitě požární expozice. Skutečný průběh teploty v peci je proto vhodné porovnat s teoretickým průběhem normové křivky a případné odchylky zohlednit při interpretaci experimentálních výsledků.

3.6.5 Závislost mechanických vlastností dřeva na teplotě

Mechanické vlastnosti dřeva se s rostoucí teplotou snižují, přičemž rozsah tohoto poklesu závisí zejména na druhu dřeva, vlhkosti, době teplotní expozice a způsobu namáhání (Gerhards, 1982; Aydın & Aydın, 2020). Teplotní závislost vybrané mechanické vlastnosti lze obecně vyjádřit pomocí redukčního součinitele:

$$X_{\theta} = k_{\theta} \cdot X_{20} \quad (25)$$

kde X_{θ} hodnota sledované mechanické vlastnosti při teplotě θ (°C),
 k_{θ} teplotně závislý redukční součinitel,
 X_{20} hodnota sledované mechanické vlastnosti při referenční teplotě 20 °C.

Redukční součinitel k_{θ} vyjadřuje poměr hodnoty sledované vlastnosti při dané teplotě k její hodnotě při referenční teplotě. Tento způsob vyjádření se uplatňuje zejména při pokročilém numerickém modelování, kdy jsou mechanické vlastnosti materiálu přiřazovány jednotlivým částem průřezu podle místní teploty (Wald, 2005).

Návrhová pevnost v ohybu při požáru

Podle ČSN EN 1995-1-2 (2006) lze návrhovou pevnost dřeva v ohybu při požární situaci stanovit ze vztahu:

$$f_{m,d,fi} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (26)$$

kde $f_{m,d,fi}$ návrhová pevnost v ohybu při požární situaci,
 $f_{m,20}$ 20% kvantil pevnosti dřeva v ohybu při běžné teplotě,
 k_{mod} modifikační součinitel pro požární situaci,
 $\gamma_{M,fi}$ je dílčí součinitel spolehlivosti materiálu při požáru.

Hodnota 20 % kvantilu pevnosti se stanoví ze vztahu:

$$f_{20} = k_{fi} \cdot f_{m,k} \quad (27)$$

kde k_{fi} součinitel pro přepočítání charakteristické pevnosti na 20% kvantil,
 $f_{m,k}$ charakteristická pevnost v ohybu.

Při použití metody redukovaného průřezu se pro účinný průřez dle ČSN EN 1995-1-2 (2006) uvažuje $k_{mod,fi} = 1,0$.

Vliv požární expozice je v tomto případě zohledněn redukcí rozměrů průřezu o zuhelnatělou vrstvu a vrstvu s nulovou pevností. Mechanické vlastnosti zbývajícího účinného průřezu se proto již dále nesnižují lokálními teplotními redukčními součiniteli.

4 METODIKA

K dosažení cíle práce bude využita vědecká metoda založená na postupném řešení dílčích částí. V první fázi bude provedena analýza metodických postupů používaných pro hodnocení odolnosti lepených spojů při působení zvýšených teplot iniciovaných ohněm. Na základě této analýzy budou formulovány nulové hypotézy experimentů a určeny vhodné metodické postupy pro stanovení charakteristik chování lepidel a lepených spojů při zvýšených teplotách.

Ve druhé fázi budou vybrány jednotlivé typy lepidel vhodných pro konstrukční spoje nosných dřevěných konstrukcí. Pro experimentální část budou uvažována především lepidla na bázi polyuretanu a formaldehydových pryskyřic, jejichž vlastnosti odpovídají požadavkům pro konstrukční aplikace.

Třetí fáze práce bude zaměřena na samotné experimentální testování. Nejprve budou provedeny zkoušky pro stanovení termomechanických charakteristik vybraných lepidel. K tomuto účelu bude využita metoda diferenční skenovací kalorimetrie, pomocí níž budou určeny charakteristické teplotní přechody, zejména teplota skelného přechodu, případně další teplotní oblasti související se změnami struktury nebo degradací materiálu. Na základě získaných výsledků bude možné porovnat chování jednotlivých lepidel v definovaných teplotních pásmech.

V rámci třetí fáze experimentu budou stanoveny mechanicko-fyzikální vlastnosti zkušebních vzorků s ohledem na hodnocení požární odolnosti a požadavky platných norem. Následně bude provedeno experimentální posouzení vlivu typu lepidla na odolnost lepeného spoje při zvýšené teplotě. Lepené spoje budou vystaveny postupné teplotní expozici tak, aby bylo možné stanovit závislost mezi teplotou a výslednou pevností lepeného spoje v závislosti na druhu použitého lepidla.

Na základě dosažených výsledků bude sestaven teoretický model popisující chování lepeného spoje při působení zvýšených teplot. Pro nejvhodnější varianty lepených spojů bude následně provedeno testování reakce na oheň podle příslušných standardizovaných zkušebních postupů a platných norem.

4.1 Příprava a vývoj lepidel

4.1.1 Výběr vhodného adhezivního systému

Cílem této části je posoudit základní pevnostní charakteristiky vybraných adhezivních systémů na základě normované zkoušky podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání. Získané výsledky slouží jako podklad pro výběr nejvhodnějšího lepicího systému určeného pro výrobu lepeného konstrukčního prvku z dubového dřeva a jeho následné ověření při zkoušce požární odolnosti. Na základě provedené literární rešerše byly stanoveny základní předpoklady pro výběr lepidel. Následně bylo vybráno devět typů bází lepidel určených pro lepení konstrukčního dřeva, přičemž všechna tato lepidla byla primárně testována pro lepení jehličnatého konstrukčního dřeva, což představuje určité omezení z hlediska jejich aplikace na listnaté dřeviny. Pro stanovení vhodného lepidla pro lepení listnatého dřeva bylo vycházeno z dosavadních poznatků, které jsou nejvíce dostupné pro bukové dřevo. Důvodem je skutečnost, že buk je v řadě norem využíván jako referenční (normativní) materiál.

V rozsahu disertační práce došlo k testování tří adhezivních systémů:

V rámci disertační práce byly testovány tři základní systémy komerčně dostupných a nejčastěji užívaných lepidel. Důvodem je testování takových adhezivních systémů, které jsou aplikovatelné jako lepidla pro konstrukční aplikace. Testovanými adhezivními systémy byly:

- a) Adhezivní systémy na bázi polyuretanu – jsou certifikovány pro konstrukční aplikace v rámci EU; výhodou jsou relativně nízké koncentrace uvolňujících se emisí těkavých organických látek; nevýhodou je vyšší cena.
- b) Adhezivní systémy na bázi formaldehydu – jsou certifikovány pro konstrukční aplikace v rámci EU; nevýhodou jsou zdraví škodlivé uvolňující se VOC látky na bázi formaldehydu; výhodou je nižší cena.
- c) Adhezivní systémy na bázi epoxidu – byl testován pro porovnání základních charakteristik vůči adhezivním systémům na bázi polyuretanu a formaldehydu; nejsou certifikovány pro konstrukční aplikace v rámci EU, avšak výrobci v EU je používají pro

konstrukční aplikace pro trh USA, kde jsou pro konstrukční aplikace povoleny; nevýhodou je vyšší cena.

Přehled vybraných lepidel použitých pro stanovení jejich vlastností a parametrů je uveden v tabulce 2.

Tab. 2 Zvolené typy testovaných lepidel

Ozn	Typ lepidla	Matrice	Charakteristika
1	KESTOPUR 1010 Kiilto Oy and Kiilto Family Oy Tampereentie 408 33880 Lempäälä Finland	PUR adhesivum (jednosložkové) Složení: 4,4 methylen-difenylyl diizokyanát (83 hm. %) polyol (15 hm. %) UV stabilizátor a aditiva (do 2 hm.%)	Jednosložkové polyuretanové lepidlo určené pro lepení konstrukčního dřeva, zejména dřeva jehličnatého. Základní složku tvoří izokyanátová matrice, přičemž druhou hlavní komponentou je polyol. Vytvrzování probíhá vlivem vzdušné vlhkosti. Otevřená doba lepidla činí přibližně 10 minut.
2	KESTOPUR 1030 Kiilto Oy and Kiilto Family Oy Tampereentie 408 33880 Lempäälä Finland	PUR adhesivum (jednosložkové) Složení: 4,4 methylen-difenylyl diizokyanát (73 hm. %) polyol (25 hm. %) UV stabilizátor a aditiva (2 hm. %)	Jednosložkové polyuretanové lepidlo určené pro lepení konstrukčního dřeva, zejména jehličnatého. Základní složku tvoří izokyanátová matrice, přičemž druhou hlavní komponentou je polyol. Proces vytvrzování probíhá vlivem vzdušné vlhkosti. Otevřená doba lepidla je přibližně 30 minut.
3	KESTOPUR G10 Kiilto Oy and Kiilto Family Oy Tampereentie 408 33880 Lempäälä Finland	PUR adhesivum (jednosložkové) Složení: 4,4 methylen-difenylyl diizokyanát (79 hm. %) polyol (25 hm. %) UV stabilizátor (2,4 hm. %) aditivum nanočástic (3,0 hm. %)	Jedná se o jednosložkové polyuretanové lepidlo určené pro lepení konstrukčního dřeva, zejména jehličnatého. Základ tvoří izokyanátová matrice s polyolem. Lepidlo obsahuje nanočástice podporující pronikání do trachejí dubového dřeva a zvyšující adhezi a pevnost spoje. Vytvrzuje vlivem vzdušné vlhkosti, přičemž otevřená doba činí přibližně 10 minut.
4	PURBOND® HB S309 Henkel & Cie AG Industriestraße 17a 6203 Sempach Station Switzerland	PUR adhesivum (jednosložkové) Složení: Izokyanát (70 hm. %) polyol (28 hm. %) UV stabilizátor a aditiva (2 hm. %)	Jednosložkové polyuretanové lepidlo určené pro lepení konstrukčního dřeva, především jehličnatého. Hlavní složku tvoří izokyanátová matrice, doplněná o polyol jako druhou základní komponentu. K vytvrzení dochází působením vzdušné vlhkosti. Otevřená doba lepidla je přibližně 30 minut.
5	PUR2010 AkzoNobel ADHESIVES AB Byängsgränd 5 120 40 Årsta Sweden	PUR adhesivum (jednosložkové) Složení: Izokyanát (61,4 hm. %) polyol (37,6 hm. %) katalyzátor (0,1 hm. %) UV stabilizátor (0,9 hm. %)	Jednosložkové polyuretanové lepidlo určené pro lepení konstrukčního dřeva. Základní složku tvoří izokyanátová matrice, přičemž druhou hlavní komponentou je polyol. Složení lepidla bylo upraveno s ohledem na požadavky lepení dubového dřeva. Vytvrzování probíhá působením vzdušné vlhkosti. Otevřená doba lepidla činí přibližně 10 minut.
6	ICEMA R 145/12 H. B. Fuller GmbH Kaplanstraße 30 A 4600 Wels, Austria	PUR adhesivum (jednosložkové) Složení: Izokyanát (65 hm. %) polyol (34 hm. %) UV stabilizátor (1 hm. %)	Jednosložkové polyuretanové lepidlo určené pro lepení konstrukčního dřeva. Základní složku tvoří izokyanátová matrice, doplněná o polyol jako druhou hlavní komponentu. Vytvrzování probíhá vlivem vzdušné vlhkosti. Otevřená doba lepidla je přibližně 15 minut.

7	GripPro GLUE A011 100/30 AkzoNobel ADHESIVES AB Byängsgränd 5 120 40 Årsta Sweden	Melamin-močovino-formaldehydové adhesivum (dvousložkové) Složení: Melamin-močovino-formaldehydová matrice (76,9 hm. %) vytvřovač (23,1 hm. %)	Dvousložkové lepidlo, jehož základ tvoří melamin-močovino-formaldehydová pryskyřice. K vytvrzení dochází aktivací pomocí druhé složky – vytvřovače. Otevřená doba lepidla je přibližně 50 minut.
8	LIGNOFEN G/3/D LERG SA, Pustków Osiedle 59D 39-206 Pustków 3 Polan	Fenol-formaldehydové adhesivum (jednosložkové) Složení: Fenol (46–52 hm. %) formaldehyd (0,2 hm. %) hydroxid sodný (6–8 hm. %) H ₂ O (30–36 hm. %)	Jednosložkové fenol-formaldehydové lepidlo rozpustné ve vodě, určené pro lepení konstrukčního dřeva. Základ tvoří fenol a formaldehyd. Vytvrzování probíhá při zvýšené teplotě. Otevřená doba lepidla je přibližně 1–4 minuty.
9	Kestokol WR 6040+Hardener M Kiilto Oy and Kiilto Family Oy Tampereentie 408 33 880 Lempäälä Finland	Epoxidové adhesivum Složení: Izokyanátová matrice (87 hm. %) vytvřovač (13 hm. %)	Dvousložkové lepidlo na bázi epoxidové pryskyřice určené pro lepení dřeva. Základní složku tvoří epoxidová pryskyřice, která vytvrzuje reakcí s druhou složkou – vytvřovačem. Otevřená doba lepidla je přibližně 25 minut.

Pro stanovení charakteristických vlastností lepidel a jejich vzájemné porovnání, zejména z hlediska pevnostních parametrů při lepení dubového dřeva, byl navržen experimentální postup vycházející z norem ČSN EN 302-1 (2023) a ČSN 49 118 (1980). Klasifikace polyuretanových lepidel byla provedena podle normy ČSN EN 15425 (2023), zatímco lepidla na bázi fenolických, aminových a epoxidových pryskyřic byla posuzována dle normy ČSN EN 301 (2014).

4.2 Výběr vhodného povrchového modifikačního prostředku

Obdobně jako při výběru lepidel byly na základě literární rešerše stanoveny základní předpoklady pro výběr modifikačních prostředků určených k povrchové předúpravě dubového dřeva (tabulka 3). Pro experimentální hodnocení bylo zvoleno pět typů chemických modifikátorů, které byly aplikovány na povrch dřeva před následným lepením. Cílem této úpravy bylo ovlivnit povrchové vlastnosti dubového dřeva, zlepšit jeho smáčivost a podpořit účinnější interakci mezi povrchem dřeva a lepidlem. Předpokládalo se, že vhodně zvolená chemická předúprava může přispět k lepší penetraci lepidla do povrchových vrstev dřeva a ke zvýšení adheze i výsledné pevnosti lepeného spoje.

Tab. 3 Zvolené typy modifikačních prostředků (Sahula et al., 2023)

Ozn.	Typ modifikačního prostředku	Vzorec	Koncentrace (%)	Registrační č. CAS chemické sloučeniny
1.	Vodný roztok peroxidu vodíku	H ₂ O ₂	3,0 %	7722-81-1
2.	Vodný roztok hydroxidu draselného	KOH·H ₂ O	2,0 %	1310-58-3
3.	Vodný roztok hydroxidu amonného	NH ₃ ·H ₂ O	5,0 %	1336-21-6
4.	Tetrachlorethylen	C ₂ Cl ₄	100 %	127-18-4
5.	Kyselina chlorovodíková	HCl	2,5 %	7647-01-0
6.	Referenční vzorek	-----	0	-----

4.3 Výběr vhodného termosetického přípravku

Stejně jako při výběru lepidel a prostředků pro povrchovou předúpravu dubového dřeva byla také volba termosetické pryskyřice založena na literární rešerši. Na základě porovnání tepelné stability, mechanických vlastností, adheze ke dřevu a odolnosti vůči vlhkosti byla pro experimentální část zvolena fenol-formaldehydová pryskyřice (tabulka 4). Její použití vycházelo z předpokladu zvýšení tepelné odolnosti a dlouhodobé stability lepené spáry při cyklickém i dlouhodobém teplotním namáhání.

Tab. 4 Technické parametry termosetické pryskyřice (Bakelite, 2022)

Vlastnosti	Standard	Parametr
Termoset		Bakelite® PF31-9005-S 6
Výrobce		Bakelite GmbH, Německo
Chemické složení		Epoxidová fenolová pryskyřice (–CH ₂ –
Skupenství		Částice 1–60 nm
Barva		Černá
Hustota (při 23 °C)	ISO 1183	1620 kg.m ⁻³
Pevnost v tahu (při 5 mm.min⁻¹)	ISO 527-1/2	50 MPa
Modul pružnosti v tahu (při 1 mm.min⁻¹) (prodloužení ε1 0,05%; ε2 0,25%)	ISO 527-1/2	7500 MPa
Pevnost v tlaku	ISO 604	250 MPa

4.4 Termická analýza lepidel a modifikačních prvků (DSC)

Termická analýza byla provedena na diferenčním skenovacím kalorimetru DSC 2 STARe System Mettler Toledo (Mettler-Toledo GmbH, Switzerland), jehož nedílnou součástí je pírka a chladicí jednotka s možností využití rozsahu teplot od 123,15 K do 1023,15 K. K tomuto rozsahu teplot byl použit zkapalněný dusík přiváděný do uzavřené komory DSC přístroje za průtoku $200\text{--}220\text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$. Ochlazování pece při nižších teplotách bylo dosaženo pomocí chladicího systému IntraCoolers.



Obr. 28 Diferenční skenovací kalorimetr; lis na pánvičky s pokličkami; zkušební vzorky

Měření tepelného toku bylo prováděno při rychlosti ohřevu $10\text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$. V souladu s doporučenými postupy byly provedeny tři zkoušky: test prázdné pánvičky (referenčního vzorku) s pouze prázdnou pánvičkou na vzorky k potřebné korekci asymetrie diferenčního skenovacího kalorimetru, test prázdné pánvičky (referenčního vzorku) a pánvičkou naplněnou safírem pro kalibraci a test prázdné misky (referenčního vzorku) s pánvičkou naplněnou vzorkem (obrázek 28).

Ve výzkumu byl vzorkovaný materiál aplikován do uzavřených hliníkových pánviček s perforovanou pokličkou o objemu $40\text{ }\mu\text{l}$ s maximálně působící teplotou $640\text{ }^{\circ}\text{C}$. Před samotným měřením došlo k vypálení pece po dobu 10 min při teplotě $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro odstranění těkavých nečistot. Experimentální parametry byly definovány jako rychlost ohřevu $10\text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$, v dusíku o průtok $200\text{--}220\text{ cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ a teplotním rozsahu

od -30 °C do +500 °C. Vytvrzené vzorky lepidel byly použity pevném stavu o hmotnosti $9,50 \pm 0,50$ mg.

4.5 Zhotovení předtestovacích těles a mechanické zkoušení

V rámci experimentální části práce byla nejprve realizována výroba testovacích zkušebních těles z dubového dřeva, určených ke stanovení základních materiálových a mechanických charakteristik použitých adhezivních systémů. Tyto charakteristiky sloužily jako podklad pro následný návrh a optimalizaci technologie výroby lepeného konstrukčního prvku. Na základě získaných výsledků byl následně navržen a vyroben nosník z lepeného dřeva, který byl dále podroben zkoušce požární odolnosti při současném statickém zatížení.

4.5.1 Stanovení drsnosti povrchu

Pro charakterizaci povrchu lepených lamel z dubového dřeva (*Quercus petraea*) bylo provedeno kontaktní měření drsnosti (obrázek 29). Měření bylo zaměřeno na posouzení vlivu různých způsobů mechanického opracování a následné aplikace penetračních systémů na topografii povrchu lamel. Porovnávány byly povrchy bez penetrace, povrchy ošetřené samotným



Obr. 29 Kontaktní metoda měření drsnosti

penetračním systémem a povrchy ošetřené penetračním systémem s přídavkem termosetické složky. Měření drsnosti povrchu bylo provedeno v souladu s principy ČSN EN ISO 4288 (1999) pomocí přístroje profilometr Form Talysurf 50, (Taylor Hobson, United Kingdom). Touto metodou byl získán liniový profil povrchu, ze kterého byly vyhodnoceny základní parametry

drsnosti: aritmetická střední odchylka profilu R_a , největší výška profilu R_z a střední rozteč prvků profilu R_{sm} .

Měření bylo realizováno při celkové měřené délce 12,5 mm a délce základny 2,5 mm. Před měřením byly povrchy vzorků očištěny od volných částic a nečistot, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Směr měření byl volen s ohledem na směr vláken a charakter předchozího obrábění.

U jednotlivých variant povrchové úpravy byla provedena opakovaná měření na různých místech povrchu. Naměřené hodnoty parametrů R_a , R_z a R_{sm} byly následně statisticky vyhodnoceny a použity pro porovnání vlivu obrábění a penetračních aplikací na drsnost povrchu lepených lamel.

4.5.2 Výroba zkušebních těles pro testování smykové pevnosti

Zkušební tělesa pro stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání byla zhotovena s definovanými geometrickými parametry odpovídajícími požadavkům příslušné normy ČSN EN 302-1 (2023). Výroba těles probíhala z dubového dřeva (*Quercus petraea*), které bylo nejprve vysušeno a klimatizováno za požadovaných podmínek. Následně byly z připraveného materiálu opracovány lamely na předepsané rozměry, přičemž byl kladen důraz na přesnost opracování a dodržení směru vláken (obrázek 30).



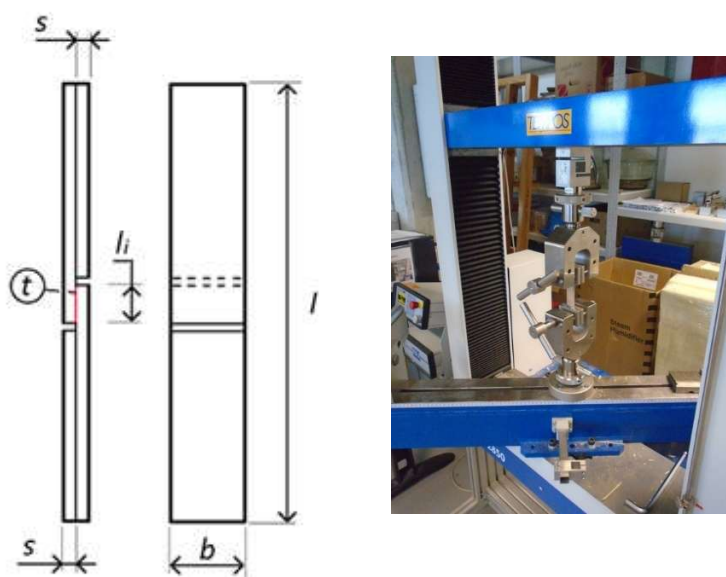
Obr. 30 Výroba zkušebních těles

Před samotným lepením byly styčné plochy upraveny tak, aby bylo dosaženo kvalitního kontaktu mezi spojovanými prvky. Na připravené plochy bylo následně rovnoměrně nanášeno lepidlo a vytvořen přeplátovaný spoj o definované délce překrytí. Po uzavření spoje byly vzorky

lisovány za stanoveného tlaku po dobu odpovídající typu použitého lepidla. Po ukončení lisování byla zkušební tělesa ponechána ke kondicionování za standardních klimatických podmínek do dosažení stabilního stavu.

4.5.3 Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání

Pro zkoušku stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání (obrázek 31) byla vyhotovena zkušební tělesa s následujícími rozměry: $l = 150 \pm 5$ mm (délka tělesa), $l_i = 10 \pm 0,2$ mm (délka lepené – testované plochy), $b = 20 \pm 0,2$ mm (šířka tělesa), $s = 5 \pm 0,1$ mm (tloušťka lamely).



Obr. 32 Zkušební těleso a zkušební stroj (ČSN EN 302-1, 2023)

Značka t na obrázku 31 naznačuje délku překrytí. Norma ČSN EN 302-1 (2023) rovněž specifikuje úhel mezi orientací letokruhů a rovinou lepené spáry, který má být v rozmezí 30° až 85° , s cílem zajistit reprezentativní porušení spoje při zkoušce.



Obr. 31 Expozice těles jednotlivým fázím dle ČSN EN 302-1 (2023)

Před zahájením zkoušek stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání byla zkušební tělesa rozdělena pro každou bázi lepidla na 3 skupiny, přičemž každá skupina zkušebních těles byla před průkaznou zkouškou kondicionována v jiném teplotně-vlhkostním režimu tak, jak je stanoveno normou ČSN EN 302-1 (2023), dle režimu skupin při expozici 1, 2 a 3 (tabulka 5) (obrázek 32). Počet zkušebních těles byl stanoven v kontextu požadavku normy ČSN EN 302-1 (2023), kde je předepsán minimální počet 10 platných hodnot měření pro každou bázi lepidla. Avšak z důvodu statistické průkaznosti byl počet platných hodnot měření navýšen na 30 pro každou bázi lepidla.

Tab. 5 Doba expozice a typ označení prostředí pro testování zkušebních těles (ČSN EN 302-1, 2023)

Označení expozice	Čas expozice a umístění zkušebních těles v odlišném prostředí	
1 (klimatizování)	7 dní	$t = 20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, RH = 65 $\pm$ 5 % následně podrobena zkouškám
2 (máčení)	4 dny	Ponořeno ve vodě o $t = 20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ následně podrobena zkouškám
3 (vaření)	a) 6 hod b) 2 hod c) 7 dní	Ponořeno ve vodě o $t = 100 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Ponořeno ve vodě o $t = 20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Klimatizace $t = 20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, RH = 65 $\pm$ 5 % následně podrobena zkouškám

Zkouška smykové pevnosti přelátovaného spoje byla realizována na univerzálním zkušebním zařízení TIRA Test 2850 (TIRA GmbH, Německo) při konstantní rychlosti zatěžování 50 mm·min⁻¹ v souladu s normou ČSN EN 302-1 (2023) dle obrázku 31. Pevnost lepeného spoje je vyjádřena smykovou pevností τ (N·mm⁻²), jejíž hodnota se určuje podle vztahu:

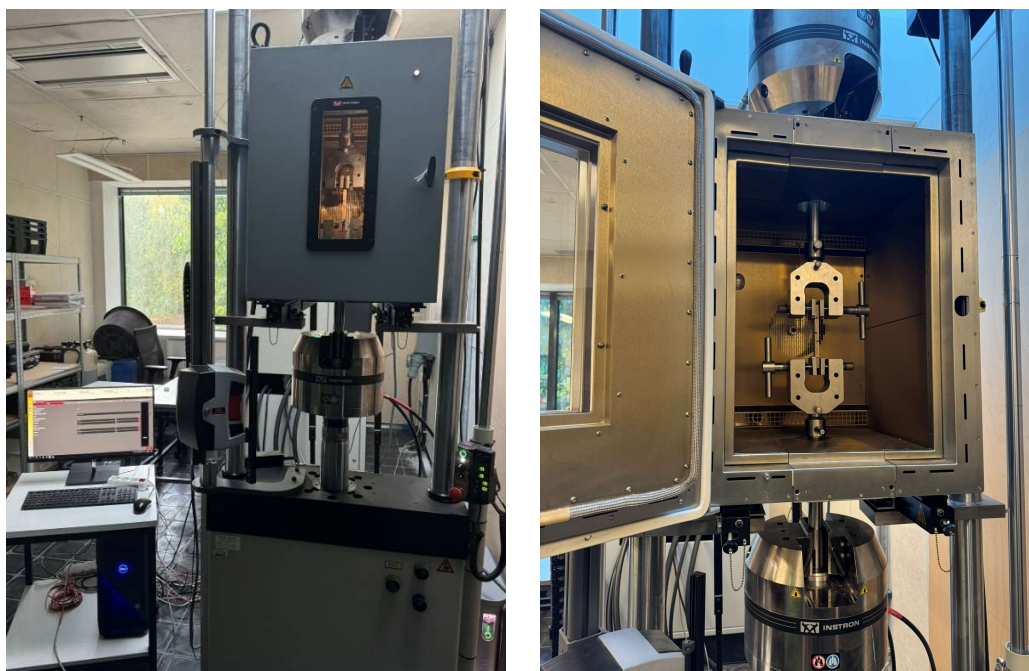
$$\tau = \frac{F_{max}}{l_i \cdot b} \quad (28)$$

kde F_{max} je největší působící síla (N),
 l_i velikost (délka) testované plochy (mm),
 b šířka testované plochy (mm).

V průběhu zatěžování byly kontinuálně zaznamenávány síly vedoucí k porušení lepeného spoje, přičemž zatěžovací síla byla snímána pomocí datalogeru ALMEMO 2690-8 (Ahlborn GmbH, Německo). Vyhodnocení smykové pevnosti přepřátovaných spojů bylo následně provedeno v souladu s klasifikačními požadavky normy ČSN EN 15425 (2023).

4.5.4 Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém zatížení za zvýšených teplot

Mechanické vlastnosti lepených spojů s fenol-formaldehydovou termosetickou matricí byly stanoveny tahovou zkouškou smykové pevnosti. Geometrie zkušebních těles, způsob jejich upnutí a vyhodnocení maximálního smykového napětí vycházely z metodiky použité při zkouškách na univerzálním zkušebním stroji TIRA a z požadavků normy ČSN EN 302-1 (2023) pro stanovení podélné tahové smykové pevnosti lepených spojů dřeva. Pro zkoušky prováděné při zvýšené



Obr. 33 Zkušební těleso a zkušební stroj INSTRON (ČSN EN 302-1, 2023)

teplotě (obrázek 33) byl použit univerzální zkušební stroj INSTRON 8802/MTB (Instron Corporation, Canton, MA, USA) vybavený teplotní komorou INSTRON 3119-607 (Instron Corporation, Canton, MA, USA). Toto zařízení umožnilo temperování zkušebních těles a jejich následné mechanické zatěžování při definované teplotě. Zkušební tělesa byla před zahájením zatěžování ponechána v komoře do dosažení požadovaného teplotního stavu a následně zatěžována tahem konstantní rychlostí až do porušení lepeného spoje. Použití teplotní komory umožnilo

hodnotit změnu smykové pevnosti lepeného spoje v závislosti na teplotě při zachování stejného principu zatěžování a vyhodnocení, jaký byl použit při referenčních zkouškách na zařízení TIRA. Průběh zatěžování a naměřená data byla zaznamenávána prostřednictvím softwaru Instron Bluehill, verze 4.21.

4.5.5 Výroba zkušebních těles pro předtestování pevnosti v ohybu

Zkušební tělesa (obrázek 34) pro stanovení pevnosti v ohybu rovnoběžně s vlákny byla vyhotovena s geometrickými parametry odpovídajícími požadavkům normy ČSN EN 408+A1 (2012) z



Obr. 34 Výroba nosníku k předtestování

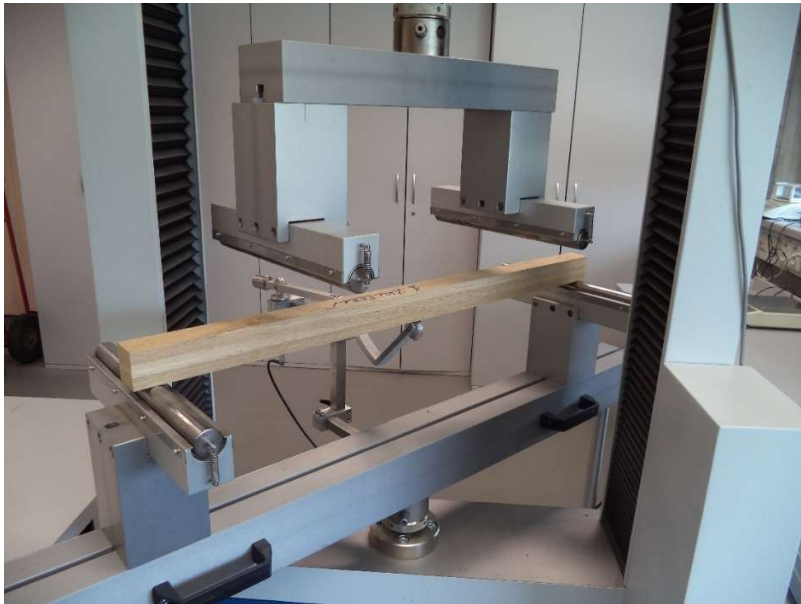
předem vytríděného konstrukčního (jádrového) dřeva dubu (*Quercus petraea*). Pro jejich výrobu byly nejprve připraveny lamely s nadmírou na opracování, které byly následně slepeny do zkušebních těles a ponechány k vytvrzení.

Po vytvrzení byly slepené lamely rozměrově opracovány na finální rozměry 45×40×850 mm (výška×šířka×délka). Při opracování byl kladen důraz zejména na přesnost výsledných rozměrů, rovinnost povrchů a dodržení požadované geometrie zkušebních těles. Následně byla zkušební tělesa kondicionována po dobu 7 dnů při teplotě 22 ± 2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 ± 5 %, a to až do dosažení rovnovážného stavu.

4.5.6 Zkušební tělesa pro stanovení pevnosti v ohybu rovnoběžně s vlákny

Předběžné mechanické zkoušky malých lepených dubových nosníků (obrázek 35) byly provedeny podle principů normy ČSN EN 408+A1 (2012). Cílem těchto zkoušek bylo stanovit základní mechanické charakteristiky lepeného materiálu, zejména pevnost v ohybu, globální modul pružnosti a průhyb při zatížení. Získané hodnoty následně nesloužily k normovému zařazení

materiálu, ale jako experimentální podklad pro předkalkulaci zatěžovacích parametrů navazující zkoušky lepených lamelových nosníků při tepelném namáhání.



Obr. 35 Stanovení pevnosti v ohybu 4bodový ohyb dle ČSN EN 408+A1 (2012)

Zkušební tělesa měla obdélníkový průřez o šířce ($b = 40 \pm 0,5$ mm), výšce ($h = 45 \pm 0,5$ mm), a délce ($L = 855 \pm 0,5$ mm). Zkouška byla provedena metodou čtyřbodového ohybu. Těleso bylo uloženo jako prostě podepřený nosník se vzdáleností podpor $l = 810$ mm. Zatížení bylo přenášeno dvěma symetricky umístěnými silami se vzájemnou roztečí 270 mm, čímž byla mezi zatěžovacími body vytvořena oblast konstantního ohybového momentu.

Velikost aplikované síly f_m (N.mm²) byla určena na základě předběžného výpočtu mezního stavu zatížení. Cílem experimentu bylo stanovit čas, při kterém vlivem termické degradace materiálu a postupné redukce účinného průřezu dojde k porušení zkušebního tělesa při ohybovém namáhání dle normy ČSN EN 408+A1 (2012).

$$f_m = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot h^2} \quad (29)$$

kde f_m pevnost v ohybu (MPa),
F maximální zatěžovací síla (N),
a vzdálenost mezi podporou a místem působení zatěžovací síly (mm),
b šířka zkušebního tělesa (mm),

h výška zkušebního tělesa (mm).

Analytické stanovení mechanického zatížení zkušebního prvku

- Materiál: lepené lamelové dřevo dubu – malý nosník,
- Třída pevnosti: **D60 – D70** dle ČSN EN 338 (2016),
- Celková délka nosníku: $L_{spec} = 855 \text{ mm}$,
- Rozpětí (vzdálenost podpor): $l = 810 \text{ mm}$,
- Rozměry průřezu (skutečné): $b = 40 \text{ mm}$ (šířka), $h = 45 \text{ mm}$ (výška)
- Skutečná hustota nosníku: $\rho_{beam} = 682 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Charakteristická pevnost v ohybu: $f_{m,g,k} = 70 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \text{ (MPa)}$
- Modul pružnosti v příčném směru dle – viz str.: 9 tab. 3
ČSN EN 338 (2016): $E = 13,25 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-2} \text{ (GPa)}$
- Dílčí součinitel vlastnosti materiálu dle – viz str.: 31, tab.: 2.3
ČSN EN 1995-1-1 (2006): $\gamma_m = 1.25$
- Modifikační součinitel zohledňující vliv trvání zatížení dle ČSN EN 13381-7
(2019): $k_{mod} = 1.0$

Předkalkulace

Stanovení vlastní tíhy nosníku:

$$q_{spec} = \rho_{mean} \cdot A \cdot g \quad (30)$$

$$q_{spec} = 0,012 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Návrhová pevnost v ohybu byla stanovena podle vztahu:

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,g,k}}{\gamma_m} \cdot k_{mod} \cdot k_h \quad (31)$$

$$f_{m,d} = 61,6 \text{ MPa}$$

Geometrické charakteristiky – Modul odporu průřezu obdélníkového tvaru:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (31)$$

$$W = 13500 \text{ mm}^3$$

Geometrické charakteristiky – Druhý moment plochy:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (32)$$

$$I = 303750 \text{ mm}^4$$

Stanovení ohybové kapacity nosníku:

$$M_d = W \cdot f_{m,d} \quad (33)$$

$$M_d = 0,8316 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Stanovení momentu od vlastní tíhy:

$$M_{spec} = \frac{q_{spec} \cdot l^2}{8} \quad (34)$$

$$M_{spec} = 9,5415 \cdot 10^{-4} \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pro posouzení za požáru byl uvažován redukční součinitel zatížení:

$$\eta_{fi} = 0,6$$

Ohybový moment pro proměnné (kusové) zatížení – stanoven jako:

$$M_{test,i} = (\eta_{fi} \cdot M_d) - M_{spec} \quad (35)$$

$$M_{test,i} = 0,4980 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Stanovení zatěžovací síly pro schéma čtyřbodového ohybu:

$$P_i = \frac{4M_{test}}{l} \quad (36)$$

$$P_i = 2,459 \text{ kN}$$

Přepočet zatěžovací síly na hmotnost závaží:

$$m_i = \frac{P_i}{g} \quad (37)$$

$$m_i = 250,6 \text{ kg}$$

Výpočet očekávaného průhybu:

$$v = \frac{11 \cdot l^3}{384EI} + \frac{5q \cdot l^4}{384 \cdot I} \quad (38)$$

$$v = 9,305 + 0,017 = 9,322 \text{ mm}$$

Na zkušební nosník bylo aplikováno symetrické dvoubodové zatížení ve schématu čtyřbodového ohybu, přičemž velikost každé jednotlivé zatěžovací síly odpovídala ekvivalentní hmotnosti přibližně 250 kg. Celkové zatížení působící na jeden nosník tak činilo přibližně 500 kg.

4.6 Stanovení zatěžovací síly pro experimentální zkoušku nosníku

Stanovení zatěžovací síly pro experimentální zkoušku nosníku představuje nezbytný krok pro realizaci testování požární odolnosti. Jedná se o předběžný výpočet, jehož cílem je definovat úroveň zatížení aplikovaného na zkušební těleso tak, aby odpovídala požadovanému namáhání prvku během požární expozice.

4.6.1 Předkalkulace charakteristik zatěžovacího modelu

Kalkulace zatěžovací síly byla provedena pro nosník z lepeného lamelového dubového dřeva na základě následujících vstupních parametrů:

- Materiál: lepené lamelové dřevo dubu,
- Třída pevnosti: **D60 – D70** dle ČSN EN 338 (2016),
- Celková délka nosníku: $L_{spec} = 4300 \text{ mm}$,
- Rozpětí (vzdálenost podpor): $l = 4150 \text{ mm}$,
- Rozměry průřezu (skutečné): $b = \left(\frac{99,8}{100,5}\right) \text{ mm}$ (šířka), $h = \left(\frac{119,5}{120}\right) \text{ mm}$ (výška)
- Skutečná hustota nosníku: $\rho_{beam} = 680 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Charakteristická pevnost v ohybu: $f_{m,g,k} = 60 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \text{ (MPa)}$
- Modul pružnosti v příčném směru dle – viz str.: 9 tab. 3
ČSN EN 338 (2016): $E = 17 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-2} \text{ (GPa)}$
- Dílčí součinitel vlastnosti materiálu dle – viz str.: 31, tab.: 2.3
ČSN EN 1995-1-1 (2006): $\gamma_m = 1.25$

- Modifikační součinitel zohledňující vliv trvání zatížení dle ČSN EN 13381-7 (2019): $k_{mod} = 1.0$

Výpočet zatížení:

Součinitel velikosti průřezu dle ČSN EN 1995-1-1 (2006):

$$k_h = \min \left[\left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}, 1, 1 \right] = 1, 1 \quad (39)$$

Návrhová pevnost v ohybu byla stanovena podle vztahu:

$$f_{m,d} = \frac{f_{m,g,k}}{\gamma_m} \cdot k_{mod} \cdot k_h \quad (40)$$

$$f_{m,d} = 52,8 \text{ MPa}$$

Průřezové charakteristiky – modul průřezu obdélníkového tvaru:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (41)$$

$$W = \begin{pmatrix} 237\,528 \\ 241\,200 \end{pmatrix} \text{ mm}^3$$

Spojité zatížení od vlastní tíhy nosníku:

$$q_{spec} = \frac{m_{spec} \cdot g}{L_{spec}} \quad (42)$$

$$q_{spec} = 0,084 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Spojité zatížení od skladby stropu (základ + izolace):

$$q_{deck} = 0,916 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$$

Stanovení návrhového ohybového momentu:

$$M_{d,i} = W_i \cdot f_{m,d,i} \quad (43)$$

$$M_{d,i} = \begin{pmatrix} 12,54 \\ 12,74 \end{pmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Ohybové moment od vlastní tíhy nosníku:

$$M_{spec} = \frac{q_{spec} \cdot L_{sup}^2}{8} \quad (44)$$

$$M_{spec} = \begin{pmatrix} 0,18 \\ 0,18 \end{pmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Ohybový moment od stropní skladby:

$$M_{deck} = \frac{q_{deck} \cdot L_{sup}^2}{8} \quad (45)$$

$$M_{deck} = 1,97 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pro posouzení za požáru byl uvažován redukční součinitel zatížení:

$$\eta_{fi} = 0,6$$

Ohybový moment od kusové zátěže čtyř sil v lichých osminách zatížení rozpětí:

$$M_{test,i} = \eta_{fi} \cdot M_{d,i} - M_{spec,i} - M_{deck} \quad (46)$$

$$M_{test,i} = \begin{pmatrix} 5,37 \\ 5,49 \end{pmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Stanovení zkušebního zatížení v jednom bodě (ze čtyř):

$$P_i = \frac{2 \cdot M_{test,i}}{L_{sup}} \quad (47)$$

$$P = \begin{pmatrix} 2,59 \\ 2,64 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

Ohybový moment od zkušebního zatížení (čtyř sil v lichých osminách) a vlastní tíhy záklopu:

$$M_{test,i} + M_{deck} = \begin{pmatrix} 7,34 \\ 7,46 \end{pmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (48)$$

Ohybový moment od celkového zatížení (zkušební zatížení, vlastní tíha záklopu a nosníku):

$$M_{test,i} + M_{deck} + M_{spec,i} = \begin{pmatrix} 7,52 \\ 7,64 \end{pmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (49)$$

Stanovení posouvajících sil – od zkušebního zatížení a vlastní tíhy nosníku:

$$V_i = 2P_i + \frac{q_{deck} \cdot L_{sup}}{2} \quad (50)$$

$$V = \begin{pmatrix} 7,08 \\ 7,19 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

Posouvající síla od celkového zatížení:

$$V_i = 2P_i + \frac{(q_{deck} + q_{spec}) \cdot L_{sup}}{2} \quad (51)$$

$$V = \begin{pmatrix} 7,25 \\ 7,37 \end{pmatrix} \text{ kN}$$

Na zkušební nosník z lepeného lamelového dubového dřeva o rozměrech: $120 \times 100 \times 4300$ mm bylo během požární zkoušky aplikováno zatížení prostřednictvím čtyř bodových zatěžovacích sil rozmístěných symetricky v lichých osminách rozpětí nosníku. Velikost jednotlivých zatěžovacích sil byla stanovena na základě předběžného statického výpočtu vycházejícího z geometrických parametrů nosníku, materiálových vlastností dubového lepeného lamelového dřeva a návrhových součinitelů pro požární situaci. Celkové zatížení působící na zkušební nosník bylo po celou dobu požární expozice udržováno konstantní.

Kritéria dosažení mezních stavů

Při hodnocení požární odolnosti zkušebních prvků byla za rozhodující kritéria považována doba udržení nosné funkce a velikost deformací v průběhu zatěžování. Kritériem mezního stavu byla doba v minutách, po kterou zkušební prvek zachovává svoji schopnost přenášet zatížení. Schopnost prvku přenášet zatížení se považuje za ztracenou v okamžiku, kdy dojde k porušení některého z mezních kritérií stanovených normou ČSN EN 1363-1 (2021).

Pro ohýbané prvky byla sledována zejména mezní hodnota průhybu a mezní rychlost nárůstu průhybu.

Kritérium mezního průhybu je vyjádřeno vztahem:

$$D_{lim} = \frac{l^2}{400 \cdot d} \quad (52)$$

$$D_{lim} = 358,8 \text{ mm}$$

kde l světélé rozpětí zkušebního vzorku (mm),

d jmenovitá vzdálenost krajních vláken tlačené zóny od krajních vláken tažené zóny posuzovaného průřezu (mm).

Po dosazení hodnot zkušebního tělesa je mezní rychlost průhybu definována:

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim} = \frac{l^2}{9000 \cdot d} \quad (53)$$

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{lim} = 15,9 \text{ mm / min}$$

Dle ČSN EN 1363-1 (2021) se uvažuje, že k porušení schopnosti zkušebního tělesa přenášet zatížení dochází tehdy, pokud měřená deformace překročí hodnotu 1,5násobku mezního průhybu, nebo pokud jsou současně překročeny mezní hodnoty průhybu a rychlosti nárůstu průhybu. V daném případě odpovídá mezní průhyb hodnotě $D_{lim} = 358,8 \text{ mm}$ a mezní rychlost průhybu hodnotě $D'_{lim} = 16 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

4.6.2 Model predikce požární odolnosti lepeného nosníku

Model byl vyvinut pro predikci chování lepeného nosného prvku ze dřeva dubu pro charakterizaci limitní odolnosti při plně rozvinutém požáru. Mechanický model byl vytvořen na základě předběžné numerické kalkulace, která sloužila jako výchozí podklad pro následnou tvorbu modelu predikce zatížení a průhybu nosníku. V rámci této předkalkulace byly stanoveny základní mechanické veličiny, zejména pevnostní parametry, působící zatížení, návrhový moment, ohybový moment a posouvací síly. Součástí výpočetního postupu bylo také stanovení průhybu zkušebního tělesa a rychlosti průhybu. Na základě těchto výpočtů byl v programovacím prostředí software Python 3.14.3 (Python Software Foundation, Nizozemsko) vytvořen numerický model, který popisuje vztah mezi zatížením a průhybem nosníku. Model byl realizován pomocí samostatných výpočetních funkcí, které zajišťovaly přípravu vstupních dat, výpočet jednotlivých mechanických veličin, vyhodnocení průhybu a grafické znázornění výsledků. Pro numerické zpracování dat byla využita knihovna NumPy (open-source Python library, USA,), pro vědecké, matematické a

inženýrské výpočty SciPy 1.17.1 (open-source Python library, USA) a pro tvorbu grafických výstupů nástroj Matplotlib (open-source Python library, USA).“

Do skriptu byly nejprve zadány a strukturovány vstupní údaje potřebné pro výpočet. Jednalo se zejména o materiálové charakteristiky nosníku, geometrické parametry zkušebního tělesa, počet lamel a kvalita použitého materiálu. Nosník byl v modelu uvažován jako prvek ze tří lepených lamel do formy kompozitu dřeva dubu. Tyto údaje byly ve skriptu použity jako základní vstupní parametry pro následné stanovení zatížení, vnitřních sil a průhybu.

V další části skriptu byla provedena numerická předkalkulace mechanického chování nosníku. Výpočet zahrnoval stanovení působícího zatížení, ohybového momentu, posouvajících sil, průřezových charakteristik a následné napěťově-deformační odezvy nosníku. Mechanické posouzení navazovalo na predikovanou redukci průřezu, která byla stanovena v závislosti na době požární expozice a hloubce zuhelnatění. Pro výpočet napětí byl využit vztah mezi ohybovým momentem a účinným průřezovým modulem, zatímco deformace byly popsány na základě lineárně pružného chování materiálu podle Hookeova zákona. Průhyb nosníku byl následně stanoven pomocí nosníkového výpočetního modelu s kubickými Hermitovými tvarovými funkcemi. Jednotlivé části výpočtu byly ve skriptu řešeny samostatnými funkcemi, což umožnilo přehlednou kontrolu výpočetního postupu a případnou úpravu vstupních parametrů. Tím byl vytvořen opakovatelný predikční postup pro sledování mechanické odezvy dubového lepeného lamelového nosníku při zadaném zatížení a postupující redukci průřezu.

Součástí skriptu byl rovněž výpočet průhybu zkušebního tělesa. Průhyb byl vyhodnocován jako jedna z hlavních odezev nosníku na působící zatížení. Vedle samotné hodnoty průhybu byla sledována také rychlost průhybu, která umožňuje lépe popsat změnu deformace v průběhu zatěžování. Tato část modelu byla důležitá pro následné vymodelování vztahu mezi zatížením a deformací nosníku.

Do výpočetního skriptu byla dále zahrnuta normová teplotní křivka dle normy ČSN EN 1363-1 (2021), jež odpovídá ISO 834-1(1999), podle které byly stanoveny teplotní hodnoty použité v simulaci. Teplotní křivka byla ve skriptu převedena do numerické podoby

tak, aby bylo možné pracovat s konkrétními hodnotami teploty v jednotlivých časových nebo výpočtových krocích. Tím bylo možné propojit mechanické zatížení nosníku s účinkem zvýšené teploty a sledovat odezvu tělesa při definovaném teplotním namáhání.

Skript v software Python (Python Software Foundation, Nizozemsko)) tedy zahrnoval několik navazujících částí: zadání vstupních parametrů, předběžný výpočet mechanických veličin, výpočet zatížení a vnitřních sil, stanovení průhybu a rychlosti průhybu, doplnění teplotních hodnot podle normové teplotní křivky a následné grafické zpracování výsledků. Výsledkem byl numerický model, který umožnil vymodelovat průběh zatížení a průhybu konstrukčního nosníku při mechanickém a teplotním zatížení.

Grafické výstupy byly vytvořeny pomocí knihovny Matplotlib (Open-source Python library, USA). Pomocí těchto grafů bylo možné znázornit zejména průběh zatížení, průhyb, rychlosti průhybu a teplotního zatížení. Grafické zpracování umožnilo přehledné vyhodnocení jednotlivých veličin a jejich vzájemných souvislostí. Model tak nesloužil pouze k samotnému výpočtu, ale také jako nástroj pro vizuální interpretaci chování nosníku při zatížení.

Výhodou tohoto řešení byla možnost samostatně upravovat vstupní parametry, opakovat výpočty pro různé varianty zatížení nebo teplotních hodnot a následně výsledky přehledně graficky vyhodnotit. Výsledný numerický model, zahrnutý do přílohy této práce, tak představuje výpočetně podložený nástroj pro popis chování nosníku při mechanickém zatížení a působení zvýšené teploty.

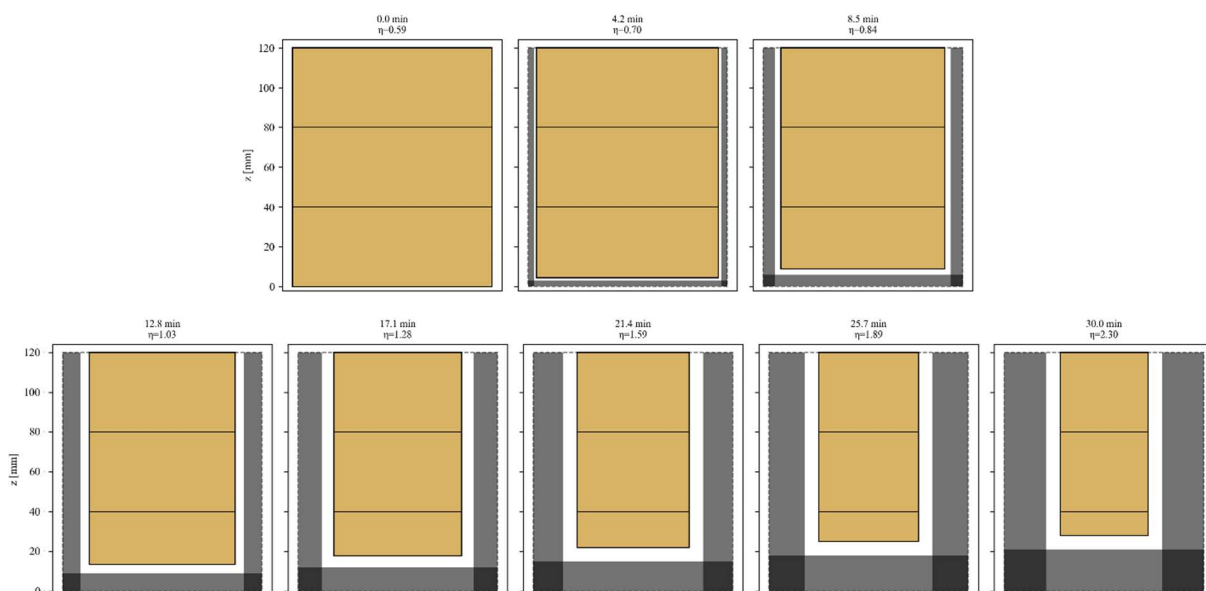
Ve skriptu pro Python byly provedeny zejména tyto kroky:

- 1) zadání vstupních geometrických a materiálových parametrů nosníku,
- 2) definování konstrukčního prvku z dubového dřeva,
- 3) zadání hustoty materiálu a dalších vstupních hodnot,
- 4) výpočet zatížení působícího na nosník,
- 5) stanovení návrhového momentu,
- 6) výpočet ohybového momentu,
- 7) stanovení posouvajících sil,
- 8) výpočet průhybu zkušební tělesa,

- 9) vyhodnocení rychlosti průhybu,
- 10) doplnění normové teplotní křivky,
- 11) stanovení teplotních hodnot pro simulaci,
- 12) propojení mechanického a teplotního zatížení,
- 13) vytvoření modelu zatížení a průhybu nosníku,
- 14) grafické znázornění výsledků pomocí knihovny Matplotlib.

Ve skriptu byly jednotlivé výpočtové kroky uspořádány tak, aby bylo možné sledovat celý postup od zadání vstupních parametrů nosníku přes výpočet mechanických veličin až po grafické znázornění výsledného modelu zatížení a průhybu při působení zvýšené teploty.

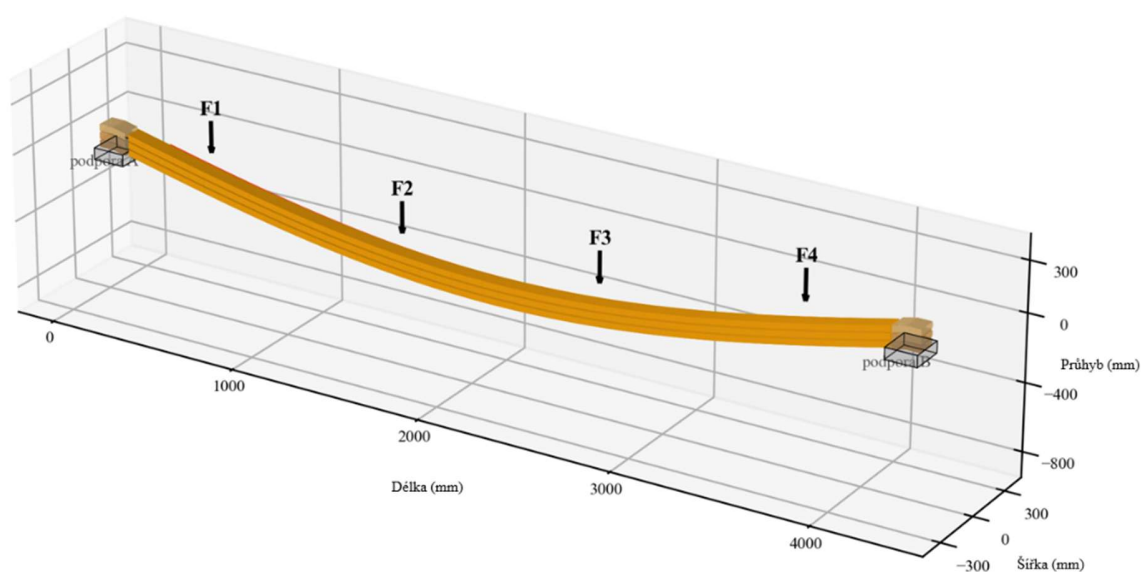
V rámci prvního výstupu byla vytvořena predikční simulace průběhu redukce nosného lepeného prvku z dubového dřeva vystaveného třístranné požární expozici (obrázek 36). Model vychází z předpokladu postupného zuhelnatění exponovaných ploch a z následného stanovení účinného redukovaného průřezu, který je použit pro výpočet průřezových charakteristik a posouzení únosnosti. Hloubka zuhelnatění je stanovena z nominální rychlosti zuhelnatění, zatímco účinná redukce průřezu zahrnuje také nulovou vrstvu reprezentující tepelně oslabenou oblast pod zuhelnatělou vrstvou. Vzhledem k



Obr. 36 Model redukce průřezu lepeného nosného prvku exponovaného požárem

třístrannému ohřevu je šířka průřezu redukována z obou bočních stran a výška ze spodní strany. Takto získaný účinný průřez je v každém časovém kroku použit pro stanovení plochy, momentu setrvačnosti, průřezového modulu a napětového využití. Výpočet modelu je uveden v příloze 13.

V rámci druhého výstupu byla vytvořena numerická simulace průběhu zatěžovacího schématu dubového lepeného lamelového nosníku při požárním namáhání (obrázek 37). Výpočet vychází z kombinace nestacionárního vedení tepla podle Fourierovy rovnice, redukce účinného průřezu na základě hloubky zuhelnatění a

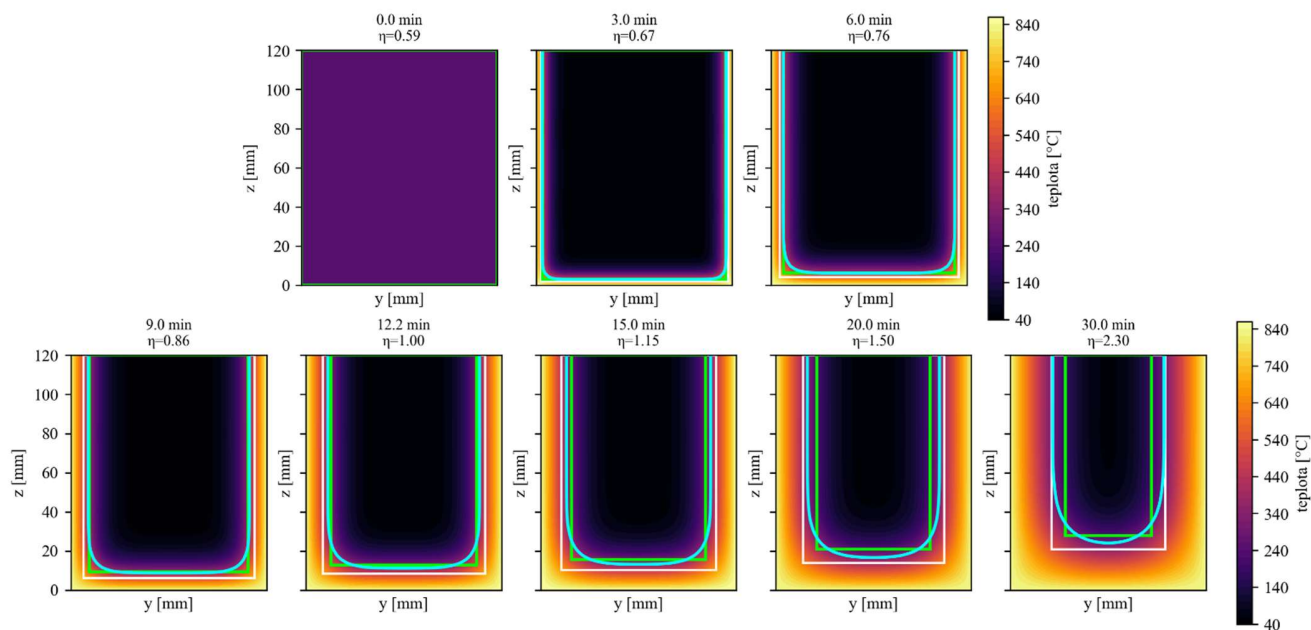


Obr. 37 Průběh zatížení nosného prvku exponovaného

mechanického posouzení nosníku v oblasti lineárně pružného chování podle Hookeova zákona. Pro stanovení průhybu byl použit nosníkový výpočetní model s kubickými Hermitovými tvarovými funkcemi, který umožňuje popsat průběh svislého posunu a natočení po délce nosníku. Model současně zohledňuje vrstvenou skladbu prvku tvořenou třemi dubovými lamelami a dvěma PUR lepenými spárami, přičemž v každém časovém kroku dochází k přepočtu účinné ohybové tuhosti, napětí a průhybu. Výpočet modelu je uveden v příloze 14.

V rámci třetího výstupu byla vytvořena predikční simulace teplotního pole a průběhu prostupu tepla nosným prvkem z lepeného lamelového dřeva dubu exponovaného normovému požáru (obrázek 38). Model byl sestaven jako výpočetní

simulace bez přímého využití reálně naměřených hodnot z termočlánků, a proto představuje predikci založenou na zadané geometrii nosníku, skladbě průřezu, tepelných vlastnostech jednotlivých vrstev a požární teplotní expozici. Nosník byl



Obr. 38 Teplotní pole s prostup tepla v průřezu lepeného nosného prvku exponovaného požárem

uvažován jako vrstvený prvek tvořený třemi dubovými lamelami a dvěma PUR lepenými spárami, přičemž teplotní pole bylo řešeno v příčném průřezu ve směru šířky a výšky prvku. Výpočet vychází z nestacionární Fourierovy rovnice vedení tepla, která popisuje časovou změnu teplotního pole v závislosti na tepelné vodivosti, objemové hmotnosti a měrné tepelné kapacitě materiálu. Požární zatížení bylo zadáno normovou teplotní křivkou ISO 834-1 (1999) a přestup tepla na exponovaných plochách byl popsán kombinací proudění a sálání. Vzhledem k třístranné požární expozici byl přestup tepla v modelu uvažován na spodní ploše a na obou bočních stranách nosníku, zatímco horní plocha byla zjednodušeně uvažována jako tepelně neexponovaná, tedy bez aktivního přívodu tepla. Výpočet modelu je uveden v příloze 15.

Celkový skript modelu, vytvořený v programovacím prostředí Python 3.14.3, je detailně zdokumentován a uveden v příloze 16.

4.7 Výroba konstrukčního materiálu pro požární testování

Byla vyrobena celkem dvě zkušební tělesa nosníků z lepeného lamelového dubového dřeva o jmenovitých rozměrech šíře $b = 100 \text{ mm}$ (šířka nosníku) $\times h = 120 \text{ mm}$ (výška nosníku) $\times l = 4300 \text{ mm}$ (délka nosníku). Každý nosník byl sestaven ze tří lamel o rozměrech $b = 100 \text{ mm}$ (šířka lamely) $\times h = 40 \text{ mm}$ (výška lamely) $\times l = 4300 \text{ mm}$ (délka lamely). Testovány byly dvě varianty nosníků v reálných výrobních dimenzích, jejichž cílem bylo ověřit požární odolnost navrženého systému lepení a lepeného konstrukčního prvku z dubového dřeva před jeho uvedením na trh.

4.7.1. Dřevo dubu

Pro výrobu zkušebních vzorků bylo použito dřevo dubu zimního (*Quercus petraea*), které bylo vizuálně tříděno v souladu s požadavky normy ČSN EN 975-1 (2009). Následně bylo řezivo klasifikováno podle normy ČSN EN 14081-2+A1 (2022). V návaznosti na toto třídění bylo řezivo zatříděno podle normy ČSN EN 338 (2016), která definuje charakteristické hodnoty mechanických a fyzikálních vlastností dřeva, zejména pevnost v ohybu, pevnost v tlaku podél vláken, modul pružnosti a hustotu. Na základě provedené klasifikace bylo dřevo zařazeno do pevnostní třídy D60–D70. Třídění bylo provedeno s ohledem na charakteristiky ovlivňující mechanické vlastnosti dřeva, zejména hustotu, sklon vláken, velikost a rozmístění suků a přítomnost dalších růstových vad. Hodnocení těchto parametrů umožnilo výběr materiálu s omezenou variabilitou vlastností, čímž byl minimalizován vliv přirozené anizotropie dřeva na výsledky experimentálních měření.

4.7.2 Kvalitativní třídění

Při výrobním procesu konstrukčního dřeva jsou kladeny vysoké nároky na jakost a únosnost materiálu. Z tohoto důvodu je nezbytné eliminovat nežádoucí vady, jako jsou trhliny, hniloba, suky či barevné odchylky dřeva, které mohou negativně ovlivnit jeho mechanické vlastnosti. Třídění materiálu bylo provedeno pomocí nedestruktivních metod v souladu s požadavky norem pro třídění konstrukčního řeziva. Pro třídění byl zvolen systém 3D multispektrálního skenování zařízením WoodEye® (dříve WoodEye AB, Linköping, Švédsko, nyní MiCROTEC Woodeye), který umožňuje automatizované

hodnocení vizuálních charakteristik dřeva a identifikaci vad ovlivňujících jeho pevnostní parametry (obrázek 39). Vzhledem k tomu, že systém WoodEye® je primárně



Obr. 39 Přístroj WoodEye - Less-and-Timber (2021)

určen pro třídění jehličnatého dřeva, bylo nutné jeho nastavení upravit a kalibrovat pro listnaté dřevo, konkrétně dub (*Quercus petraea*). Kalibrace byla provedena s cílem zajistit odpovídající vyhodnocení charakteristik typických pro dubové dřevo, zejména vyšší hustoty, odlišné struktury vláken a odlišného charakteru růstových vad. Na základě takto získaných dat byly jednotlivé lamely vizuálně zatříděny podle normy ČSN EN 975-1 (2009) a následně klasifikovány z hlediska pevnosti v souladu s normami ČSN EN 14081-2+A1 (2022) a ČSN EN 338 (2016). Výsledkem bylo zařazení materiálu do pevnostní třídy D60-D70, odpovídající požadavkům na konstrukční využití listnatého dřeva.

4.7.3 Výroba vzorků a implementování teplotních čidel

Z připravených dubových fošen (*Quercus petraea*) (obrázek 40) byly následně na pile formátovány konstrukční lamely s přídavkem na opracování o rozměrech 41 mm (tloušťka), 110 mm (šířka) a 4400 mm (délka). Proces formátování byl navržen tak, aby bylo maximálně využito kvalitních částí materiálu a současně eliminovány oblasti s výskytem vad. Jednotlivé lamely byly vyřezávány s ohledem na průběh vláken a orientaci letokruhů tak, aby byla zachována kontinuita vláken v podélném směru a minimalizováno jejich narušení. Současně došlo k odstranění dřeně a okrajových částí fošen, které vykazují nižší kvalitu a vyšší variabilitu vlastností. Takto vyrobené lamely

byly následně systematicky označeny tak, aby bylo možné jednoznačně identifikovat jejich polohu v budoucím lepeném prvku již od počáteční fáze výroby.



Obr. 40 Proces přípravy materiálu

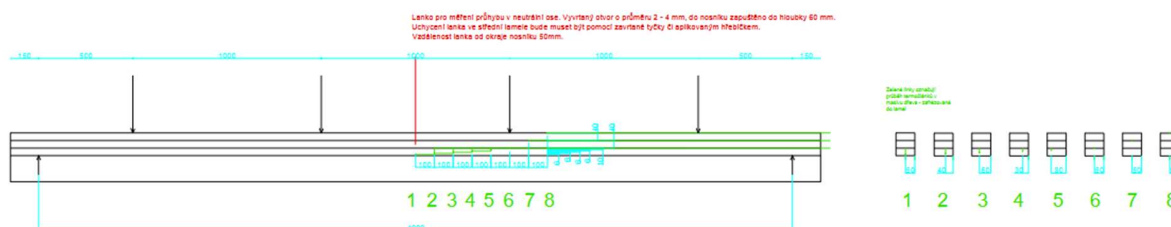
V dalším kroku byly zhotovené lamely opracovány na srovnávací a tloušťkovací fréze typu SCM S630 CLASS (SCM Group, Itálie) na tloušťku 41 mm (obrázek 41). Obrábění bylo provedeno s cílem dosažení požadované geometrické přesnosti a rovinnosti povrchu, která je nezbytná pro následný proces lepení. Současně s tím byla kontrolována kvalita opracovaného povrchu, zejména jeho hladkost a absence vad ovlivňujících kvalitu lepeného spoje. Kalibrace tloušťky lamel přispěla k rovnoměrnému přenosu napětí a homogenitě výsledného prvku.



Obr. 41 Tloušťkování materiálu

Dalším krokem bylo navrhnout způsob implementace teplotních čidel do lamel tak, aby nedošlo k jejich oslabení ani k narušení mechanických vlastností. Při návrhu bylo zohledněno zejména umístění čidel ve vztahu k orientaci vláken a k charakteru namáhání prvku, stejně jako

snaha o minimalizaci zásahu do průřezu lamel. Cílem bylo zajistit spolehlivé měření teploty v průběhu experimentu při současném zachování integrity materiálu a reprezentativnosti mechanických zkoušek. Na základě těchto požadavků byl vypracován návrh rozmístění čidel



Obr. 42 Návrh rozmístění teplotních čidel v nosníku

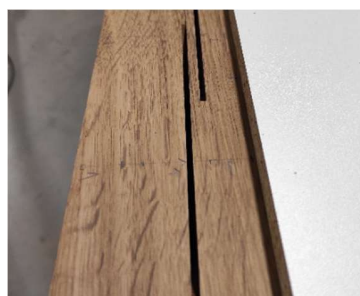
(obrázek 42). Z důvodu omezené velikosti obrázku v hlavním textu je jeho rozšířená verze pro lepší čitelnost uvedena v příloze disertační práce.

Rozmístění teplotních čidel bylo navrženo tak, aby umožňovalo sledování teplotního pole jak v podélném směru nosníku, tak i v jeho průřezu. Čidla byla umístěna ve vybraných řezech po délce nosníku (označených 1–8), přičemž jejich poloha odpovídá charakteristickým oblastem z hlediska očekávaného teplotního a mechanického namáhání. V podélném směru jsou jednotlivé řezy navrženy s ohledem na délku nosníku mezi podpěrami (4000 mm) a symetrii zatížení, přičemž hustší rozdělení je voleno v oblasti střední části, kde lze očekávat nejvýznamnější změny teplot i mechanické odezvy.

V rámci průřezu jsou termočlánky vedeny v jednotlivých lamelách tak, aby bylo možné zachytit teplotní gradient od exponovaného povrchu směrem do jádra prvku. Čidla jsou uložena v různých hloubkách (řádově desítky milimetrů od povrchu – dle návrhu a technické specifikace), což umožňuje sledovat postup degradace materiálu v čase a prostoru. Tato konfigurace tak poskytuje dostatečné prostorové rozlišení pro vyhodnocení šíření tepla v masivním dřevě

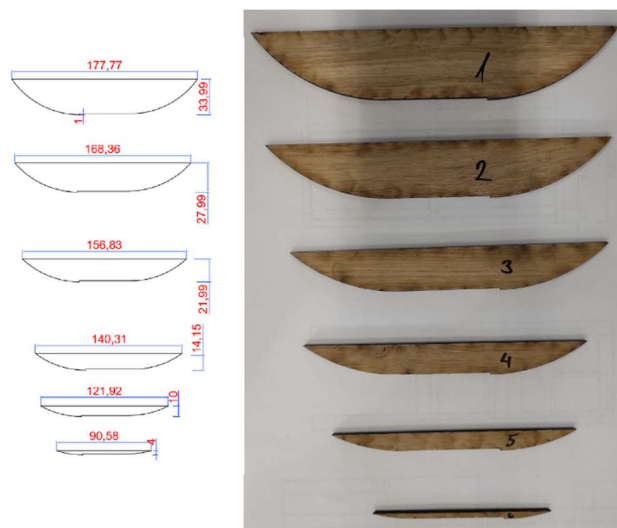


Obr. 43 Drážky pro vývod teplotních čidel



Obr. 44 Drážky pro element

a současně minimalizuje zásah do nosné struktury prvku, jelikož čidla jsou zafrézována do jednotlivých lamel podél směru vláken.



Obr. 45 Speciální elementy pro implementaci teplotního čidla

Dle navrženého postupu byly v lamelách vytvořeny drážky pomocí ponorné okružní pily typu Festool TS 55 FEBQ-Plus-FS (Festool GmbH, Německo), přičemž pilový kotouč o šířce zubu 2,4 mm byl ponořen 3 mm do materiálu. Tímto způsobem byly připraveny drážky pro uložení teplotních čidel (obrázek 43). V místech určených pro umístění čidel byla drážka lokálně rozšířena prohloubením řezu a následným podélným posunem pilového kotouče v délce přibližně 46 mm. Tímto postupem vznikl prostor umožňující uložení čidla ve vodorovné poloze, což je nezbytné pro zajištění správné funkce čidla a eliminaci zkreslení naměřených hodnot (obrázek 44).

Pro takto zhotovené kapsy byly navrženy speciální prvky. Tyto prvky byly vyrobeny pomocí laserového řezání zařízením typu NUMCO C1290 – CO₂ laser (Broukal, Česká republika) z dubové překližky o tloušťce 3 mm, a to na základě předem zpracovaného návrhu. Specifické tvarové řešení prvků bylo zvoleno s ohledem na aplikaci teplotního čidla na spodní stranu prvku. Konstrukce umožnila spolehlivé ukotvení konce teplotního čidla tak, aby nedocházelo k jeho deformaci a následnému zkreslení výsledků (obrázek 45).

Na takto připravené prvky byla aplikována teplotní čidla, která byla fixována pomocí vteřinového lepidla BISON Super Glue Control (Z-TRADE s.r.o., Česká republika) na



Obr. 46 Aplikace teplotního čidla na element

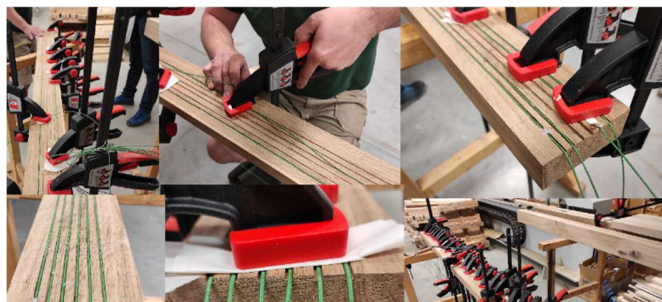
spodní část prvku (obrázek 46). Lepidlo bylo nanášeno na ochranný plášť vodiče čidla, čímž bylo zajištěno jeho stabilní uložení bez přímého ovlivnění měřeného místa. Následně byly vyhotovené drážky opatřeny polyuretanovým lepidlem (PUR 2010), do nichž byla teplotní čidla vložena a fixována vlepením. Tento postup zajistil jejich stabilní polohu v rámci lamel a současně umožnil zachování kontinuity materiálu (obrázek 47).



Obr. 47 Aplikace lepidla do vyhotovených drážek

Teplotní čidla byla před vlastním osazením do drážek dočasně fixována pomocí svorek, které zajistily jejich přesnou polohu a dostatečný přitlak během tuhnutí lepidla. Tím bylo dosaženo pevného a stabilního spojení mezi čidlem a okolním materiálem. Po vytvrzení lepidla byla jednotlivá teplotní čidla napnuta a následně fixována v příslušných drážkách. Bylo přitom nezbytné zajistit jejich přesné usazení v drážkách, aby během následného sestavování a kompletace nosníku nedošlo k jejich mechanickému poškození (obrázek 48).

Po vytvrzení lepidla byl veškerý fixační materiál odstraněn. Následně byla provedena vizuální kontrola správného uložení jednotlivých čidel v drážkách.



Obr. 48 Koláž – vkládání teplotních čidel do drážek a fixování

Současně byla ověřena jejich neporušenost a kontinuita vodičů, aby byla zajištěna správná funkce měření. Tímto krokem byla potvrzena připravenost prvků pro další fázi kompletace nosníku.

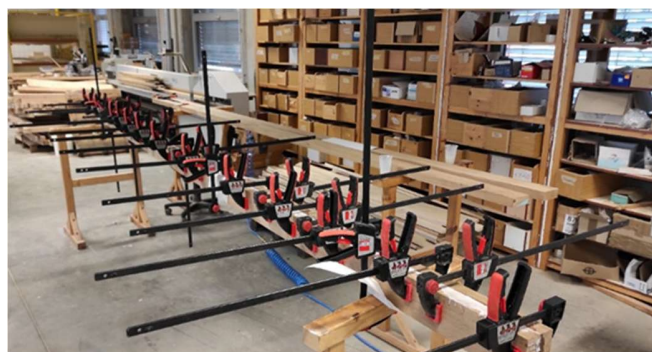
4.7.4 Lepení a povrchová úprava lamel

Vyhotovené lamely s implementovanými čidly byly důkladně očištěny, zejména od zbytků lepidla, prachu a případných mastnot, čímž byla zajištěna vhodná kvalita lepených ploch a jejich připravenost pro následnou aplikaci lepidla.



Obr. 49 Aplikace lepidla na lamely

U prvního (referenčního) nosníku bylo nejprve provedeno slepení první a druhé lamely, a to za účelem zajištění jejich vzájemné fixace a omezení nežádoucího pohybu lamel v průběhu lepení. K tomuto účelu bylo použito polyuretanové lepidlo (PUR 2010 dle tabulky 2), které bylo nanášeno a roztíráno plastovou stěrkou tak, aby bylo dosaženo požadovaného plošného množství v celém rozsahu lepené plochy (obrázek 49). K fixaci lamel byly použity rychloupínací svorky, které byly aplikovány ve vertikálním i horizontálním směru. Toto uspořádání umožnilo zajistit



Obr. 50 Fixování lamel při lepení

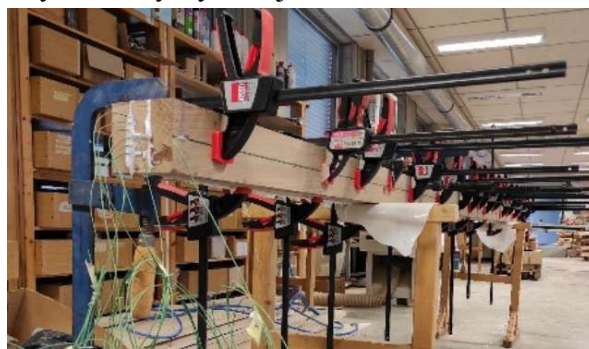
dostatečný přtlak a současně zabránit nežádoucímu vychýlení jednotlivých lamel během procesu lepení (obrázek 50). U takto slepeného dvojlamelového prvku byl následně vyvrtán otvor o průměru přibližně 2 mm, a to v polovině rozpětí nosníku a současně ve středu lamely.

Vrtání bylo provedeno pomocí přístroje Resistograph 4452-S (Rinntech Inc., USA), který umožňuje minimálně invazivní zásah do struktury dřeva (obrázek 51). Tento otvor sloužil k vedení lanka (průtahoměru) pro měření průhybu nosníku při zatížení. Lanko bylo ukotveno v polovině tloušťky střední lamely, čímž byla zajištěna jeho poloha v blízkosti neutrální osy prvku. Po osazení měřicího systému bylo průtahové lanko ponecháno bez dodatečného napnutí, aby mohlo volně reagovat na deformace nosníku bez ovlivnění výsledků měření. Následně bylo přistoupeno k lepení třetí lamely, a to shodným technologickým postupem jako v případě předchozích dvou lamel, čímž došlo ke kompletaci nosníku jako celku.



Obr. 51 Vrtání přístrojem Resistograf 4452-S

Nosník byl následně fixován pomocí rychloupínacích svorek, které byly systematicky rozmístěny tak, aby bylo zajištěno rovnoměrné rozložení přtláčné síly a



Obr. 52 Fixování lamel při lepení

současně nedocházelo k nežádoucímu posunu jednotlivých lamel během procesu vytvrzování lepidla (obrázek 52).



Obrázek 53 Penetrování kontaktní ploch lamel

Během doby vytvrzování lepidla u prvního nosníku (referenčního) byla zahájena aplikace hloubkové penetrace na jednotlivé lamely druhého nosníku, a to zejména v jejich kontaktních plochách, aby nedocházelo k prostojům ve výrobním procesu. Penetrace byla aplikována za účelem úpravy povrchu a zvýšení jeho adhezních vlastností, čímž bylo dosaženo lepší přilnavosti lepidla k penetrovanému povrchu. Penetrační prostředek byl nanášen pomocí štětce se syntetickými štětinami, což umožnilo jeho rovnoměrné rozptýlení (obrázek 53).

V průběhu vytvrzování hloubkové penetrace byl termosetický polymer na bázi fenol-formaldehydové pryskyřice dezintegrován na nožovém mlýnu typu MF 10 Basic (IKA-Werke GmbH, Německo), který umožnil rozmělnění granulovaného materiálu na jemnou frakci. Takto upravený materiál byl následně připraven pro další zpracování, přičemž cílem bylo dosažení homogenní struktury a vhodné velikosti částic pro jeho aplikaci do lepicí směsi (obrázek 54).



Obrázek 54 Dezintegrovaná termosetická hmota

Termoset byl následně homogenizován s polyuretanovým lepidlem v hmotnostním poměru 1:5. Směs byla homogenizována pomocí zařízení homogenizátoru typu WiseTis HG-15A (Witeg Labortechnik GmbH, Německo). Tím bylo zajištěno rovnoměrné rozptýlení částic termosetu v matrici lepidla a dosažení konzistentních



Obr. 55 Aplikace směsi lepidla a termosetické látky na lamely

vlastností výsledné kompozice. Takto připravená lepicí kompozice, tvořená směsí polyuretanového lepidla a termosetické hmoty, byla aplikována na řádně očištěné povrchy lamel pomocí plastové stěrky.

Aplikace probíhala za dodržení shodného technologického postupu jako u referenčního nosníku, opět byl kladen důraz na rovnoměrné rozprostření směsi a dosažení požadovaného plošného množství v celé oblasti lepeného spoje (obrázek 55). Po tomto kroku bylo přistoupeno k lepení třetí lamely, a to shodným postupem jako v případě předchozích dvou lamel. Tím došlo ke kompletaci nosníku jako celku. V dalším kroku byl nosník zafixován pomocí rychloupínacích svorek, které byly aplikovány tak, aby bylo zajištěno rovnoměrné přitlačení lamel a současně nedocházelo k jejich vzájemnému posunu během vytvrzování lepidla. Analogicky jako u předchozího dvojlamelového prvku byl i u kompletního nosníku vyvrtán otvor pomocí speciálního vrtáku, který umožňuje minimálně invazivní zásah do struktury dřeva. Tento otvor sloužil k instalaci lanka průtahoměru pro měření průhybu nosníku při zatížení (obrázek 56).

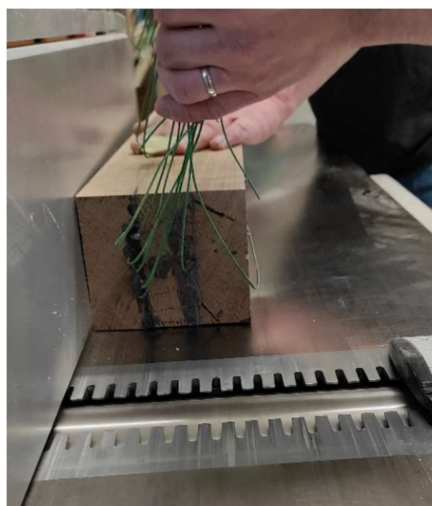


Obr. 56 Implementace lanka – průtahoměru



Obr. 57 Lepení 3 lamely - kompletace modifikovaného nosníku

Lanko bylo vedeno v oblasti neutrální osy prvku a po jeho osazení bylo ponecháno bez dodatečného napnutí, aby mohlo volně reagovat na deformace nosníku. Následně došlo ke slepení třetí lamely, a to shodným postupem jako v předchozích případech. Po jejím osazení byl nosník opět zafixován pomocí rychloupínacích svorek, které zajistily rovnoměrné přitlačení lamel a současně zabránily jejich vzájemnému posunu během procesu vytvrzování lepidla (obrázek 57). Po dokončení procesu lepení byly nosníky mechanicky očištěny od přebytečného lepidla, zejména pomocí dláta, a následně ofrézovány na požadovaný finální šířkový rozměr. Tento krok byl technologicky



Obr. 58 Frézování bočních ploch nosníků

náročnější s ohledem na přítomnost instalovaných teplotních čidel a průtahového lanka, které bylo nutné během opracování chránit před poškozením (obrázek 58).

Takto opracované nosníky byly uloženy na pracovní podpěry a v dalším kroku byla provedena jejich povrchová úprava broušením. Broušení bylo realizováno pomocí



Obr. 59 Broušení nosníků - dokončování povrchu

rotační excentrické brusky (Festool ETS EC 150/3 EQ Plus) s využitím brusného materiálu jemné zrnitosti (P180), čímž bylo dosaženo požadované kvality povrchu (obrázek 59).

Takto povrchově upravené nosníky byly následně očištěny proudem stlačeného vzduchu, čímž došlo k odstranění zbytkového prachu z povrchu i hůře přístupných míst. Následovala kontrola kvality provedení se zaměřením na celistvost povrchu a správnou integraci jednotlivých prvků. V závěrečné fázi výroby byly nosníky podrobeny kontrole, která zahrnovala zejména ověření správného označení teplotních čidel pro jejich bezchybné propojení se sběrníci dat a kontrolu volnosti lanka určeného pro měření průhybu nosníku (obrázek 60). Následně byly nosníky zabaleny, přičemž samotný prvek byl obalen

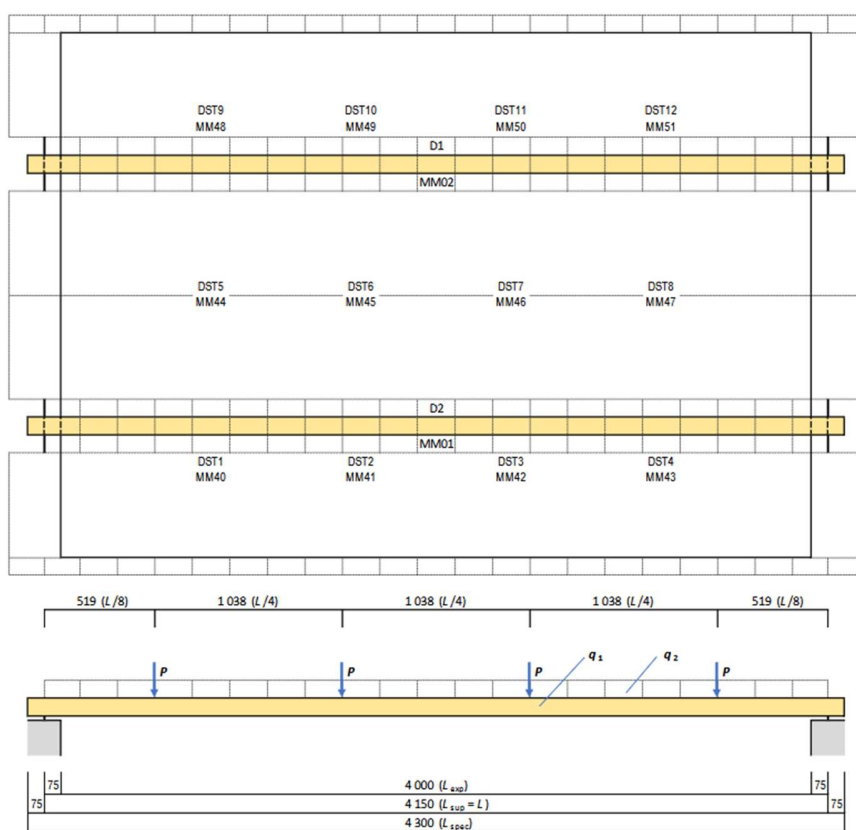


Obr. 60 Kontrola čidel a balení nosníků

bublínkovou fólií a teplotní čidla byla uložena do ochranné obálky. Současně bylo provedeno jednoznačné označení jednotlivých vzorků, aby se předešlo záměně a chybné identifikaci typu při další manipulaci a experimentálním testování (obrázek 60).

4.7.5 Aplikace do pece a zapálení

Takto zkompleťovaná a zabalená zkušební tělesa byla transportována do akreditované požární zkušebny společnosti PAVUS, a.s., ve Veselí nad Lužnicí. Po převzetí vzorků došlo ve zkušební hale PO 1 k přípravě odpovídající standardním postupům pro implementaci do zkušební velké horizontální pece o rozměrech: 3000 mm (šířka)×8500 mm (délka)×2980 mm (výška), přičemž světlá délka pece byla 4000 mm (obrázek 61).



Obr. 61 Technická dokumentace zkušebního vzorku v peci + teplotní čidla

Zkušební pec byla předem nastavena na teplotní režim dle normové teplotní křivky ISO 834-1 (1999), resp. dle ČSN EN 1363-1 (2021), která definuje základní podmínky požárních zkoušek. Nosníky byly instalovány jako prostě uložené nosníky dle ČSN EN 1365-3 (2000) čl. 6.1 a 7 a to následovně:

- $L_{exp} = 4\,000$ mm ohřívaná délka nosníku,
- $L_{sup} = 4\,150$ mm rozpětí nosníku,
- $L_{spec} = 4\,300$ mm délka zkušební vzorku.



Obr. 62 Nosníky instalované ve velké horizontální peci

Velikost zatížení byla stanovena s ohledem na zásady uvedené v ČSN EN 1991-1-2 (2004) (zatížení konstrukcí při požáru) a ČSN EN 1995-1-2 (2007) (navrhování dřevěných konstrukcí na účinky požáru), tak aby reprezentovala reálné provozní podmínky a umožnila posouzení chování nosníků při požární expozici (obrázek 62).

Detail spodní strany zkoušeného nosníku umístěného v požární peci je znázorněn na obrázku 63. Nosník je vystaven tepelnému zatížení zespodu, zatímco jeho horní část je chráněna deskami z kalcium-silikátového materiálu. Teplotní pole v nosníku je snímáno pomocí termočlánků instalovaných v různých hloubkách jeho průřezu. Současně jsou v prostoru pece umístěny další termočlánky sloužící ke sledování teploty požárního prostředí, které jsou upevněny na ocelových tyčích plnících funkci držáků snímačů a současně sloužících k vedení jejich přívodních vodičů. Zatížení nosníku a měření jeho odezvy jsou



Obr. 63 Detail nosníku v peci

zajištěny prostřednictvím ocelových tyčí a desek. Vnitřní prostor pece je tvořen žáruvzdornou vyzdívkou z keramických a izolačních materiálů. Pro zaznamenávání zkušebních dat byla použita nová digitální ústředna.

Před zahájením zkoušky byla provedena kontrola a ověření funkčnosti měřicí aparatury se zaměřením na správné zapojení termočlánků. Jednotlivé termočlánky byly připojeny prostřednictvím svorkovnic umístěných v rozvodné skříni, přičemž byla ověřena jejich kontinuita, správná identifikace a přiřazení k jednotlivým měřicím kanálům. Současně byla zkontrolována trasa přívodních vodičů a jejich mechanické zajištění tak, aby nedošlo k jejich poškození v průběhu zkoušky. V rámci přípravy byla rovněž provedena kontrola měřicího systému pro sledování průhybu, včetně ověření funkčnosti a upevnění měřicího lanka. Po dokončení příprav a kontrole měřicí aparatury byla ve stanovený čas zahájena zkouška spuštěním časomíry a současně byl iniciován ohřev pece podle standardní teplotní křivky dle ČSN EN 1363-1 (2021). V souladu s požadavky této normy byly hořáky orientovány mimo zkušební těleso tak, aby nedocházelo k jeho přímému opalování a tepelná expozice byla zajištěna výhradně prostřednictvím horkých plynů v prostoru pece.



Obr. 64 Tepelná degradace zkušebních vzorků

Zkoušky byly prováděny v peci na zemní plyn (EVECO Brno, s.r.o., Česká republika), která umožňuje rychlý náběh teploty. Teplota v pracovním prostoru pece dosahuje přibližně 800 °C již během první minuty a je rovnoměrně rozložena v celém objemu pece, včetně okrajových částí. Z tohoto důvodu lze počátek požární expozice uvažovat od prvního okamžiku zahájení ohřevu. Konstrukční uspořádání hořáků a jejich orientace jsou navrženy tak, aby bylo dosaženo co nejrovnoměrnější distribuce teploty v celém objemu pece a minimalizovány lokální teplotní

gradients. Takto exponovaná zkušební tělesa (obrázek 64) vlivem kombinovaného působení mechanického zatížení a postupné redukce průřezu v důsledku zuhelnatění postupně ztrácela únosnost, což vedlo k jejich porušení a následnému propadnutí do prostoru pece.

5 VÝSLEDKY A DISKUSE

Tato kapitola shrnuje a hodnotí výsledky experimentální části práce zaměřené na posouzení vlastností dubového dřeva, lepených spojů a lepených konstrukčních prvků vystavených zvýšené teplotě a požární expozici. Získané poznatky jsou průběžně interpretovány s ohledem na jejich význam pro využití dubového dřeva v lepených konstrukčních prvcích se zvýšenými požadavky na požární odolnost.

5.1 Drsnost povrchu

Struktura povrchu dřeva představuje jeden z významných faktorů ovlivňujících kontakt lepidla s podkladem a následnou kvalitu lepeného spoje. Povrch neošetřeného dubového dřeva a dubového dřeva ošetřeného penetrací vodným roztokem hydroxidu draselného ($\text{KOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$) byl charakterizován pomocí parametrů drsnosti uvedených v tabulce 6. Z výsledků je patrná vyšší heterogenita povrchu u varianty dubového dřeva ošetřené penetrací $\text{KOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$. Po aplikaci penetračního roztoku dochází ke zvýšení vlhkosti v povrchových vrstvách dřeva, což může vést k bobtnání a částečnému zvednutí vláken směrem k povrchu. Tím se zvyšuje členitost a hrubost povrchu lepené spáry. I po následném klimatizování dřeva při $t = 20 \pm 2$ °C a $RH = 65 \pm 5$ % do ustáleného stavu může povrch zůstat více heterogenní než u neošetřeného dřeva.

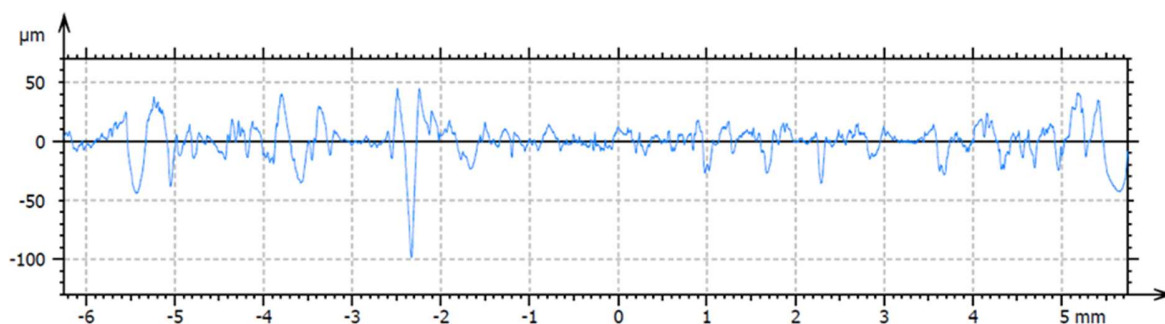
Tab. 6 Výsledné hodnoty drsnosti povrchu dřeva dubu

Parametr	Dub	Dub + $\text{KOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$
Délka měřeného úseku (l) (mm)	12,5	12,5
Aritmetická střední odchylka profilu (R_a) (μm)	4,37	6,19
Největší výška profilu (R_z) (μm)	67,93	96,01
Největší výška profilu drsnosti povrchu (R_t)	197,32	196,65
Rozdíl výšek profilu pro dva stanovené materiálové	17,37	24,26

Pozn.: Výsledné hodnoty jsou průměry z 10 měření

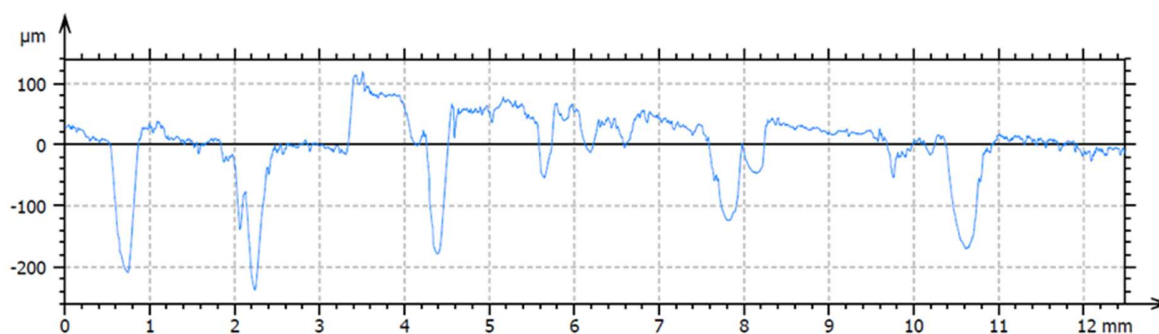
Tato změna může být z hlediska lepení významná, protože mírné zdrsnění povrchu může podpořit mechanické zakotvení lepidla, zatímco příliš výrazná nerovnoměrnost povrchu nebo zvednutá vlákna mohou zhoršit smáčení, kontakt lepidla s podkladem a tím i výslednou kvalitu lepené spáry.

Drsnost povrchu dřeva dubu klimatizované při $t = 20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $RH = 65 \pm 5 \%$ do ustáleného stavu) před lepením je zobrazena v grafu 1.



Graf 1 Drsnost povrchu dřeva dubu

Drsnost povrchu dřeva dubu modifikovaného $\text{KOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ (klimatizované při $t = 20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $RH = 65 \pm 5 \%$ do ustáleného stavu) před lepením je zobrazena v grafu 2.



Graf 2 Drsnost povrchu dřeva dubu modifikovaného $\text{KOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$

Söğütü (2017) hodnotil vliv drsnosti povrchu na pevnost lepených spojů u několika dřevin lepených PVAc a PUR lepidly. Autor uvádí, že rostoucí drsnost povrchu vedla ke snížení pevnosti spoje, zatímco nejvyšších hodnot bylo dosaženo u hladších povrchů. Tento závěr je významný i pro tuto práci, protože vyšší heterogenita povrchu po úpravě $\text{KOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ nemusí automaticky znamenat zlepšení adheze. Mírné zdrsnění může podpořit mechanické zakotvení lepidla, avšak příliš členitý povrch, zvednutá vlákna nebo nerovnoměrné smáčení mohou naopak snížit kvalitu lepené spáry. Stejně tak hodnotili Jankowska et al. (2018) vliv způsobu opracování povrchu dřeva evropského dubu na jeho povrchové vlastnosti, včetně drsnosti. Autoři porovnávali řezané, krájené a broušené povrchy a prokázali, že způsob opracování významně ovlivňuje výsledný charakter povrchu. Broušené povrchy vykazovaly

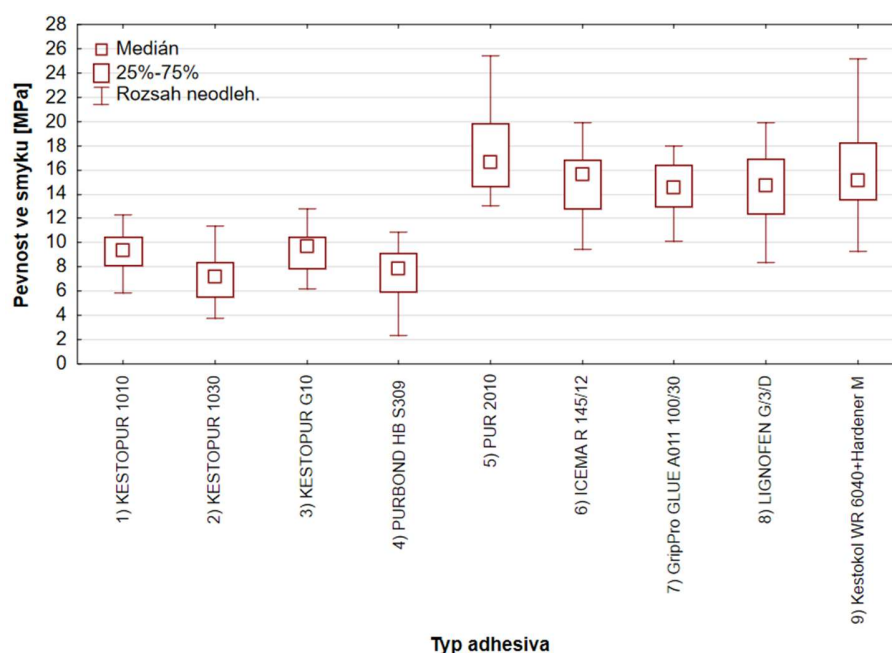
vyšší procesní drsnost, která souvisela se strukturálními změnami povrchové vrstvy a odlišným narušením anatomických prvků dřeva. Tento závěr je významný i pro tuto práci, protože potvrzuje, že změna povrchové struktury dubového dřeva může ovlivnit charakter lepeného povrchu, penetraci lepidla a podmínky pro vytvoření kvalitní lepené spáry. Taktéž Gržan et al. (2025) se zabývali vlivem přípravy povrchu a typu lepidla na lepení dubového dřeva. Autoři porovnávali hoblované, broušené a frézované povrchy a hodnotili jejich vliv na vlastnosti lepených spojů v suchém stavu i po umělém stárnutí. Současně testovali několik typů lepidel, včetně PVAc, jednosložkového PUR, vláknem vyztuženého PUR, dvousložkového PUR a epoxidového lepidla. Výsledky ukázaly, že způsob mechanické přípravy povrchu významně ovlivňuje drsnost, smáčivost, propustnost povrchové vrstvy a následně i pevnost lepeného spoje. Tento závěr je významný i pro tuto práci, protože potvrzuje, že u dubového dřeva nelze hodnotit lepení pouze podle typu lepidla, ale také podle stavu a úpravy lepeného povrchu.

Hodnocení drsnosti ukázalo, že úprava $\text{KOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ změnila povrchovou strukturu dubového dřeva a zvýšila členitost lepeného povrchu. Tato modifikace byla provedena s cílem ovlivnit smáčivost, penetraci lepidla a jeho mechanické zakotvení. Zvýšenou drsnost je však nutné hodnotit opatrně, protože příliš heterogenní povrch může zhoršit rovnoměrný kontakt lepidla s podkladem. Výsledky proto slouží jako podklad pro interpretaci pevnosti lepených spojů.

5.2 Podélná smyková pevnost při tahovém namáhání

Na základě průkazných zkoušek lepených spojů dubového dřeva podle ČSN EN 302-1 (2023) byla stanovena podélná pevnost ve smyku při tahovém namáhání pro jednotlivé typy lepidel. Průměrné hodnoty podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání jsou uvedeny v příloze 4 a výsledky jsou graficky znázorněny v grafech 3 až 5. Popisné statistiky jednotlivých souborů jsou uvedeny v tabulkách 1–3 v příloze 3. Statistické rozdíly mezi jednotlivými typy lepidel byly ověřeny pomocí Kruskal-Wallisova testu, jehož výsledky jsou uvedeny v tabulkách 1–3 v příloze 5. Pro statistické výpočty byl použit software Statistica 14.0.1.25 (TIBCO Software Inc., USA).

Graf 3 znázorňuje závislost podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání klimatizovaných zkušebních těles (typ zkoušky 1) na použitém typu lepidla. Z výsledků je patrné, že jednotlivé typy lepidel se z hlediska dosažené pevnosti nechovají stejně a je možné je rozdělit přibližně do dvou skupin. První skupinu tvoří dle tabulky 2 lepidla 1 až 4, u nichž se medián pevnosti pohybuje převážně v nižší oblasti, přibližně mezi 7 až 10 MPa. Druhou skupinu představují dle tabulky 2 lepidla 5 až 9, která dosahují zřetelně vyšších hodnot, většinou okolo 14 až 17 MPa. Nejvyšší hodnoty vykazuje lepidlo PUR2010, jehož medián leží kolem 16–17 MPa. Naměřené hodnoty u lepidla PUR2010 se pohybují v širším rozpětí, což svědčí o určité variabilitě mezi jednotlivými vzorky. Přesto si toto lepidlo udržuje vysokou úroveň podélné smykové pevnosti a z hlediska dosažených výsledků se jeví jako velmi perspektivní pro lepení dubového dřeva. Vyšší variabilita výsledků byla zaznamenána také u lepidel LIGNOFEN G/3/D a KESTOKOL WR6040 + Hardener M, u nichž horní hodnoty smykové pevnosti dosahovaly přibližně 20–25 MPa, zatímco spodní hodnoty byly výrazně nižší. U těchto lepidel tedy lze pozorovat dobrý potenciál pro dosažení vysokých



Graf 3 Podélná smyková pevnost při tahovém namáhání v expozici 1 (klimatizování)

hodnot podélných smykových pevností, ale současně i větší citlivost na rozdíly mezi vzorky, kvalitu lepení nebo charakter porušení.

Lepidla ICEMA R145/12 a GRIPPRO GLUE A011 100/30 vykazují ve srovnání s PUR2010 užší rozpětí naměřených hodnot, což naznačuje nižší variabilitu mezi jednotlivými vzorky. Jejich střední hodnoty pevnosti jsou však mírně nižší než u lepidla PUR2010. Z praktického hlediska tak tato lepidla vykazují poměrně vyrovnané chování, nicméně z hlediska dosažené pevnosti zůstává nejvýraznější lepidlo PUR2010.

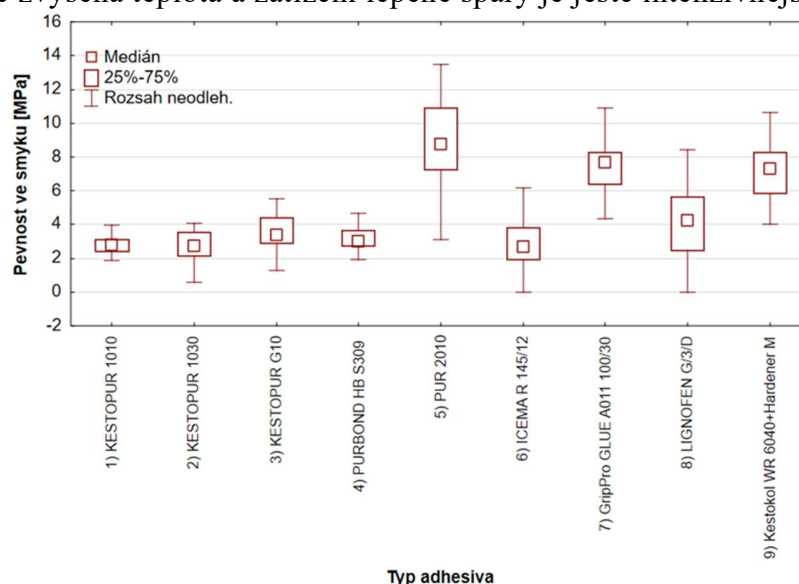
Z lepidel uvedených v tabulce 2 dosahovala lepidla 1 až 4 nejnižších hodnot podélné smykové pevnosti lepené spáry, konkrétně KESTOPUR 1030, které vykazovalo nejnižší střední hodnotu i celkově nízké hodnoty podélné smykové pevnost při tahovém namáhání. PURBOND HB S309 má také nízký medián a zároveň poměrně široké rozpětí směrem k nízkým hodnotám, což může ukazovat na nižší stabilitu chování lepeného spoje. Lepidla KESTOPUR 1010 a KESTOPUR G10 dosahují o něco vyšších hodnot, avšak stále se pohybují dle tabulky 2 pod úrovní lepidel 5 až 9. Z hlediska pevnosti ve smyku tedy tato skupina nepůsobí pro klimatizované podmínky tak příznivě.

Význam klimatizovaných těles jako referenčního stavu lze podpořit také výsledky práce Wang et al. (2015), kteří sledovali smykovou pevnost lepených spojů ze smrku ztepilého při různých teplotách zkoušení. Jejich výsledky ukazují, že při odklonu od standardních laboratorních podmínek, zejména při nízkých teplotách, dochází ke změnám pevnosti lepeného spoje a současně k nárůstu variability výsledků. Z tohoto hlediska jsou klimatizovaná tělesa důležitá především jako výchozí srovnávací úroveň, při které lze lépe posoudit vlastní vliv typu lepidla bez současného působení výrazného teplotního nebo vlhkostního namáhání. Taktéž Hýsek et al. (2024) zjišťovali vliv vybraných lepidel na smykovou pevnost. U referenčního PUR lepidla dosáhly spoje ze smrku a dubu pevností přibližně okolo 10 MPa, zatímco u buku a wenge byly hodnoty vyšší, přibližně 12,5–13,5 MPa. Tyto výsledky ukazují, že i při použití běžného referenčního PUR lepidla a bez extrémního zatížení se dosažená pevnost výrazně mění podle kombinace lepidla a dřeviny. Autoři upozorňují, že pevnost PUR spoje může být ovlivněna přítomností extraktivních látek, které zasahují do chemické interakce mezi lepidlem a dřevem, a dále také mikroskopickou strukturou dřeva, například u dubu povrchovou drsností a anatomickou stavbou. Sahula et al. (2023) se také soustředili na problematiku pevnosti lepeného spoje dubového dřeva s využitím jednosložkového

PUR lepidla s využitím povrchového impregnace. Autoři použili expozici dle ČSN EN 302-1 (2023), při níž byla zkušební tělesa klimatizována a následně zkoušena v suchém stavu. V tomto referenčním režimu dosáhly nejvyšších pevností spoje s alkalicky upraveným povrchem, konkrétně při použití KOH a $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, a to přibližně 10,3–10,5 MPa. Autoři tento nárůst vysvětlují neutralizací tříslovin v povrchové vrstvě dubového jádra a zlepšením interakce mezi povrchem dřeva a PUR lepidlem. Vyšší hodnoty pevnosti ve smyku dosažené u klimatizovaných těles v této práci lze podpořit výsledky Morin-Bernard et al. (2020), kteří hodnotili pevnost lepené spáry u vybraných listnatých dřevin určených pro výrobu lepeného lamelového dřeva. Autoři uvádějí, že po klimatizaci materiálu při 20 °C a 65 % relativní vlhkosti byly v suchém stavu dosaženy velmi vysoké pevnosti až 19,3 MPa u bílého dubu (*Quercus alba*) lepeného 2C-PUR lepidlem. Autoři uvádějí, že výsledná smyková pevnost souvisí nejen s hustotou dřeva, u níž lze pozorovat tendenci k nárůstu pevnosti, ale také s kvalitou lepení, přípravou povrchu, penetrací lepidla a charakterem porušení. Rozhodující je tedy také to, zda porušení probíhá převážně ve dřevě, nebo v oblasti lepené spáry. Obdobné závěry uvádějí také Aicher et al. (2018), kteří hodnotili smykovou pevnost lepených spár u průmyslově vyráběného lepeného lamelového dřeva z evropských a tropických listnatých dřevin. Jejich výsledky ukazují, že u listnatých dřevin mohou být v suchém, klimatizovaném stavu dosahovány poměrně vysoké hodnoty pevnosti lepené spáry, přibližně až kolem 19 MPa. Tyto poznatky potvrzují, že pevnosti zjištěné v této práci u některých lepidel, pohybující se přibližně v rozmezí 14–17 MPa, nelze považovat za nereálně vysoké. Naopak je lze interpretovat jako projev kvalitně vytvořeného lepeného spoje, vhodné kompatibility lepidla s použitou dřevinou a vysokého pevnostního potenciálu dubového dřeva v klimatizovaném stavu.

Graf 4 taktéž znázorňuje závislost podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání u máčených tělesech (typ zkoušky 2). U máčených těles je patrné výraznější rozlišení mezi jednotlivými lepidly než u klimatizovaných těles. Nižších hodnot dosahovala zejména lepidla 1–4 a 6 (tabulka 2), jejichž střední hodnoty se pohybovaly přibližně v oblasti 2 – 4 MPa. Tyto výsledky naznačují nižší odolnost daných systémů vůči přímému působení vody, kdy může docházet k oslabení lepené spáry i rozhraní mezi lepidlem a dřevem. Nejvyšší pevnost po máčení vykazovalo lepidlo 5 tedy

PUR2010, jehož střední hodnoty se pohyboval okolo 9 MPa. Přestože je u tohoto lepidla patrné širší rozpětí naměřených hodnot, zůstává z hlediska dosažené pevnosti nejvýraznějším lepidlem v rámci hodnoceného souboru. Vysokých hodnot dosahovala rovněž lepidla GRIPPRO GLUE A011 100/30 a KESTOKOL WR 6040 + Hardener W, která se pohybovala přibližně v oblasti 7 – 8 MPa. Lepidlo LIGNOFEN G/3/D vykazovalo střední hodnoty pevnosti a současně poměrně široké rozpětí výsledků, což ukazuje na méně vyrovnané chování po máčení. Lze tedy konstatovat, že máčení představovalo pro lepené spoje významné vlhkostní zatížení, které vedlo k poklesu pevnosti zejména u méně odolných lepidel. Současně však výsledky ukazují, že některé systémy, především PUR2010, si i po přímém působení vody zachovaly relativně vysokou pevnost. Tento poznatek je důležitý pro následné hodnocení vařených těles, kde se k působení vody přidává také zvýšená teplota a zatížení lepené spáry je ještě intenzivnější.

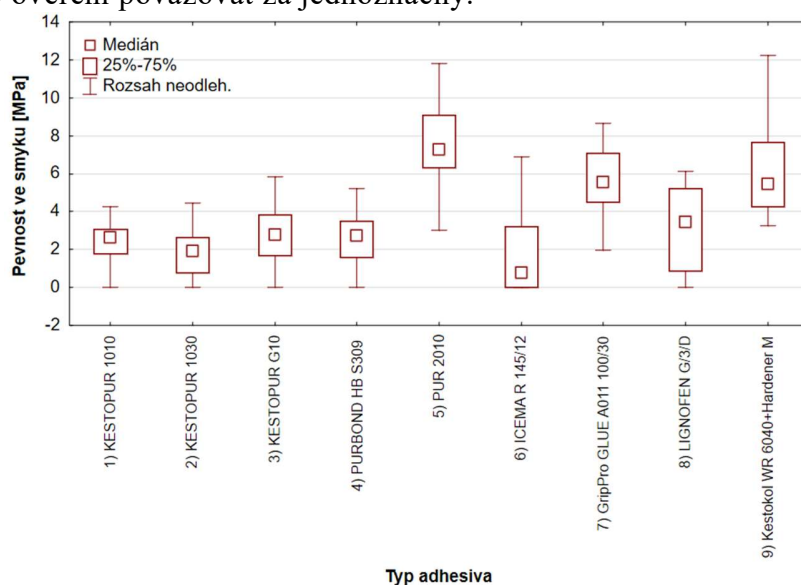


Graf 4 Podélná smyková pevnost při tahovém namáhání v expozici 2 (máčení)

Výsledky máčených těles lze porovnat s prací Bockel et al. (2020), kteří hodnotili podélné smykové pevnosti při tahovém namáhání bukových (*Fagus sylvatica* L.) spojů lepených jednosložkovými PUR lepidly dle EN 302-1 (2004). Pro vlhký stav byla použit typ zkoušky A2, tedy 4 dny ponoření ve vodě při 20 ± 2 °C a následné zkoušení ve vlhkém stavu. Autoři prokázali, že uložení ve vodě vedlo k výraznému poklesu této pevnosti i podílu porušení ve dřevě oproti klimatizovanému stavu. U 1C PUR lepidel se smykové pevnosti po máčení pohybovaly přibližně v oblasti 3 – 5 MPa. Ve vztahu

k výsledkům této práce je podstatné, že máčení rovněž vedlo k výraznému rozlišení jednotlivých adhezivních systémů podle jejich odolnosti vůči přímému působení vody. Obdobné poznatky uvedli Kläusler et al. (2014), jež hodnotili lepené spoje bukového (*Fagus sylvatica* L.) a douglaskového (*Pseudotsuga menziesii*) dřeva s jednosložkovým PUR lepidlem ve vlhkém stavu podle EN 302-1 (2004) Pro máčený stav typ zkoušky A2, který zahrnoval 4 dny uložení zkušebních těles ve vodě při 20 °C. U bukových těles dosahovala vlhkost při zkoušení dle A2 přibližně 119 %, zatímco u klimatizovaných těles (typ zkoušky 1) činila přibližně 13 %. Autoři prokázali, že přímé působení vody vedlo k výraznému snížení pevnosti ve smyku i podílu porušení ve dřevě oproti klimatizovanému stavu. Výsledky takto exponovaných těles lze porovnat i s prací Konnerth et al. (2016), kteří hodnotili pevnost lepených spojů devíti evropských dřevin, včetně dubu zimního (*Quercus petraea*), při použití MUF, PRF a 1C PUR lepidla. Pro vlhký stav byl použit režim typ zkoušky A2 podle EN 302-1 (2004). U dubových spojů se po tomto zatížení pevnosti pohybovaly přibližně v rozmezí 6 – 8 MPa v závislosti na použitém lepidle. Do diskuse těles lze přidat také poznatky Král et al. (2015). Tito autoři hodnotili pevnost lepených spojů dubového (*Quercus* L.) a bukového (*Fagus sylvatica* L.) dřeva při použití PVAc a PU lepidla v různých hydrotermálních režimech. Pro vodní expozici byl použit typ zkoušky 2 zahrnující 4 dny uložení ve vodě při 20 °C s následnou klimatizací dne EN 205 (2003). U dubového dřeva lepeného PU lepidlem byla po této expozici zjištěna průměrná pevnost 4,78 MPa, zatímco u PVAc lepidla pouze 2,44 MPa. Opět výsledky ukazují, že přímé působení vody výrazně snižuje pevnost lepeného spoje, přičemž u dubu se PU lepidlo projevilo jako vhodnější systém než PVAc. Z uvedeného porovnání vyplývá, že výsledky máčených těles odpovídají obecnému trendu popsanému v literatuře, tedy poklesu pevnosti lepených spojů po přímé vodní expozici. Lepidlo PUR2010 si však i po máčení zachovalo nejvyšší pevnost ze sledovaných systémů, s hodnotou přibližně kolem 9 MPa, což naznačuje jeho příznivou odolnost vůči vodnímu zatížení.

Uvedený graf 5 znázorňuje závislost podélné pevnosti ve smyku u zkušebních těles při tahovém namáhání po procesu vaření zkušebních těles (typ zkoušky 3), tedy po velmi intenzivním vlhkostním a teplotním namáhání na použitém typu lepidla. Ve srovnání s klimatizovanými a máčenými tělesy je u vařených těles patrný výrazný pokles pevnosti u většiny lepidel. Vaření tak představuje velmi intenzivní zatěžovací režim pro lepený spoj, protože kombinuje přímé působení vody se zvýšenou teplotou. Tento účinek se může projevit jak změnou mechanických vlastností samotného lepidla, tak oslabením rozhraní mezi lepidlem a dřevem. Nejnižší hodnoty smykové pevnosti vykazují opět lepidla 1 až 4, kdy jejich střední hodnoty se pohybují převážně v oblasti 2–3 MPa. Mezi těmito lepidly nejsou patrné zásadní rozdíly, protože jejich hodnoty se v mezikvartilovém rozpětí výrazně překrývají. To naznačuje, že po vaření se tato skupina lepidel chová obecně slabě a žádné z nich nevykazuje výrazně lepší odolnost vůči kombinovanému působení vody a teploty. Mírně vyšší medián lze pozorovat u lepidla KESTOPUR G10, avšak vzhledem k překryvu hodnot nelze tento rozdíl bez statistického ověření považovat za jednoznačný.



Graf 5 Podélná smyková pevnost při tahovém namáhání v expozici 3 (vaření)

Nejvýraznějším výsledkům došlo u lepidla PUR2010. To dosahuje nejvyšší střední hodnoty smykové pevnosti ze všech hodnocených lepidel, přibližně kolem 9 MPa, a zároveň má i relativně vysoké dolní hodnoty. Tento fakt je značně důležitý, protože vysoké střední hodnoty samy o sobě nemusí nutně znamenat spolehlivé chování, pokud jsou minimální

hodnoty velmi nízké. V tomto případě však PUR2010 působí jako nejodolnější vůči vaření, protože i spodní část rozdělení se nachází výše než u většiny ostatních lepidel. Přesto je zde patrné poměrně široké rozpětí hodnot, což ukazuje na určitou variabilitu výsledků.

Značný pokles hodnot pevností ve smyku vykazuje lepidlo ICEMA R146/12. Přestože horní hranice rozsahu dosahuje přibližně k 7 MPa, střední hodnota leží okolo 1 MPa a dolní hodnoty jsou velmi nízké. Toto znamená, že u většiny vzorků došlo po vaření k výraznému oslabení spoje. Široké rozpětí pravděpodobně naznačuje nerovnoměrné chování lepidla, kdy část vzorků dosáhla ještě přijatelných hodnot, zatímco jiná část vykazovala velmi nízkou pevnost. Z hlediska praktického použití je takové chování problematické, protože ukazuje na sníženou spolehlivost v náročných vlhkostně-teplotních podmínkách. Lepidla GRIPPRO GLUE A011 100/300 a KESTOKOL WR 6040 + HARDENER M dosahují po vaření středních až vyšších hodnot smykové pevnosti. Mediány se pohybují přibližně kolem 5–6 MPa, což je výrazně více než u lepidel z první skupiny, mezi které patří lepidla 1–4 a 6 (tabulka 2), ale stále méně než u lepidla PUR2010. GRIPPRO GLUE A011 100/300 má poměrně kompaktní rozložení hodnot a působí relativně stabilně. Lepidlo KESTOKOL WR 6040 + HARDENER M vykazuje nižší medián pevnosti než PUR2010, avšak jeho horní hodnoty dosahují až přibližně 12 MPa. To naznačuje, že lepidlo 9 může za příznivých podmínek dosahovat také relativně vysokých pevností, avšak výsledky nejsou tak stabilní. Ve srovnání s PUR2010 proto nepůsobí jako celkově nejodolnější systém, ale spíše jako lepidlo s lokálně vysokými hodnotami pevnosti po vaření. Lepidlo LIGNOFEN G/3/D vykazuje po expozici vařením výrazný pokles pevnosti oproti klimatizovanému a máčenému stavu. Z hlediska dosažených hodnot ho lze zařadit mezi méně odolné systémy, protože moc nepřekračuje úroveň lepidel z první skupiny 1–4 (tabulka 2). Tento výsledek potvrzuje, že vaření představovalo pro dané lepidlo výrazně zatěžující expoziční režim.

Lze tedy konstatovat, že vaření způsobilo výraznou diferenciaci mezi jednotlivými lepidly. Nejlepší výsledky vykazuje lepidlo PUR2010, které si i po velmi náročném zatížení udrželo nejvyšší pevnost ve smyku. Jako relativně příznivá lze hodnotit také lepidla GRIPPRO GLUE A011 100/300 a KESTOKOL WR 6040 + HARDENER M, která dosahují středních až vyšších hodnot. Naopak lepidla 1 až 4 a zejména lepidlo 6 (dle tabulky 2) vykazují nízkou odolnost vůči

vaření. Výsledky tedy ukazují, že samotný typ lepidla má zásadní vliv na zachování pevnosti lepeného spoje po vystavení vysoké vlhkosti a teplotě.

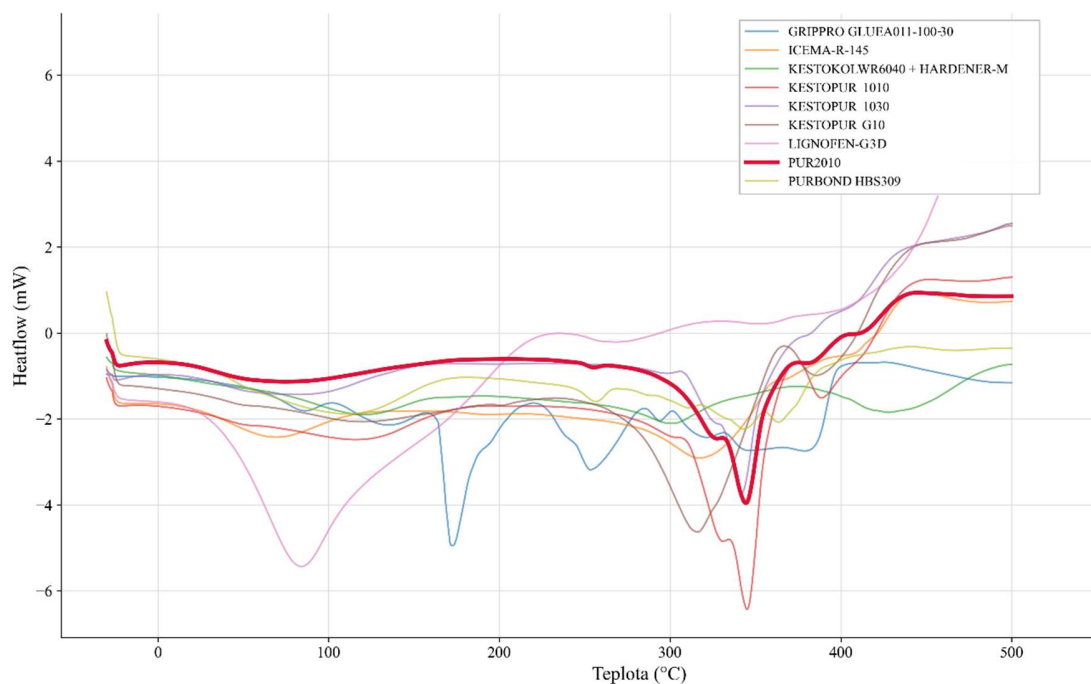
U vařených těles je důležité zejména lepidlo PUR2010, které i po expozici vařením dosahovalo nejvyšší pevnosti ze všech hodnocených lepidel. Medián podélné smykové pevnosti při tahovém namáhání se pohyboval přibližně kolem 9 MPa, přičemž většina hodnot zůstala výrazně nad úrovní lepidel 1–4 a 6. Tento výsledek lze porovnat s prací Kläuslera (2014), který u spojů lepených 1C PUR lepidly hodnotil režim A4 podle EN 302-1 (2004) zahrnující 6 hodin expozice ve vařící vodě a následné 2 hodiny uložení ve vodě při 20 °C. U spojů z bukového dřeva lepených 1C PUR se výsledné pevnosti po tomto zatížení pohybovaly přibližně v rozmezí 6–9 MPa. Autor tento pokles oproti klimatizovanému stavu vysvětluje zejména působením vody na rozhraní dřevo–lepidlo, kde může docházet ke snížení adheze a omezení přenosu zatížení mezi lepidlem a dřevem. Kläusler et al. (2013) hodnotili vliv vlhkosti na mechanické chování adhezivních polymerů používaných pro konstrukční lepení dřeva. Jejich výsledky prokázaly, že u jednosložkových polyuretanových lepidel dochází vlivem rostoucí relativní vlhkosti a přímého kontaktu s vodou k poklesu pevnosti a modulu pružnosti polymerního filmu. Tento jev je přisuzován plastifikačnímu účinku vody a narušení vnitřních vodíkových vazeb v polymerní struktuře. Tyto poznatky lze využít také při interpretaci vařených těles v této práci, protože pokles pevnosti po vaření může souviset nejen s oslabením rozhraní dřevo–lepidlo, ale také se změnou mechanických vlastností samotného PUR lepidla při vysokém obsahu vlhkosti. Výsledky vařených těles lze taktéž vztáhnout k práci Gržan et al. (2025), hodnotící lepené spoje dubového dřeva s různými PUR lepidly v suchém stavu a po umělém vlhkostním stárnutí. Autoři sice nezkoušeli přímo vaření zkušebních těles, jejich výsledky však ukazují, že PUR lepidla mohou u dubového dřeva vykazovat dobrou odolnost vůči změnám vlhkosti, protože si po cyklickém vlhkostním zatížení zachovala poměrně vysokou smykovou pevnost, přibližně v rozmezí 12–14 MPa. Ve srovnání s tím představuje vaření použité v této práci přísnější expoziční režim, protože kombinuje přímé působení vody a zvýšené teploty, což může vést k výraznějšímu oslabení lepené spáry.

5.3 Termická analýza lepidel a modifikačních komponentů

Termická analýza byla provedena za účelem posouzení teplotní stability vybraných lepidel a modifikačních komponentů používaných pro konstrukční lepení dubového dřeva. Získané výsledky umožňují porovnat jejich chování při postupném teplotním zatížení a identifikovat oblasti, ve kterých dochází k významnějším změnám struktury nebo počátku termické degradace.

5.3.1 Termická analýza lepidel

Charakteristika termomechanických vlastností testovaných lepidel je popsána prostřednictvím výsledného grafu 6, kde je vyjádřena závislost intenzity tepelného toku, jenž je působící na testovaný vzorek, v závislosti na rostoucí teplotě.



Graf 6 DSC graf teplotní křivky lepidel

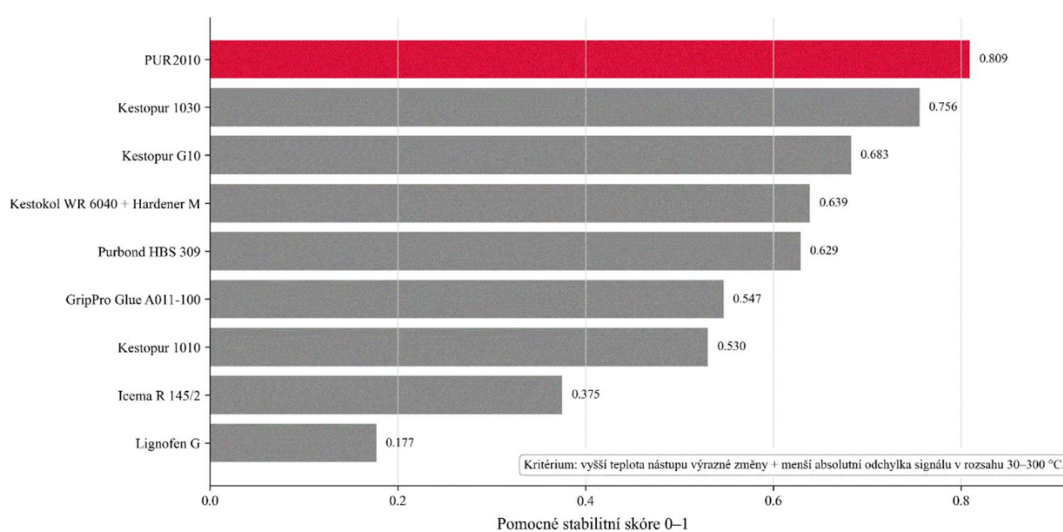
Společné porovnání jednotlivých DSC křivek (viz graf 6) ukazuje, že každé lepidlo se při zahřívání chová výrazně odlišně. Rozdíly jsou patrné v celém rozsahu tepelného toku, poloze výrazných minim a maxim a v plynulosti průběhu křivek. Některá lepidla vykazují výrazné tepelné změny již v nižších teplotních oblastech, zatímco jiná si zachovávají

stabilnější průběh až do vyšších teplot. V rámci testovaných lepidel vykazuje PUR2010 v porovnání s ostatními lepidly poměrně vyrovnaný průběh v nízké a střední teplotní oblasti. Od počátku měření až přibližně do oblasti 250–300 °C nedochází k prudkým výkyvům tepelného toku, což naznačuje, že systém si v této oblasti zachovává relativně stabilní charakter. Průběh křivky je pozvolný a ve srovnání s některými ostatními lepidly nevykazuje výrazné časné propady ani náhlé tepelné odezvy. Výraznější změna u vzorku PUR2010 nastává až ve vyšší teplotní oblasti, přibližně nad 300 °C. V této části křivky je patrný výraznější pokles tepelného toku a následný přechod do rostoucí části křivky. Tuto oblast lze interpretovat jako nástup intenzivnější tepelné přeměny polymerní struktury, případně jako začátek degradace některých méně stabilních vazeb v lepidle. Nejedná se tedy o tavení, ale spíše o strukturní a degradační změny probíhající při zvýšeném tepelném zatížení. Při teplotách 300–350 °C může docházet k degradaci tzv. tvrdých segmentů PUR lepidla, tedy izokyanátu. Při další zvyšování teploty 350–500 °C degraduje měkký segment PUR lepidla čili polyolová složka (polyesterové a polyetherové řetězce). Ve srovnání s nejlépe hodnoceným lepidlem vykazoval KESTOPUR 1030 výraznější tepelnou odezvu ve vyšší teplotní oblasti, ale i tak z vybraných lepidel byla taktéž jeho křivka velice stabilní. Vzorek KESTOPUR G10 vykazoval v části teplotního rozsahu poměrně příznivý průběh, avšak ve vyšší teplotní oblasti byly patrné výraznější změny tepelného toku. Zejména pokles signálu v oblasti přibližně 300–340 °C a následný růst křivky nad 370 °C naznačují intenzivnější tepelnou přeměnu polymerní struktury. Z tohoto důvodu nelze KESTOPUR G10 hodnotit jako celkově stabilnější než KESTOPUR 1030, který byl podle použitého stabilitního kritéria vyhodnocen jako nejstabilnější vzorek. Přesto lze KESTOPUR G10 považovat za relativně příznivý systém, zejména pokud je hodnocena jeho stabilita v nižší a střední teplotní oblasti.

Výsledky DSC analýzy lze porovnat se studií Richter et al. (2006). Autoři uvádějí, že tepelná stabilita jednosložkových PUR lepidel pro dřevo je výrazně ovlivněna chemickou strukturou lepidla, zejména obsahem reaktivních izokyanátových (NCO) skupin, stupněm polymerace prepolymery a rychlostí reakce. Autoři sledovali, jak je chemická struktura PUR lepidla ovlivňována při zvýšené teplotě. Výsledky PUR lepidel lze taktéž porovnat i se studií Clauß et al. (2011), kteří hodnotili tepelnou stabilitu lepených dřevěných spojů pomocí smykových zkoušek v rozsahu 20–220 °C. Autoři zjistili, že se zvyšující se teplotou klesá smyková pevnost samotného dřeva i lepených spojů, přičemž mezi jednotlivými lepidly byly

patrné výrazné rozdíly. Obzvláště důležité je, že rozdíly byly zaznamenány i uvnitř skupiny jednosložkových PUR lepidel, kde některé systémy vykazovaly pokles pevnosti již nad 50 °C, zatímco jiné dosahovaly dobré stability až do 220 °C. Ren (2010) ve své studii uvádí, že vlhkostí vytvrzovaná PUR lepidla reagují prostřednictvím izokyanátových skupin s vodou, přičemž vznikají aminové skupiny, oxid uhličitý a následně močovinové tvrdé segmenty. Průběh vytvrzování je proto výrazně ovlivněn dostupností vlhkosti a její difuzí do lepidla. Autor zároveň prokázal, že složení PUR lepidel ovlivňuje teplotní přechody vytvrzeného lepidla. U připravených PUR systémů se měknutí tvrdých segmentů pohybovalo přibližně od 135 °C do více než 180 °C podle obsahu tvrdé fáze, tedy izokyanátu (Clauß et al. 2011). Tvrzení o PUR lepidlech dobře doplnili Na et al. (2014), kteří se zabývali teplotně závislým dotvarováním jednosložkových polyuretanových lepidel pro lepení vlhkého a čerstvého dřeva. Autoři prokázali, že i kvalitní komerční PUR lepidlo může při zvýšení teploty z 40 °C na 50 °C a 100 °C vykazovat pokles modulu pružnosti, a tedy změnu mechanické odezvy spoje. Tento poznatek je důležitý pro interpretaci vzorku PUR 2010, protože jeho DSC křivka sice ukazuje relativně stabilní průběh do oblasti 250–300 °C, ale praktická stabilita lepeného spoje může být ovlivněna již při nižších provozních teplotách. Z tohoto důvodu nelze PUR lepidla hodnotit pouze podle vysokoteplotní tepelné odezvy, ale je nutné zohlednit také jejich viskoelastické chování a teplotně závislé dotvarování.

Orientační porovnání tepelné stability (graf 7) bylo provedeno na základě souhrnného vyhodnocení baseline – korigovaných dat z DSC. Hodnocen byl zejména nástup výraznější

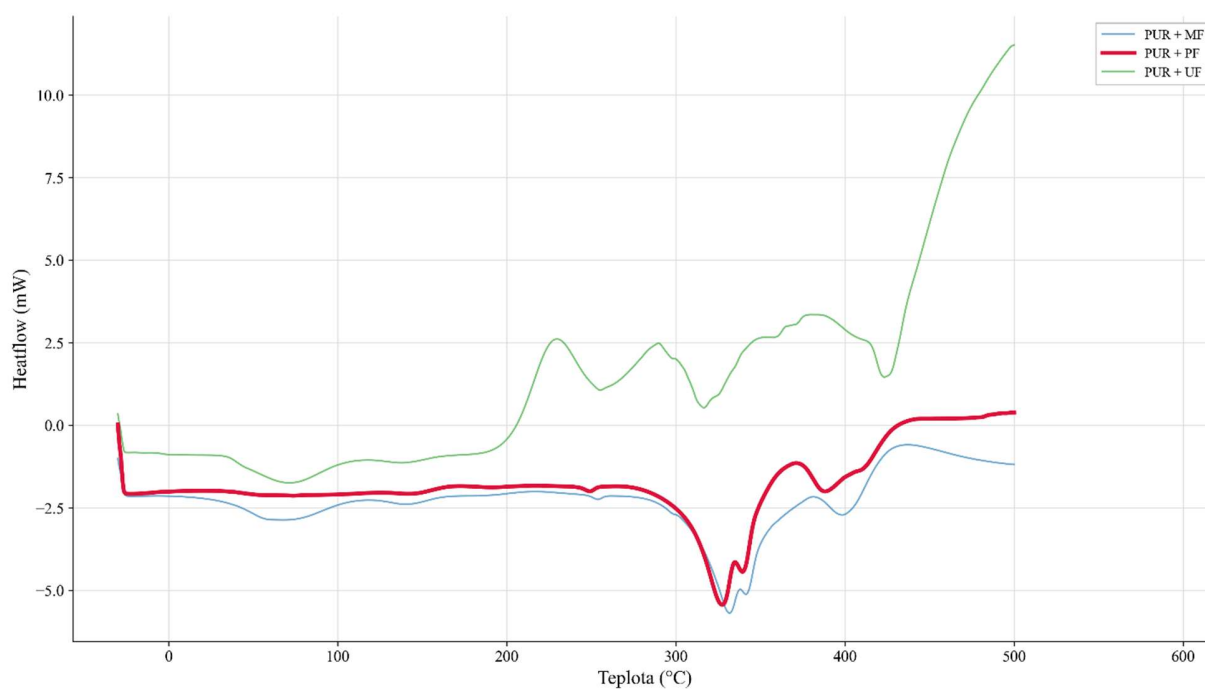


Graf 7 Tepelná stabilita lepidel

změny tepelného toku, celková tepelná aktivita křivky, maximální odchylka signálu, prudkost změn a plynulost průběhu. Za tepelně stabilnější byl považován vzorek, u kterého se výraznější odezva objevila až při vyšší teplotě a současně vykazoval nižší celkovou aktivitu a méně výrazné změny průběhu. Výsledné pořadí ukazuje pouze relativní stabilitu vzorků, nikoliv jejich absolutní hodnoty, ale i tak je patrné, že nejlepší výsledky vykazoval PUR2010.

5.3.2 Termická analýza adhezivního systému

I v této části je termomechanické chování testovaných adhezivních systémů charakterizováno pomocí výsledných DSC křivek (graf 8), které znázorňují závislost intenzity tepelného toku



Graf 8 DSC graf teplotní křivky adhezivního systému

na rostoucí teplotě působící na testovaný vzorek. Hodnoceny byly tři varianty adhezivního systému: Polyuretanové lepidlo s melamin-formaldehydovou pryskyřicí (PUR + MF), polyuretanové lepidlo s fenol-formaldehydovou pryskyřicí (PUR + PF) a polyuretanové lepidlo s močovino-formaldehydovou pryskyřicí (PUR + UF). Pro posouzení tepelného chování byly sledovány zejména tři charakteristické oblasti: možná změna sklonu křivky, nástup výrazné tepelné změny a dominantní tepelná odezva. Vyhodnocení bylo provedeno

na křivkách po referenční korekci baseline, které přesněji vystihují vlastní tepelnou odezvu jednotlivých systémů.

Vzorek PUR + MF vykazoval změnu sklonu při 55 °C. Tuto teplotní oblast lze chápat jako změnu sklonu křivky, která lze interpretovat jako orientační oblast skelného přechodu T_g . Při 307 °C jsou viditelné změny, které začínají odchylovat křivku od předchozího průběhu a dochází ke zřetelné změně. Je velice pravděpodobné, že v adhezivním systému dochází k výrazným tepelným procesům. V případě lepeného systému (PUR + MF) to může souviset se začátkem intenzivnější přeměny polymerní sítě, rozkladem některých vazeb či počínající teplotní degradací. Dominantní tepelná odezva při 331 °C představuje nejvýraznější změnu. Zde nastává nejsilnější efekt tepelné odezvy a je pravděpodobné, že dochází k nejvýraznější tepelné přeměně či degradaci adhezivního systému.

Ve svém výzkumu Merline et al. (2013) studovali MF pryskyřici pomocí DSC, FTIR a TGA. Autoři uvádějí dva exotermní píky v DSC a dvoustupňový mechanismus vytvrzování, v oblasti 140–160 °C převládá reverzibilní demethylolace a nad 160 °C síťovací reakce. Taktéž Moore & Donnelly (1963) ve své studii identifikovali dvoufázový mechanismus tepelného rozkladu melamin-formaldehydových pryskyřic při teplotách 250–400 °C. V první fázi je zahrnuto uvolňování plynů, zejména formaldehydu a oxidu uhličitého, v důsledku štěpení etherových vazeb. Následná degradační fáze vede ke vzniku kyanovodíku a amoniaku štěpením polymerní sítě. Další, kdo se pokoušel využívat melamin-formaldehydovou pryskyřici k lepšímu síťování při zvýšených teplotách byli Lin et al. (2021). Autoři ve své práci uvádí, že melamin-formaldehydová pryskyřice ve dřevěném systému vytváří stabilněji zesíťovanou strukturu, která do určitých teplot zvyšuje tepelnou stabilitu.

Odlišný průběh vykazovaly vzorky PUR + UF, u nichž je z grafu 8 patrná změna sklonu křivky již při 36 °C. Tato změna může být způsobena vlivem zbytkové vlhkosti či přítomností méně stabilních molekul. U UF složky lze totiž předpokládat vyšší citlivost na vlhkost a přítomnost vázané vody v systému, což negativně ovlivňuje stabilitu směsi a vede k významné tepelné odezvě. Výrazná tepelná odezva tohoto systému byla přístrojem zaznamenána při 424 °C. Tato hodnota byla nejvyšší ze všech sledovaných variant, avšak nejedná se o nejlepší tepelnou stabilitu. Nelineární průběh křivky naznačuje, že v adhezivním

systému probíhalo několik postupných změn. Tyto projevy mohou souviset s termickou degradací UF složky při vysokých teplotách, konkrétně s rozštěpením vazeb v polymerní síti nebo s transformací její struktury.

Zorba et al. (2008) hodnotili dvě močovino-formaldehydové pryskyřice, konvenční a inovativní, pomocí TG-DTA a FTIR v nevytvrzeném i vytvrzeném stavu. V článku uvádějí, že UF pryskyřice jsou sice v dřevařském průmyslu výhodné kvůli vysoké reaktivitě, dobrému výkonu a nízké ceně, ale jejich hlavní nevýhodou je hydrolytická citlivost vazeb, která vede k nižší odolnosti vůči vodě a vlhkosti a může souviset s následným uvolňováním formaldehydu. Stejně tak dospěli k závěru Park & Jeong (2011), kteří potvrdili tvrzení, že hydrolytická stabilita vytvrzených UF souvisí s molárním poměrem formaldehydu, což může způsobovat méně vyrovnaný průběh křivky a s tím související významný vliv na stabilitu UF. Časná změna sklonu při 36,2 °C nemusí představovat degradaci celého systému, avšak může souviset s nízkoteplotními fyzikálními změnami, nebo se zbytkovými těkavými složkami. Tuto variantu nastínili i Chen et al. (2021) kteří ohledně tepelné degradace UF pryskyřic uvádějí, že v první fázi degradace, tedy přibližně do 220 °C, je úbytek hmotnosti spojován především s odpařováním povrchové a vázané vlhkosti a s pomalým uvolňováním formaldehydu. Siimer et al. (2006) sledovali vytvrzování močovino-formaldehydových pryskyřic na dřevěném substrátu metodou TG-DTA. Autoři uvádějí, že vytvrzovací exoterma samotných UF pryskyřic se objevovala přibližně v oblasti 80–86 °C, zatímco výrazný endotermický efekt odpařování vody byl zaznamenán přibližně kolem 99–106 °C. Současné zdůrazňují, že v přítomnosti dřevěného substrátu je průběh vytvrzování ovlivněn difúzí vody a pryskyřice v lepené spáře, takže tepelné efekty pryskyřice a dřeva se mohou překrývat. Tento poznatek podporuje interpretaci časně změny sklonu u vzorku PUR + UF při 36,2 °C jako nízkoteplotní odezvy související s vlhkostí, relaxací nebo počátečními změnami v systému, nikoli jako hlavní degradace polymerní sítě.

Dle grafu 8 vykazoval poslední adhezní systém PUR + PF nejlepší průběh. Křivka je poměrně plynulá a hlavní tepelná odezva nastala v oblasti nad 300 °C. To ukazuje na dobrou tepelnou stabilitu systému do vyšších teplot a na relativně kompaktní průběh tepelné přeměny. U vzorku této skupiny byla teplotní změna sklonu detekována při 149 °C, což je nejvyšší hodnota ze všech sledovaných variant adhezního systému. Do těchto teplot

působil systém stabilně, ale nástup výrazné tepelné změny při 291 °C naznačuje začátek intenzivnější přeměny polymerní sítě. Při těchto teplotách je možné usuzovat, že dochází k postupnému štěpení méně stabilních vazeb izokyanátové složky a také k dalším změnám u fenol-formaldehydové sítě. Hlavní teplotní bod při 327 °C představuje maximum těchto změn, dochází k výrazným přeměnám v polymerní síti. Pravděpodobně se nejedná o relaxaci či dotvrzování, ale kombinaci vícero procesů.

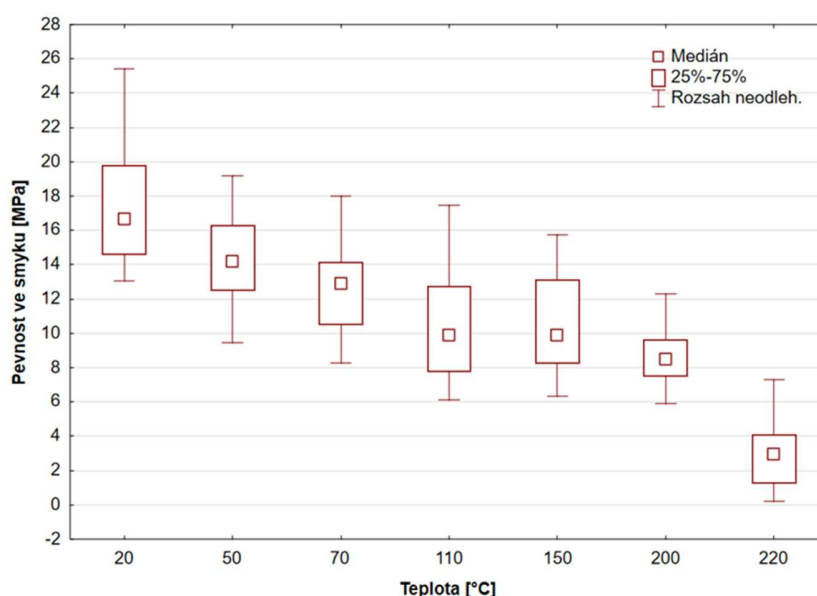
U vzorku PUR + PF byla možná změna sklonu DSC křivky zaznamenána při 149 °C. Tato hodnota velmi dobře odpovídá výsledkům Lisperguer et al., kteří uvádějí, že charakteristický vytvrzovací pík kapalné fenol-formaldehydové pryskyřice se nachází přibližně v oblasti 145–150 °C. U fenol-resorcinol-formaldehydových pryskyřic autoři dále pozorovali vytvrzovací píky při 99,9 °C a 158,2 °C u systému s nižším obsahem resorcinolu a jeden výrazný pík při 93,9 °C u systému s vyšším obsahem resorcinolu. Tyto výsledky potvrzují, že poloha tepelné odezvy závisí na složení pryskyřice a míře síťování. Lisperguer et al. (2005) zkoumali dvě laboratorně připravené fenol-resorcinol-formaldehydové pryskyřice (PRF) s rozdílným obsahem resorcinolu, a to pomocí DSC a DMA. První pryskyřice měla nižší obsah resorcinolu, konkrétně 15 %, zatímco druhá obsahovala 25 % resorcinolu. Autoři uvádějí, že samotné fenol-formaldehydové pryskyřice (PF) vykazují vytvrzovací exotermickou reakci obvykle v oblasti 142–165 °C. Charakteristický vytvrzovací pík kapalné PF pryskyřice se podle nich nachází přibližně při 145–150 °C, pokud není výsledek výrazně ovlivněn endotermickým efektem těkavých reakčních produktů. K podobným výsledkům došli Papadopoulou & Chrissafis (2011), kteří hodnotili běžnou fenol-formaldehydovou pryskyřici (PF) a modifikovanou PF pryskyřici pomocí TGA a DSC, a to samostatně i v kombinaci se dřevem. U standardní PF pryskyřice zaznamenali dvě překrývající se exotermické reakce v teplotách při 144 °C a 162 °C, které spojovali s kondenzačními reakcemi a tvorbou polymerní sítě. Z hlediska vyšších teplot autoři uvádí, že počátek degradace PF byl zaznamenán od 270 °C a výraznější úbytek hmotnosti při vyšších teplotách. Taktéž Kawalerczyk et al. (2023) se věnovali výzkumu hybridnímu systému fenol-formaldehydové pryskyřice upravenou izokyanátovou složkou pMDI. Z výsledků DSC je patrné, že přírůstek pMDI výrazně ovlivnil vytvrzování PF pryskyřice a nejvyšší odezva byla zaznamenána při 155 °C. Přestože systém PF/pMDI není totožný s hodnoceným vzorkem PUR + PF, oba systémy mají společný izokyanátový základ, protože polyuretanová lepidla

vznikají reakcemi izokyanátových skupin. Studie těchto autorů je proto vhodná jako podpůrný zdroj pro vysvětlení, že přítomnost izokyanátové složky může ovlivnit vytvrzování, síťování i následné tepelné chování fenol-formaldehydového systému.

5.4 Testování podélné smykové pevnosti za zvýšených teplot

U lepených spojů dubového dřeva byla při zvýšených teplotách stanovena podélná pevnost ve smyku při tahovém zatížení, a to s využitím metodiky vycházející z ČSN EN 302-1 (2023).

Z výsledků uvedených na grafu 9 je patrné, že u lepeného spoje lepidle PUR2010 dochází k postupnému snižování podélné pevnosti ve smyku se zvyšující se teplotou.



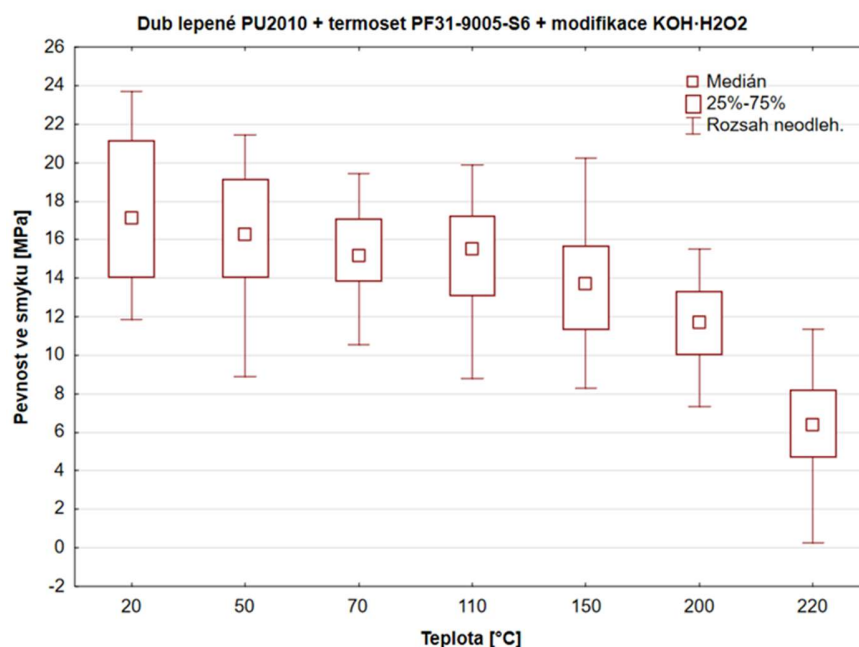
Graf 9 Podélná smyková pevnost při tahovém namáhání při zvýšených teplotách – PUR2010

Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány při 20 °C, kdy se střední hodnoty pohybovaly přibližně kolem 16–17 MPa, přičemž horní hranice naměřených hodnot dosahovala přibližně až 25 MPa. Již při 50 °C a 70 °C je značný pokles, avšak lepený spoj si stále zachovává relativně dobrou únosnost. Významnější snížení pevnosti se projevuje při teplotách 110 °C a 150 °C, kdy medián klesá přibližně k úrovni 10 MPa. Při dalších teplotních stupních dochází k pokračující degradaci spoje. Při 200 °C se medián pohybuje již pouze kolem 8–9 MPa a při 220 °C dochází k velmi výraznému poklesu, kdy pevnost klesá přibližně na 3 MPa. Tento vývoj ukazuje, že lepidlo PUR2010 vykazuje při nižších a středních teplotách ještě poměrně příznivé chování, avšak při teplotách nad 150 °C již dochází k výrazné ztrátě

soudržnosti lepeného spoje. Současně je z grafu patrný i určitý rozptyl hodnot, který může souviset s přirozenou variabilitou dubového dřeva, charakterem lepené spáry i mechanismem porušení jednotlivých zkušebních těles.

Úbytek podélné smykové pevnosti systému PUR2010 s rostoucí teplotou souvisí jak s termickými vlastnostmi samotného lepidla, tak s teplotní degradací dřevní hmoty. Z grafu 9 je patrné, že u lepidla PUR2010 nedochází v oblasti do 220 °C k jediné ostré degradaci, ale spíše k postupným změnám struktury materiálu. To odpovídá i mechanickým výsledkům, kde pevnost neklesá skokově, ale postupně – od vysokých hodnot při 20 °C až k výrazně sníženým hodnotám při 220 °C. Již při nižších a středních teplotách se může projevovat změkčování polymerní sítě, pokles tuhosti lepené spáry a oslabení mezifázového rozhraní mezi dřevem a lepidlem. Podobnému vědeckému záměru se věnovali Bernaczyk et al. (2023) a hodnotili vliv zvýšené teploty na podélnou tahovou smykovou pevnost lepených spojů podle EN 302-1 (2004). Autoři použili bukové dřevo v kombinaci s různými lepidly. Testována byla různá lepidla jako jsou EPI, PVAc, PRF, MF a 1C PUR při teplotách 20, 50, 70, 110, 150 a 200 °C. Výsledky prokázaly obecný pokles podélné smykové pevnosti při tahovém namáhání se zvyšující se teplotou, přičemž u PUR lepidel dosahovalo snížení pevnosti až 53 %. Autoři tento pokles nevysvětlují jedním mechanismem, ale připisují jej souběžnému působení více faktorů, zejména snížení pevnosti samotného dřeva a změkčování lepené spáry při teplotním zatížení. Tento závěr dávají do souvislosti také s hodnotami skelného přechodu lepidel, které byly stanoveny pomocí DSC analýzy. Také Clauß et al. (2011) hodnotili mimo jiné tři typy jednosložkových PUR lepidel podle EN 302-1 (2004), tedy metodou stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání. Při referenční teplotě 20 °C dosahovala PUR lepidla pevnosti v rozmezí 12–14 MPa. Se zvyšující se teplotou se však jejich chování výrazně lišilo. PUR 1 klesl již při 50 °C na 8,94 MPa a při 220 °C pouze na 2,19 MPa, zatímco PUR 2 si zachoval nejvyšší stabilitu, kdy dosahoval 11,76 MPa při 50 °C, 11,33 MPa při 150 °C, 9,57 MPa při 200 °C a ještě 6,87 MPa při 220 °C. PUR 3 vykazoval počáteční pevnost 13,35 MPa, ale při 70 °C klesl na 9,38 MPa a při 220 °C na 4,22 MPa. Autoři proto zdůrazňují, že PUR lepidla nelze hodnotit jednotně, protože jejich teplotní stabilita výrazně závisí na konkrétní formulaci, reaktivitě, otevřené době, viskozitě a chemické struktuře. Tento závěr je

významný i pro výsledky této práce, protože pokles pevnosti systému PUR2010 při zvýšené teplotě odpovídá obecnému chování PUR lepidel, avšak jeho míra je dána konkrétním složením použitého systému.



Graf 10 Podélná smyková pevnost při tahovém namáhání při zvýšených teplotách (PUR + PF)

U adhezivního systému PUR2010 modifikovaného fenol-formaldehydovou termosetickou složkou je průběh poklesu podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání se zvyšující se teplotou mírnější (graf 10), což naznačuje vyšší tepelnou stabilitu lepené spáry. Ve srovnání se samotným PUR2010 si tento systém uchovává vyšší pevnost zejména při teplotách 110 až 220 °C. Tento jev lze vysvětlit stabilizačním účinkem termosetické PF složky, která pravděpodobně přispívá ke zpevnění mezifázového rozhraní a ke snížení citlivosti spoje na teplotně indukované změkčení PUR matrice. Z výsledků grafu 10 je patrný obecný trend poklesu pevnosti se zvyšující se teplotou, avšak v porovnání s nemodifikovaným systémem PUR2010 je tento pokles pozvolnější. Při 20 °C dosahují střední hodnoty pevnosti přibližně 17 MPa, tedy hodnot srovnatelných, případně mírně vyšších než u samotného PUR2010. Také při 50 °C a 70 °C si systém zachovává vysokou úroveň pevnosti, kdy mediány zůstávají přibližně v rozmezí 15–16 MPa. Relativně příznivý průběh je patrný i při vyšších teplotách. Při 110 °C zůstávají střední hodnoty stále okolo 15 MPa, což naznačuje dobrou stabilitu

lepené spáry při středním teplotním zatížení. Výraznější pokles nastává až při 150–200 °C, kdy medián klesá přibližně ze 14 na 12 MPa. I při 220 °C si však systém zachovává zbytkovou pevnost kolem 6 MPa, což potvrzuje jeho vyšší odolnost vůči teplotnímu namáhání. Rozptyl výsledků je i v tomto případě poměrně patrný, avšak celkový průběh ukazuje, že modifikovaný systém si zachovává pevnost stabilněji a k výraznější degradaci dochází až při nejvyšších sledovaných teplotách.

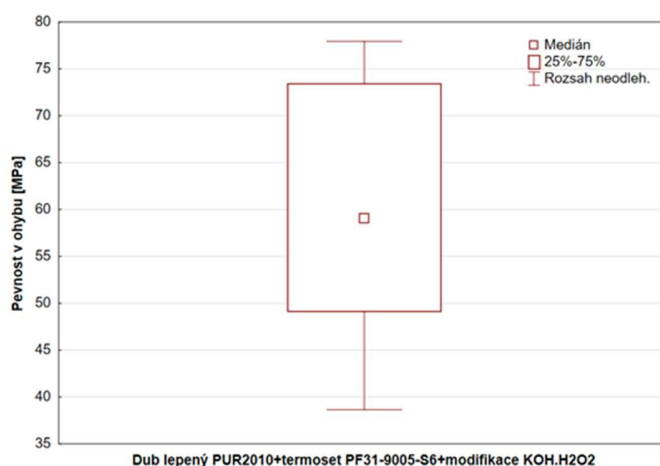
Výsledky lze orientačně porovnat s prací Liu et al. (2020), která potvrzuje, že u termosetických systémů nelze hodnotit tepelnou odolnost lepeného spoje pouze podle počáteční pevnosti při laboratorní teplotě. Autoři uvádějí, že MUF vykazovalo při 20 °C dokonce mírně vyšší pevnost než PRF, avšak při vyšších teplotách ztrácelo soudržnost lepené spáry rychleji. Naopak PRF vykazovalo pokles pevnosti blízký samotnému dřevu, což naznačuje vyšší tepelnou stabilitu lepené spáry. Tento poznatek je významný také pro hodnocení systému PUR + PF, u něhož není rozhodující pouze počáteční pevnost, ale především schopnost zachovat zbytkovou pevnost při zvýšeném teplotním namáhání. Přítomnost fenolické složky může v tomto systému přispívat ke stabilnější odezvě spoje při vyšších teplotách. Porovnání s PRF je proto vhodné chápat jako orientační srovnání s tepelně stabilnějším adhezivním systémem, nikoliv jako přímou materiálovou shodu. Dále je možné porovnat výsledky s prací Vaněrek et al. (2026), ti také hodnotili teplotní odolnost smrkových lepených spojů s použitím čtyř adhezivních systémů: 1C PUR, PRF, MUF a EP. Zkušební tělesa byla vystavena teplotám 100, 120, 140, 160 a 180 °C po dobu 1 a 2 h a následně byla ihned testována ve smyku tahem. Autoři prokázali, že pevnost všech lepených spojů s rostoucí teplotou klesala, přičemž již 100 °C bylo označeno jako kritická oblast z důvodu skelného přechodu lepidel a částečných změn v jejich struktuře. U termosetických lepidel PRF a MUF byla zjištěna dostatečná únosnost přibližně do 140 °C, zatímco epoxidové spoje vykazovaly souvislejší pokles pevnosti a jejich odolnost byla omezená již přibližně do 120 °C. Při vyšších teplotách, zejména nad 140 °C, se začala více projevovat nejen degradace lepidla, ale také pokles pevnosti samotného dřeva.

Ačkoliv Vaněrek et al. (2026) pracovali se smrkovým dřevem a odlišnými termosetickými lepidly, zejména PRF a MUF, jejich výsledky jsou pro tuto práci významné z obecného hlediska. Přímé porovnání je však omezené, protože v literatuře

nejdou vždy dostupné studie se stejnou kombinací dřeviny, typu lepidla a teplotního režimu. Srovnání s dalšími autory jako jsou např.: Zelinka et al. (2018), Zelinka et al. (2019) či Wang et al. (2015) je proto nutné chápat spíše orientačně. Výsledky přesto ukazují, že termosetická lepidla mohou při zvýšených teplotách vykazovat vyšší tepelnou stabilitu a že pokles pevnosti spoje nemusí souviset pouze s degradací lepidla, ale také s oslabením dřeva v okolí lepené spáry.

5.5 Stanovení pevnosti v ohybu rovnoběžně s vlákny

Před návrhem velkoformátových nosníků určených pro požární zkoušku byly provedeny ověřovací ohybové zkoušky malých lepených dubových nosníků o rozměrech přibližně



Graf 11 Pevnosti v ohybu lepeného lamelového nosníku k předtestování

40 × 45 × 855 mm. Graf 11 znázorňuje rozložení hodnot pevnosti v ohybu malých lepených dubových nosníků lepených PUR2010. Průměrná hodnota pevnosti v ohybu dosáhla 60,38 MPa, přičemž medián se pohyboval velmi blízko této hodnotě, přibližně kolem 59 MPa. To naznačuje, že soubor výsledků nebyl výrazně jednostranně ovlivněn extrémními hodnotami. Většina naměřených hodnot se nacházela přibližně v rozmezí 50–72 MPa, zatímco celkový rozsah výsledků byl přibližně 39–78 MPa. Tento rozptyl lze přičíst přirozené variabilitě dubového dřeva, lokálním rozdílům ve stavbě materiálu, orientaci vláken, případným vadám a charakteru porušení při ohybovém namáhání.

Výsledky předběžných ohybových zkoušek lze porovnat s prací Báder et al. (2025), kteří hodnotili 2 až 5 vrstvé malorozměrové lepené lamelové prvky z dubového dřeva

(*Quercus petraea*) lepené jednosložkovým PUR lepidlem. U třívrstvých těles použili výšku 45 mm, rozpětí podpor 810 mm a vzdálenost zatěžovacích válečků 270 mm, tedy uspořádání velmi blízké této práci. Autoři uvádějí pevnost v ohybu 59 ± 11 MPa u dvouvrstvých a 64 ± 9 MPa u třívrstvých prvků. V této práci byla u malých dubových nosníků lepených PUR2010 stanovena průměrná pevnost v ohybu 60,4 MPa, což odpovídá hodnotám uváděným v literatuře. Porovnání je však pouze orientační, protože se lišila skladba těles, kvalita lamel i konkrétní typ PUR lepidla. Morin-Bernard et al. (2020) hodnotili využití severoamerických tvrdých dřevin pro výrobu lepeného lamelového dřeva, včetně bílého dubu. U vzorků lepených 2C–PUR dosáhla smyková pevnost lepené spáry v suchém stavu 19 MPa, zatímco u MF lepidla 20,5 MPa. Po vlhkostní expozici však pevnost poklesla na 7,3 MPa u 2C–PUR a 11 MPa u MF. Výsledky potvrzují, že PUR lepidla mohou u dubu dosahovat vysoké pevnosti v suchém stavu, avšak jejich vlastnosti mohou být výrazně ovlivněny vlhkostním namáháním či vlivem extraktivních látek u jednotlivých dřevin. Šuhajdová et al. (2023) hodnotili lepené lamelové nosníky z tvrdých dřevin lepené PUR lepidlem, které byly zkoušeny taktéž destruktivní čtyřbodovou ohybovou zkouškou podle EN 408 (2010). U bukových nosníků dosáhla průměrná pevnost v ohybu 89,11 MPa a u bukovo-topolových nosníků 82,97 MPa, přičemž modul pružnosti byl 22 439 MPa, respektive 22 185 MPa. Vzhledem k odlišnému průřezu, počtu lamel, délce těles, skladbě materiálu a použité dřevině nelze tyto hodnoty přímo srovnávat s výsledky malých dubových nosníků v této práci. Metodicky blízký přístup s touto prací měli použili Hasanagić et al. (2022), přičemž také stanovovali podélný modul pružnosti dřevěných nosníků metodou čtyřbodového ohybu podle EN 408 (2010) a následně výsledky porovnávali s numerickým modelem v prostředí ANSYS. Experimentální část zahrnovala stanovení pevnosti v ohybu a deformační odezvy, přičemž právě naměřené hodnoty zatížení a průhybu byly použity jako vstupní data pro výpočet modulu pružnosti a ověření numerického modelu.

Při interpretaci výsledků je nutné zohlednit, že malé nosníky nemohou plně nahradit chování velkoformátového prvku. U lepeného lamelového dřeva se může projevovat velikostní efekt, kdy se s rostoucími rozměry prvku zvyšuje pravděpodobnost výskytu kritické vady v tahové oblasti. Tento princip popisují Hernandez et al. (1992), kteří uvádějí, že pevnost v ohybu dřevěných nosníků se s rostoucí velikostí snižuje právě v důsledku vyšší

pravděpodobnosti výskytu pevnostně redukujících znaků. Podobně Lam (2011) řeší velikostní efekt přímo u lepených lamelových nosníků. Z tohoto důvodu byly výsledky předběžných zkoušek použity pouze jako orientační a experimentálně podložený vstup pro návrh zatížení a předpokládaného průhybu velkoformátových nosníků.

5.6 Kritérium únosnosti testovaných nosníků

Výsledky zkoušky, vyjádřené v souladu s ČSN EN 1363-1 (2021), čl. 12.2, jsou pro kritérium nosnosti shrnuty v tabulce 7.

Tab. 7 Výsledky zkoušky pro kritérium únosnosti dle ČSN EN 1363-1 (2021)

Vzorek	Mezní hodnoty pro posouzení kritéria nosnosti	Zaznamenaný čas	Hodnocení kritéria nosnosti
Nosník PUR + PF modifikátor	Mezní průhyb (zřícení)	38 min	38 min
	Mezní rychlost průhybu	12 min	
Nosník PUR	Mezní průhyb (zřícení)	12 min	12 min
	Mezní rychlost průhybu	11 min	

Tabulka 7 shrnuje dosažené časy porušení kritéria nosnosti u obou zkoušených nosníků. U nosníku PUR + PF modifikátor bylo dosaženo mezního průhybu, který odpovídá zřícení prvku, po 38 minutách požární expozice. Mezní rychlost nárůstu průhybu byla zaznamenána již po 12 minutách, avšak samotné hodnocení kritéria nosnosti vychází z rozhodujícího okamžiku porušení, který byl stanoven na 38 minut. Tento výsledek ukazuje, že modifikovaný lepicí systém umožnil nosníku zachovat nosnou funkci po výrazně delší dobu.

U nosníku lepeného pouze systémem PUR byla mezní rychlost průhybu zaznamenána po 11 minutách, zatímco mezní průhyb byl dosažen po 12 minutách. Hodnocení kritéria nosnosti proto odpovídá hodnotě 12 minut. Oproti nosníku s modifikátorem došlo u tohoto vzorku k výrazně rychlejšímu dosažení mezního stavu a tím i k dřívější ztrátě nosné funkce a následnému zřícení.

Porovnáním obou výsledků je patrný výrazný pozitivní vliv modifikace lepicího systému. Nosník PUR + PF modifikátor dosáhl hodnocení kritéria nosnosti 38 minut, zatímco nosník s nemodifikovaným PUR pouze 12 minut. Rozdíl činí 26 minut, což představuje téměř trojnásobné prodloužení doby zachování nosnosti při požární expozici. Tento výsledek potvrzuje, že použitý modifikátor přispěl ke zvýšení požární odolnosti lepeného nosníku, zejména z hlediska zachování jeho únosnosti v čase.

Tabulka 8 uvádí maximální hodnoty vnitřních sil působících na zkušební nosníky v oblasti přímé aplikace zatížení. Hodnoty jsou rozděleny podle toho, zda bylo uvažováno pouze zkušební zatížení společně s vlastní tíhou záklopu, nebo celkové zatížení zahrnující také vlastní tíhu samotného nosníku.

Tab. 8 Výsledky zkoušky maximálních hodnot vnitřních sil

Vzorek	Maximální hodnota vnitřních sil od			
	zkušebního zatížení (4 síly v lichých osminách rozpětí) a vlastní tíhy záklopu		celkového zatížení (zkušební zatížení, vlastní tíha záklopu a nosníku)	
	Moment	Posouvající síla	Moment	Posouvající síla
Nosník PUR + PF modifikátor	7,46 kN·m	7,19 kN	7,64 kN·m	7,37 kN
Nosník PUR	7,34 kN·m	7,08 kN	7,52 kN·m	7,25 kN

U nosníku PUR + modifikátor byla při zatížení od zkušebních sil a vlastní tíhy záklopu stanovena maximální hodnota ohybového momentu 7,46 kN·m a posouvající síly 7,19 kN. Po zahrnutí vlastní tíhy nosníku vzrostl maximální ohybový moment na 7,64 kN·m a posouvající síla na 7,37 kN. U nosníku PUR byly odpovídající hodnoty mírně nižší. Maximální ohybový moment od zkušebního zatížení a vlastní tíhy záklopu činil 7,34 kN·m a posouvající síla 7,08 kN. Při uvažování celkového zatížení se hodnota ohybového momentu zvýšila na 7,52 kN·m a posouvající síla na 7,25 kN.

Z porovnání výsledků vyplývá, že oba nosníky byly vystaveny stejnému způsobu zatížení a velmi podobným hodnotám vnitřních sil. Drobné rozdíly v hodnotách ohybového

momentu a posouvající síly jsou dány zejména rozdílnou vlastní tíhou jednotlivých nosníků, která byla zahrnuta do výpočtu celkového zatížení. Po započtení vlastní tíhy nosníku došlo u obou vzorků k mírnému nárůstu ohybového momentu i posouvající síly. Z hlediska přímé aplikace zatížení lze proto konstatovat, že oba nosníky byly mechanicky namáhány srovnatelně, což umožňuje jejich následné porovnání při požární expozici.

5.7 Model predikce požární zkoušky

Tabulka 9 shrnuje vybrané časové stavy predikčního modelu dubového lepeného lamelového nosníku při požární expozici.

Tab. 9 Tabulkové predikce vybraných časových stavů

Čas [min]	Stav	T ISO [°C]	d_{char} [mm]	d_{eff} [mm]	b_{eff} [mm]	h_{eff} [mm]	W_{eff} [mm ³]	σ_m [MPa]	η [-]	w_{max} [mm]
0	únosný	20	0	0	100	120	240000	31,36	0,523	68,6
3	únosný	502	1,23	1,84	96,32	118,16	224150	33,58	0,56	74,5
6	únosný	603	2,45	3,68	92,65	116,32	208940	36,02	0,6	81,2
9	únosný	663	3,68	5,51	88,97	114,49	194359	38,73	0,645	88,7
12	únosný	705	4,9	7,35	85,3	112,65	180394	41,73	0,695	97,2
15	únosný	739	6,13	9,19	81,62	110,81	167032	45,06	0,751	106,7
20	únosný	781	8,17	12,25	75,49	107,75	146070	51,53	0,859	125,4
25	únosný	815	10,21	14,3	71,41	105,7	132979	56,6	0,943	140,5
28,1	neúnosný	832	11,48	15,56	68,88	104,44	125209	60,12	1,002	151
30	neúnosný	842	12,25	16,34	67,32	103,66	120575	62,43	1,04	158

Pozn.: Numericko-analytický model: $P = 2,59 \text{ kN}$, $f_{m,model} = 60 \text{ MPa}$, $k_{red} = 0,5835$

Tabulka 9 shrnuje vybrané časové stavy numericko-analytického modelu dubového lepeného lamelového nosníku při požární expozici. Se vzrůstající dobou expozice dochází k postupnému nárůstu teploty podle normové křivky ISO 834-1 (1999) a současně k prohlubování zuhelnatělé vrstvy. V modelu je tento vývoj převeden na účinnou mechanickou redukci průřezu, která následně ovlivňuje účinnou šířku, účinnou výšku a průřezový modul nosníku. Z tabulky 9 je patrné, že v počátečním stavu má průřezový modul hodnotu přibližně 240 000 mm³, zatímco v závěrečné části výpočtu klesá přibližně na 120 575 mm³. To znamená, že účinný průřezový modul se vlivem požární expozice sníží přibližně na polovinu původní hodnoty. Tento pokles se přímo promítá do nárůstu

vypočteného ohybového napětí σ_m , které se z počáteční hodnoty okolo 31 MPa postupně zvyšuje až nad hodnotu modelové pevnosti $f_{m,model} = 60$ MPa. Napětové využití η v počátečním stavu dosahuje hodnoty přibližně 0,523, což znamená, že nosník má podle modelu dostatečnou rezervu únosnosti. V průběhu požární expozice se však tato rezerva postupně snižuje; přibližně po 20 minutách dosahuje $\eta = 0,859$, takže je nosník stále hodnocen jako únosný, avšak již s omezenou rezervou. V pozdější fázi hodnota překračuje mezní hodnotu 1,0, což odpovídá dosažení výpočetního mezního stavu podle zvoleného pevnostního kritéria. Hodnoty po překročení této hranice proto nepředstavují bezpečně únosný stav, ale slouží k popisu dalšího vývoje napětí, průhybu a redukce průřezu. Ve 30. minutě model vykazuje mírné překročení únosnosti, kdy $\eta = 1,040$. Tabulka 9 dokládá, že rozhodujícím faktorem pro dosažení mezního stavu není pouze nárůst teploty, ale zejména postupná ztráta účinného průřezu. S rostoucí dobou požární expozice dochází ke snižování hodnot b_{eff} , h_{eff} a zejména W_{eff} , což vede k postupnému růstu ohybového napětí a napětového využití η . Model vyobrazuje plynulý přechod od únosného stavu k meznímu stavu, přičemž po překročení hodnoty $\eta = 1$ jsou další hodnoty interpretovány jako postkritický vývoj. Výsledky tím potvrzují, že navržený model umožňuje sledovat nejen samotný čas dosažení mezního stavu, ale také postupnou změnu mechanické odezvy nosníku během požární expozice.

Khelifa et al. (2024) se ve své práci věnovali modelování odezvy dřevěných nosníků vystavených požáru a zdůraznili, že při takovém posouzení je nutné zohlednit nejen šíření tepla v průřezu, ale také postup zuhelnatění a změnu mechanických vlastností materiálů s rostoucí teplotou. Autoři použili postupné propojení teplotní analýzy se strukturální odezvou nosníku, přičemž vývoj zuhelnatělé vrstvy a degradace vlastností byly zahrnuty do navazujícího mechanického výpočtu. Schnabl & Turk (2006) se zabývali numerickým modelováním zuhelnatění dřevěných nosníků vystavených požáru. Jejich práce je významná zejména tím, že nehodnotí pouze samotnou hloubku zuhelnatění, ale popisuje postupné šíření tepla a vlhkosti v průřezu nosníku a jejich vliv na tvorbu zuhelnatělé vrstvy. Pečenko et al. (2013) představili pokročilý výpočetní postup pro stanovení odezvy dřevěného nosníku vystaveného požáru. Model byl rozdělen do dvou navazujících částí. V první fázi byl stanoven vývoj teplotního pole a hloubka zuhelnatění v průřezu a ve druhé fázi byla provedena mechanická analýza nosníku. Autoři zároveň porovnávali pokročilý výpočetní

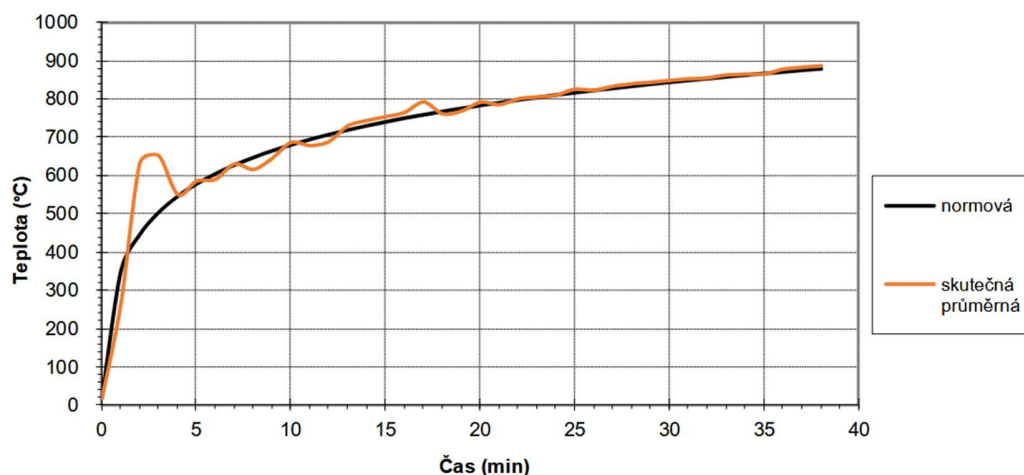
model s metodou redukováného průřezu podle Eurokódu, což podporuje využití účinného průřezu jako zjednodušeného, ale prakticky použitelného návrhového přístupu (Huč et al., 2025). Dalšími autory, kteří se zaměřili na modelování, byli Špilák et al. (2022), zabývali se stanovení zuhelnatělé vrstvy dřevěných nosníků pomocí modelu metody konečných prvků v prostředí ANSYS. Autoři využili entalpický přístup pro tepelnou analýzu a model validovali pomocí středně velkých požárních zkoušek smrkových nosníků. Významné je, že jejich model dokázal poměrně přesně popsat teplotní profily i rozsah zuhelnatění, přičemž uváděná přesnost simulace teplotních profilů byla v průměru 91,7 % a přesnost stanovení plochy zuhelnatělé vrstvy 93,0 %. Tento článek je vhodný jako opora pro tvrzení, že numerické modelování teplotního pole a zuhelnatění může být použitelné pro predikci požární odezvy dřevěných prvků, pokud je model ověřen nebo kalibrován vůči experimentálním datům.

Souhrnně lze tyto studie využít jako odborné podklady pro zdůvodnění zvoleného modelovacího přístupu. Ukazují, že predikce požární odezvy dřevěných prvků může být založena na propojení teplotního pole, postupu zuhelnatění a následného mechanického posouzení. Zároveň z nich vyplývá, že spolehlivost takového modelu závisí nejen na správně definovaných vstupních parametrech, ale také na jeho porovnání s experimentálními výsledky, případně na kalibraci podle reálného chování zkoušeného prvku.

5.8 Požární zkouška

5.8.1 Průběh teploty v peci a zkušební podmínky

Průběh teploty v peci představuje jednu ze základních zkušebních podmínek požární zkoušky, protože definuje tepelnou expozici zkoušeného prvku. Skutečná průměrná teplota v peci byla proto v průběhu zkoušky porovnána s normovou teplotní křivkou podle ČSN EN 1363-1 (2021), odpovídající standardní požární expozici ISO 834-1 (1999). Cílem tohoto vyhodnocení bylo ověřit, zda zkušební vzorek byl během zkoušky vystaven požadovanému teplotnímu zatížení a zda případné odchylky skutečného průběhu od normové křivky mohly ovlivnit interpretaci výsledků.



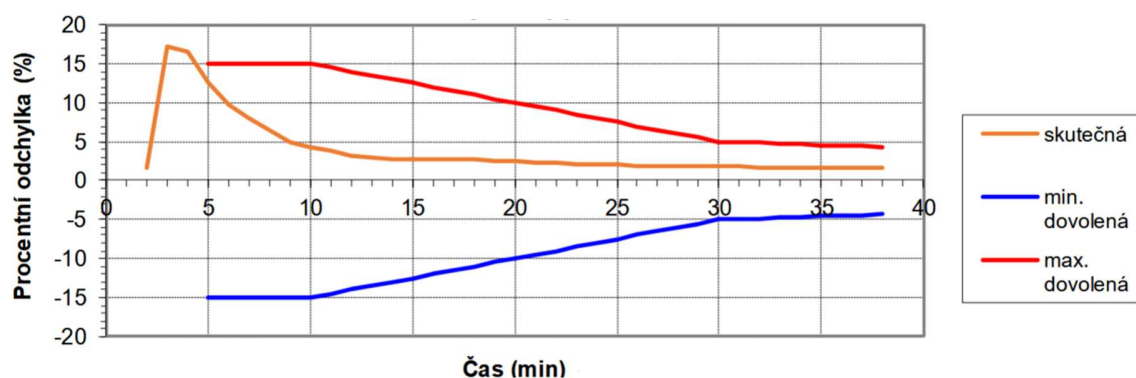
Graf 12 Průměrná teplota v peci dle ČSN EN 1363-1 (2021)

Zkušební podmínky během požární zkoušky jsou shrnuty v tabulce uvedené v příloze 5. Uvedeny jsou teploty naměřené jednotlivými deskovými snímači v peci, skutečná průměrná teplota v peci, normou požadovaná teplota, přípustné a skutečné odchylky od normové teplotní křivky, tlak v místě sondy a teplota okolního prostředí.

Z grafického porovnání (graf 12) je patrné, že skutečná průměrná teplota v peci odpovídala normové teplotní křivce podle ČSN EN 1363-1 (2021). Výraznější odchylky se projevíly pouze v počáteční fázi zkoušky, kdy se pec ustalovala na požadovaný teplotní režim. Po nižší teplotě v 1. minutě, kdy skutečná průměrná teplota dosáhla pouze 266 °C, tedy o 83 °C méně než normová hodnota 349 °C, následovalo krátkodobé překročení normové křivky až na

653 °C oproti normované hodnotě 502 °C. Tento jev lze přičíst dynamickému náběhu pece a regulačnímu překmitu. Výraznější kolísání skutečné průměrné teploty v peci v počáteční fázi zkoušky mohlo být ovlivněno nejen ustalováním regulace pece, ale také chováním samotných zkušebních prvků. Zkoušené dřevěné nosníky představovaly hořlavý materiál, jehož intenzivní odhořívání mohlo krátkodobě přispívat ke zvýšení teploty plynů v peci. K ovlivnění teplotního režimu mohlo dojít také v souvislosti se zřícením jednoho z nosníků ve 12. minutě zkoušky, který mohl změnit proudění horkých plynů a lokální teplotní poměry v prostoru pece. Tato skutečnost může částečně vysvětlovat pozorované kolísání skutečné průměrné teploty přibližně do 15. minuty. Po této době se průběh teploty stabilizoval a skutečná průměrná teplota již velmi dobře sledovala normovou teplotní křivku.

Graf 13 procentuální odchylky potvrzuje, že průběh teploty v peci splňoval požadavky ČSN EN 1363-1 (2021). V počáteční fázi zkoušky byla skutečná odchylka zvýšená v důsledku rychlého náběhu teploty a ustalování regulace pece. Od 5. minuty se však



Graf 13 Procentuální odchylka d_e dle ČSN EN 1363-1 (2021)

hodnota d_e pohybovala v mezích stanovených normou a s rostoucí dobou expozice postupně klesala. Přibližně od 10. minuty byla odchylka již výrazně nižší než maximální dovolená hodnota

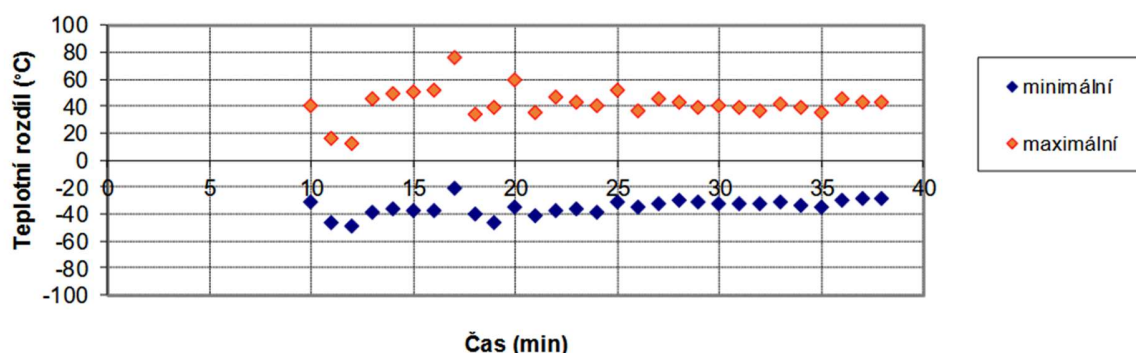
a na konci sledovaného intervalu dosahovala pouze přibližně 1,5–2 %. To potvrzuje, že celková tepelná expozice zkušebního vzorku odpovídala normové požární expozici.

Graf maximálních a minimálních odchylek jednotlivých deskových snímačů DST (graf 14) doplňuje vyhodnocení procentní odchylky d_e . Zatímco procentní odchylka vyjadřuje shodu ploch pod skutečnou a normovou křivkou teplota–čas, tento graf vyobrazuje,

jakým reálným teplotním rozdílům odpovídaly lokální odchylky v jednotlivých měřicích místech pece. Z výsledků je patrné, že i při splnění dovolené procentní odchylky podle ČSN EN 1363-1 (2021) se jednotlivé deskové snímače mohly v konkrétních časových okamžicích lišit od normou požadované průměrné teploty v řádu desítek °C.

Po 10. minutě zkoušky dosahovaly lokální rozdíly jednotlivých snímačů přibližně od -49 °C do +75 °C, přičemž nejvyšší kladná odchylka byla zaznamenána okolo 17. minuty. Tyto hodnoty ukazují, že procentuální splnění požadavku na průběh teploty v peci neznamena zcela rovnoměrné teplotní pole ve všech místech pece. Lokální rozdíly jsou dány prouděním horkých plynů, polohou snímačů, geometrií zkušebního prostoru a pravděpodobně také chováním hořících lepených lamelových nosníků.

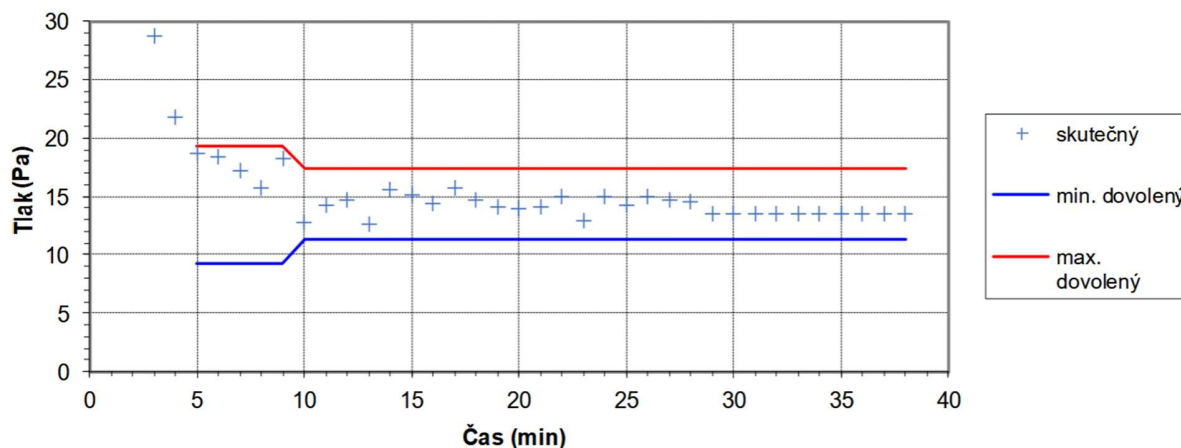
Z tohoto důvodu je vedle procentuální odchylky d_e důležité hodnotit také skutečné teplotní rozdíly jednotlivých snímačů. Ty lépe vystihují lokální podmínky, kterým mohl být zkušební vzorek vystaven, a doplňují posouzení celkové shody požární expozice s normovou teplotní křivkou.



Graf 14 Maxima a minima odchylek jednotlivých čidel v peci dle ČSN EN 1363-1(2021)

Hodnocení těchto odchylek je důležité, protože samotná průměrná teplota v peci nemusí plně vystihovat skutečné lokální teplotní zatížení vzorku. Při dobré shodě průměrné teploty s normovou křivkou mohou být jednotlivé části vzorku vystaveny mírně rozdílným teplotním podmínkám. Rozptyl hodnot jednotlivých DST proto doplňuje hodnocení průměrné teploty a potvrzuje, že teplotní pole v peci bylo v průběhu zkoušky sledováno nejen z hlediska celkové shody s normovou křivkou, ale také z hlediska lokálních rozdílů v prostoru pece.

Závěrečný graf 15 znázorňuje průběh tlaku v peci během požární zkoušky podle ČSN EN 1363-1 (2021). Skutečný tlak byl porovnán s minimální a maximální dovolenou



Graf 15 Tlak v peci dle ČSN EN 1363-1 (2021)

hodnotou stanovenou pro místo tlakové sondy. V počáteční fázi zkoušky byly zaznamenány vyšší hodnoty tlaku, které souvisely s náběhem pece a ustalováním zkušebních podmínek. Přibližně od 5. minuty se skutečný tlak pohyboval v dovoleném rozmezí a postupně se stabilizoval. Po ustálení se tlak v místě sondy pohyboval převážně okolo 13–15 Pa. Tyto hodnoty odpovídaly požadovanému tlakovému režimu v peci. Krátkodobé kolísání tlaku v průběhu zkoušky mohlo souviset s prouděním horkých plynů, změnami spalování dřevěných prvků a celkovou regulací pece. Z hlediska průběhu zkoušky je však podstatné, že po počátečním náběhu zůstal tlak převážně v předepsaných mezích. Sledování tlaku je významné, protože tlakový režim ovlivňuje rozložení teplot v peci a tím i skutečné tepelné zatížení zkušební vzorku. Při příliš nízkém tlaku by mohlo docházet k přísávání okolního vzduchu a lokálnímu ochlazení, zatímco příliš vysoký přetlak může zvyšovat proudění horkých plynů směrem ke vzorku nebo netěsnostmi pece. Stabilní tlak v předepsaném rozmezí proto podporuje správné a reprodukovatelné podmínky normové požární zkoušky.

Průběh teploty v peci odpovídá poznatkům uváděným Sultanem (2006, 2010), který se zabýval vlivem různých typů teplotních snímačů na měření a řízení teploty v požárních zkušebních pecích i na výsledný tepelný tok působící na zkušební vzorek. Autor uvádí, že největší rozdíly se objevují zejména v počáteční fázi zkoušky, kdy dochází k rychlému nárůstu normové teplotní křivky a výrazně se projevuje časová odezva použitých snímačů i dynamika regulace pece. Obdobný charakter byl uveden v této práci, kde bylo výraznější

kolísání skutečné průměrné teploty patrné přibližně do 15. minuty zkoušky. Toto kolísání mohlo být kromě ustalování regulace pece ovlivněno také chováním zkušebních dřevěných lamelových nosníků, zejména jejich intenzivním odhoříváním a tepelným rozkladem. K lokální změně proudění horkých plynů a teplotních poměrů mohl přispět také pád jednoho z nosníků ve 12. minutě zkoušky. Po této počáteční fázi se teplotní režim stabilizoval a skutečná průměrná teplota dále dobře sledovala normovou teplotní křivku podle ČSN EN 1363-1 (2021). Informace o získaných datech pece posvětili Yasir et al. (2023), kteří ve své studii při požárních zkouškách zatížených CLT stěnových panelů ukázali, že chování dřevěného prvku během požáru je významně ovlivněno začátkem zuhelnatění, účinností ochranných vrstev a jejich případným odpadnutím. Zároveň zdůrazňují význam teplotního rozložení v panelu a detailů ochranného opláštění, zejména polohy spojů. Tyto poznatky opět podporují interpretaci výsledků této práce, kde bylo výraznější kolísání skutečné průměrné teploty patrné přibližně do 15. minuty zkoušky. Kromě počáteční stabilizace regulace pece mohlo být kolísání ovlivněno také chováním dřevěných lamelových nosníků, jejich prudkým hořením a pádem jednoho z nich ve 12. minutě. Změna geometrie zkušebního prvku mohla ovlivnit proudění horkých plynů a lokální teplotní poměry v peci. Přestože se jednalo o odlišný typ zkušebního prvku než u Yasir et al. (2023), jejich práce potvrzuje, že u požárních zkoušek dřevěných prvků může samotné chování vzorku ovlivňovat lokální teplotní poměry v peci. Při interpretaci průběhu teploty v peci je proto vhodné zohlednit nejen shodu průměrné teploty s normovou křivkou, ale také lokální odchylky jednotlivých snímačů a změny proudění horkých plynů vyvolané odhoříváním nebo porušením zkušebního prvku. Chaturvedi et al. uvádějí, že ISO 834-1 (1999) představuje široce používaný standard pro hodnocení požární odolnosti konstrukčních prvků a že standardizované požární zkoušky umožňují opakovatelné a porovnatelné hodnocení jejich chování při požáru. Současně však upozorňují, že laboratorní normové zkoušky probíhají za definovaných podmínek a nemohou plně vystihnout reálný průběh požáru, zejména jeho polohu, intenzitu, okrajové podmínky a proudění horkých plynů. Tento závěr je relevantní také pro provedenou zkoušku. Skutečná průměrná teplota v peci po počátečním náběhu dobře sledovala normovou teplotní křivku podle ČSN EN 1363-1 (2021), která odpovídá standardní požární expozici podle ISO 834-1 (1999). Procentní odchylka d_e se pohybovala v dovolených mezích. Současně byly hodnoceny také lokální odchylky

jednotlivých deskových snímačů a tlak v peci, protože tyto veličiny upřesňují interpretaci teplotního režimu v peci a skutečných podmínek působících na zkušební vzorek. Průběh zkoušky tak lze považovat za odpovídající normové požární expozici, přičemž při interpretaci výsledků je nutné zohlednit limity standardizované laboratorní zkoušky. Význam sledování technických parametrů pece, konkrétně tlaku v peci, podporují také Beyler et al. (2007), kteří uvádějí, že požární zkoušky by měly probíhat při kladném tlaku v peci vůči okolnímu prostředí. U horizontálních pecí doporučují měření tlaku v oblasti pod zkušební sestavou, protože tlakový režim ovlivňuje proudění horkých plynů, přísávání okolního vzduchu a možnost průniku horkých plynů netěsnostmi nebo porušenými místy konstrukce. V této práci byl proto tlak v peci hodnocen jako jedna ze základních zkušebních podmínek. Stabilní tlak v předepsaném rozmezí podporuje správnou interpretaci teplotního režimu pece a přispívá k reprodukovatelnosti požární expozice zkušební vzorku. Hodnocení tlaku tak vhodně doplňuje porovnání skutečné průměrné teploty s normovou teplotní křivkou a vyhodnocení lokálních odchylek jednotlivých deskových snímačů (ASTM E119-20, 2021). Cabová et al. (2017) na modelu horizontální požární pece v PAVUSU ukazují, že při normové požární zkoušce je kromě průměrné teploty nutné sledovat také lokální rozložení teploty a tlak v peci. Uvádějí, že teplotní rozložení může podle ČSN EN 1363-1 (2021) vykazovat odchylky až ± 100 °C. V jejich reálné peci byly před 5. minutou patrné výrazné tlakové fluktuace, zatímco po této době se tlak udržoval přibližně kolem 20 Pa. Tyto poznatky značně odpovídají výsledkům této práce, kde byly výraznější odchylky teploty a tlaku zaznamenány hlavně v počáteční fázi zkoušky. Po ustálení skutečná průměrná teplota dobře sledovala normovou křivku a tlak v místě sondy se pohyboval převážně v požadovaném rozmezí. Lokální odchylky jednotlivých snímačů v této práci tak odpovídají běžnému charakteru teplotního pole v požární peci a nelze je považovat pouze za chybu měření. Van de Leur & Twilt (2000) ukázali, že tepelnou expozici ve zkušební peci nelze popsat pouze jednou průměrnou teplotou. Na zkušební vzorek působí kombinace konvekce od horkých plynů a sálání od plynů, sazí a stěn pece, přičemž tyto složky se mohou v různých místech pece lišit. V mezilaboratorním programu autoři zaznamenali při řízení pecí malými termočládky rozdíly odezvy

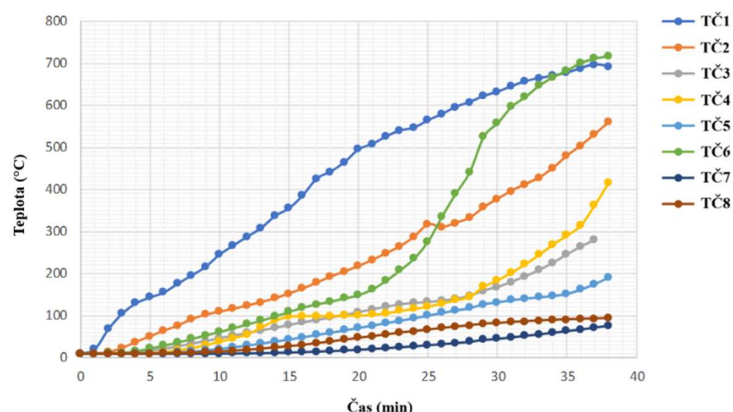
kalibračního prvku přibližně 100 °C, zatímco řízení podle deskových teploměrů tyto rozdíly výrazně snížilo. U některých zkoušek byly současně zjištěny rozdíly mezi deskovými teploměry a termočlánky přibližně 50 °C. Tyto výsledky opět podporují interpretaci lokálních odchylek zaznamenaných v této práci. Přestože průměrná teplota pece dobře sledovala normovou křivku, jednotlivé deskové snímače vykazovaly rozdíly v řádu desítek °C. Takové rozdíly lze považovat za důsledek nerovnoměrného teplotního pole v peci, jež opět ovlivňuje proudění horkých plynů, sálání, geometrie pece a chování hořícího zkušebního prvku. Hodnocení lokálních odchylek DST proto vhodně doplňuje posouzení průměrné teploty a procentní odchylky d_e (Darnikowsky, 2022).

5.8.2 Průběh vnitřních teplot zkoušených nosníků

Součástí požární zkoušky bylo sledování teplotního vývoje uvnitř zkoušených nosníků. Za tímto účelem byla do vybraných míst průřezu implementována teplotní čidla, která umožnila zaznamenávat změny teploty během působení teplotního zatížení. Měření teplot uvnitř nosníků sloužilo k posouzení prostupu tepla do jejich průřezu a k vyhodnocení teplotní odezvy jednotlivých měřicích míst. Získané teplotní záznamy umožňují porovnat rozdíly mezi teplotou prostředí v peci a teplotami dosaženými uvnitř nosníku, a tím přesněji popsat chování prvku při vystavení zvýšeným teplotám.

Na níže uvedených grafech 16 a 17 jsou znázorněny průběhy vnitřních teplot zkoušených nosníků během požární expozice. Teploty byly zaznamenávány pomocí čidel TČ 1 až TČ 8, která byla osazena do vybraných míst průřezu. Naměřené hodnoty dokumentují postupný prostup tepla do nosníků a rozdílnou teplotní odezvu jednotlivých měřicích míst.

Naměřené průběhy ukazují výrazně rozdílnou odezvu jednotlivých termočlánků. Nejvyšší a nejrychlejší nárůst teplot byl zaznamenán u čidel umístěných v polohách více ovlivněných tepelnou expozicí. Naopak termočlánky uložené v méně exponovaných lamelách nebo ve větší vzdálenosti od zahřívaného povrchu vykazovaly pozvolnější nárůst teplot a v některých případech zůstaly po celou dobu zkoušky na výrazně nižších hodnotách.

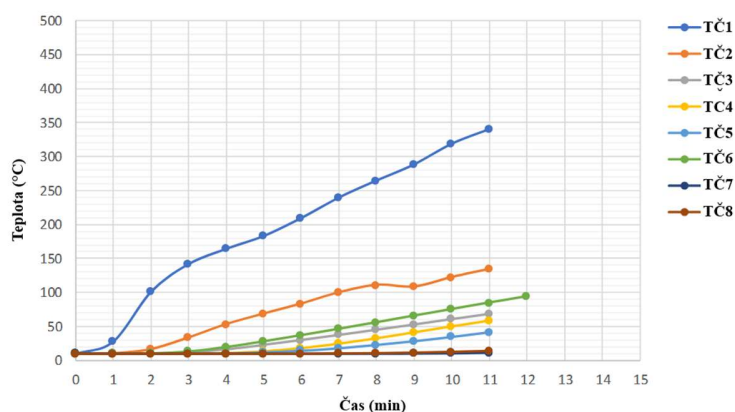


Graf 16 Vnitřní teplota testovaného vzorku PUR + PF

U nosníku s adhezním systémem PUR + PF byl nejvýraznější nárůst zaznamenán u termočlánku TČ1, jehož teplota překročila 300 °C přibližně mezi 12. a 13. minutou zkoušky a na konci měření dosáhla přibližně 700 °C. Výrazná odezva byla patrná také u termočlánku TČ6, u kterého došlo po přibližně 24. minutě k prudkému nárůstu teploty. Na konci zkoušky dosáhlo toto čidlo nejvyšší zaznamenané hodnoty, přibližně 718 °C. Tento průběh může souviset s polohou čidla v lameli, postupem zuhelnatění a postupným přibližováním teplotní fronty k místu měření. Další termočlánky nosníku v tomto adhezním systému vykazovaly nižší teplotní odezvu. TČ2 dosáhlo na konci měření přibližně 560 °C, TČ4 přibližně 417 °C a TČ3 přibližně 302 °C. Výrazně nižší teploty byly zaznamenány u TČ5, TČ7 a TČ8, přičemž TČ7 a TČ8 nepřekročily po dobu zkoušky hranici 100 °C. Tyto hodnoty potvrzují, že v průřezu nosníku vznikl výrazný teplotní gradient a že některé lamely zůstaly po značnou část zkoušky tepelně méně namáhány.

U nosníku s adhezním systémem PUR byl průběh měření kratší, přesto je patrný obdobný trend. Nejrychlejší nárůst byl zaznamenán u termočlánku TČ1, který dosáhl přibližně 340 °C v 11. minutě zkoušky. Ostatní termočlánky vykazovaly výrazně nižší teploty. TČ2 dosáhlo přibližně 134 °C, TČ6 přibližně 94 °C a zbývající čidla zůstala na ještě nižších hodnotách. To ukazuje, že k výraznému prohřátí došlo pouze v omezené části průřezu, zatímco ostatní lamely byly v době ukončení měření zatíženy podstatně nižší teplotou. Rozdíly mezi jednotlivými termočlánky je nutné interpretovat s ohledem na jejich konkrétní umístění v lamelách nosníku a ve vztahu k poloze lepených spár. Naměřené

hodnoty potvrzují nerovnoměrné rozložení teploty v průřezu a postupný prostup tepla dřevěným prvkem. Významnou roli přitom může sehrávat také stabilita lepené spáry, která ovlivňuje soudržnost lamel a tím i způsob šíření tepla. Při zachování integrity spáry dochází k pozvolnějšímu prohřívání průřezu, zatímco její lokální oslabení může umožnit rychlejší pronikání tepla do vnitřních částí nosníku.



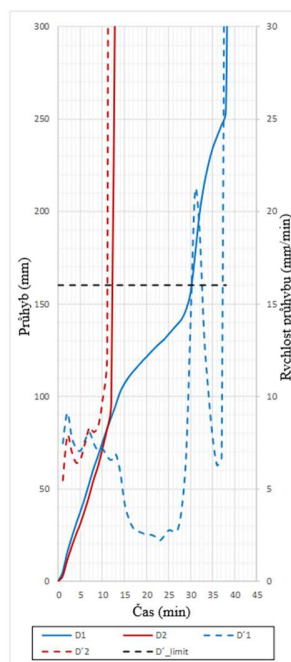
Graf 17 Vnitřní teplota testovaného vzorku PUR2010

Naměřené průběhy teplot z jednotlivých čidel potvrzují nerovnoměrný prostup tepla do průřezu nosníku. Obdobný závěr uvádějí Verma & Salem (2018), kteří při požární zkoušce skládaného atypického nosníku prokázali, že termočlánky umístěné v různých částech průřezu vykazují výrazně odlišnou teplotní odezvu. Zatímco teplota v horizontálních lamelách začala narůstat již po 3 až 4 minutách, u spodní pásnice došlo k výraznějšímu nárůstu až přibližně po 8 minutách, což autoři vysvětlují její větší tloušťkou. Naopak termočlánky uložené v horní části průřezu a v dutině nosníku dosáhly pouze nízkých teplot. Tyto poznatky potvrzují, že teplotní pole uvnitř dřevěného prvku je při požární expozici výrazně nerovnoměrné a že rychlost ohřevu závisí nejen na intenzitě tepelného zatížení, ale také na poloze měřicího místa a lokální geometrii průřezu. Werther (2016) obdobně uvádí, že teploty uvnitř dřeva nelze hodnotit pouze podle teploty v peci, protože rozhodující je také poloha měřicího místa, lokální teplotní gradient, vlhkost materiálu a průběh požární expozice. Z tohoto důvodu je nutné naměřené hodnoty interpretovat s ohledem na umístění čidel v jednotlivých lamelách. Vyšší teploty u některých čidel mohou signalizovat přiblížení teplotní fronty nebo lokálně rychlejší prostup tepla, zatímco nižší hodnoty ukazují na tepelně ochranný účinek okolní dřevní hmoty. U lepených lamelových prvků může být tento proces dále ovlivněn stabilitou lepených spár, které při zachování soudržnosti omezují rychlé

pronikání tepla do vnitřních částí nosníku. Naměřené průběhy teplot lze vztáhnout k práci Ek & Andersson (2017), kteří sledovali rozložení teplot a hloubku zuhelnatění u lepených dřevěných nosníků vystavených parametrickým požárním křivkám. Autoři porovnávali experimentálně naměřené teploty s numerickými výpočty pomocí programu TASEF a ukázali, že teplotní pole v dřevěném prvku je výrazně závislé na poloze měřicího místa, geometrii průřezu a charakteru požární expozice. Významné zejména to, že autoři hodnotili postup zuhelnatění pomocí 300 °C izotermy, která představuje orientační hranici mezi zuhelnatělou a méně tepelně poškozenou částí průřezu. Překročení této teploty u konkrétního čidla tak může naznačovat přiblížení teplotní fronty k danému místu, zatímco čidla s nižšími hodnotami dokládají, že příslušná část nosníku zůstala po dobu měření méně tepelně namáhána (Fahrni et al., 2018). V návaznosti na lepené lamelové prvky je podstatné také zjištění autorů, že při požární expozici může docházet k delaminaci. Oslabení nebo otevření lepené spáry může vést ke ztrátě ochranné zuhelnatělé vrstvy a k vystavení méně poškozeného dřeva přímému tepelnému působení. Tím se může lokálně urychlit prostup tepla do průřezu a projevit se rychlejším nárůstem teploty u některých čidel. Z tohoto důvodu je při interpretaci naměřených hodnot nutné zohlednit nejen polohu čidel v lamelách, ale také stabilitu lepených spár a schopnost adhezního systému zachovat integritu průřezu během požární expozice (König, 1999). Podobné problematice se věnovali Hasburgh et al. (2023), kteří sledovali požární chování lepených lamelových nosníků s prostupy. Autoři použili 300 °C izotermu pro hodnocení postupu zuhelnatění a ukázali, že lokální narušení průřezu může významně ovlivnit šíření tepla. Zatímco nominální rychlost zuhelnatění lepeného lamelového dřeva byla uvažována jako $0,635 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, u větších prázdných prostupů byly zjištěny vyšší hodnoty, například 0,74 až $0,99 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Je však nutné uvést, že uvedené hodnoty byly stanoveny pro lepené lamelové nosníky z jehličnatého dřeva, nikoliv pro dubové lepené lamelové dřevo. V této práci proto slouží pouze jako orientační srovnání a jako doklad toho, že lokální narušení průřezu, vznik trhlin nebo otevření lepené spáry mohou urychlit prostup tepla do vnitřních částí nosníku.

5.8.3 Průhyby nosníků

Graf 18 vyobrazuje průběh průhybu ve středu rozpětí a současně rychlost nárůstu průhybu u dvou zkoušených nosníků. Plnou čarou je znázorněn skutečný průhyb nosníku s adhezním systémem (D1) a referenční nosník s PUR lepidlem (D2), zatímco přerušovaná čára představuje rychlost průhybu nosníku s adhezním systémem (D'1) a referenční nosník s PUR



Graf 18 Průhyb / rychlost průhybu ve středu rozpětí nosníku

lepidlem (D'2). Černá přerušovaná vodorovná linie odpovídá mezní rychlosti průhybu D'limit, tedy kritériu, podle kterého lze hodnotit ztrátu nosné funkce při požární zkoušce.

U nosníku D1 je patrný postupný, ale nerovnoměrný nárůst průhybu. V počáteční fázi zkoušky přibližně do 10. minuty roste průhyb poměrně rychle a téměř lineárně. Tato část odpovídá okamžité deformaci od zatížení a současně začátku teplotního ovlivnění spodní části průřezu. Přibližně mezi 10. a 15. minutou dochází ke změně sklonu křivky – průhyb sice dále narůstá, ale rychlost jeho růstu se dočasně snižuje. Od 15. do 27. minuty je průběh stabilnější a nosník se prohýbá pozvolněji. To naznačuje, že i přes probíhající zuhelnatění si zbytkový průřez ještě zachovává dostatečnou tuhost a schopnost přenášet zatížení. Zásadní změna u nosníku D1 přichází přibližně po 28. minutě, kdy se průhyb začíná zvyšovat výrazně rychleji a křivka přechází do strmější části. Současně dochází k prudkému nárůstu rychlosti průhybu D'1, která překračuje mezní hodnotu D'limit. Tento okamžik je z hlediska hodnocení požární odolnosti významný,

protože signalizuje zrychlenou ztrátu tuhosti nosníku a přechod do nestabilní fáze deformace. Přestože samotný průhyb v této fázi ještě nemusí dosahovat maximální mezní hodnoty, překročení mezní rychlosti průhybu ukazuje na výrazné oslabení konstrukčního prvku. Po překročení tohoto kritéria průhyb dále rychle narůstá až přibližně k hodnotám 200–250 mm a závěrečná část křivky má velmi strmý charakter. Tento průběh lze spojit s pokročilou degradací průřezu, kdy se vlivem zuhelnatění snižuje účinná výška nosníku a současně dochází ke ztrátě mechanických vlastností zahřátého dřeva. Strmý nárůst průhybu těsně před ukončením zkoušky odpovídá porušení a zřícení nosníku. Nosník D2 vykazuje oproti D1 podstatně kratší dobu odolnosti. Jeho průhyb narůstá již od začátku zkoušky poměrně rychle a přibližně mezi 8. a 12. minutou dochází k prudkému zrychlení deformace. Tomu odpovídá i průběh rychlosti průhybu $D'2$, která se v závěru velmi rychle zvyšuje a překračuje mezní hodnotu $D'limit$. Z grafu je zřejmé, že nosník D2 dosáhl kritického stavu výrazně dříve než D1. Zatímco u D1 nastává rozhodující zrychlení průhybu až po přibližně 30 minutách, u D2 je podobný mechanismus patrný již okolo 12. minuty.

Rozdíl mezi oběma nosníky je značný. Nosník D2 vykazuje kratší stabilní fázi a rychlejší přechod do porušení, zatímco u nosníku D1 je patrný delší čas únosnosti a pozvolnější narůstání deformace. Tento rozdíl může souviset nejen s rychlostí redukce účinného průřezu vlivem zuhelnatění a se ztrátou mechanických vlastností zahřátého dřeva, ale také s rozdílným chováním lepené spáry při zvýšené teplotě. Lepená spára může být u lepeného lamelového dřeva kritickým místem, protože její degradace, změkčení nebo ztráta adheze může urychlit ztrátu tuhosti celého nosníku. U D1 lze předpokládat vyšší stabilitu adhezního systému PUR + PF, zatímco rychlý nárůst průhybu u D2 může naznačovat dřívější oslabení zbytkového průřezu i lepené spáry. Vliv druhu lepidla proto nelze vyloučit, je však nutné jej hodnotit společně s postupem zuhelnatění, teplotním polem a přirozenou variabilitou dřeva.

Podobný výzkum aplikovali Perković & Rajčić (2022), kteří u 2 typů lepených lamelových nosníků sledovali obdobně průhyb ve středu rozpětí a rychlost jeho nárůstu. Pro jejich zkušební uspořádání byl stanoven mezní průhyb na 194,4 mm a mezní rychlost průhybu na $8,64 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Autoři ukázali, že rozhodující nemusí být pouze absolutní hodnota průhybu, ale také jeho náhlé zrychlení. U běžného lamelového nosníku dosáhl konečný průhyb po 43 min pouze 63,6 mm při rychlosti $7,1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, zatímco u dutých nosníků byly po 45 min naměřeny průhyby 87 až 88 mm, ale rychlost průhybu již dosáhla 10 až $16 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. To je dobře srovnatelné s výsledky této práce,

kde nosník D1 vykazoval delší stabilní část a výraznější zrychlení deformace nastalo až přibližně po 28. minutě, zatímco u nosníku D2 došlo k rychlému nárůstu průhybu již přibližně kolem 12. minuty. Dle srovnání s uvedenou studií je tedy patrné, že i v této práci byla rychlost průhybu citlivým ukazatelem přechodu do nestabilního deformačního stavu, pravděpodobně souvisejícího s redukcí účinného průřezu nosníku, nárůstem teploty v průřezu a možným oslabením lepené spáry. Taktéž Verma & Salem (2018) obdobně uvádějí, že průhyb atypického lepeného nosníku zůstával během větší části požární zkoušky relativně stabilní, přibližně okolo 20 mm, a k jeho prudkému až exponenciálnímu nárůstu došlo až při pokročilé teplotní expozici, kdy byla zkouška ukončena při mezním průhybu 150 mm. Tento průběh odpovídá zejména chování nosníku D1, u kterého byla rovněž patrná delší stabilní fáze a následné zrychlení deformace přibližně po 28 minutě. Kinjo et al. (2018) sledovali průhyb lepených lamelových nosníků z modřinu během 60 min standardní požární expozice a následné chladicí fáze. Nosníky měly průřez 210×420 mm, rozpětí 5400 mm a byly zatěžovány ve čtyřbodovém ohybu. Během samotné požární expozice nedošlo k porušení, ale průhyb dále narůstal i po ukončení ohřevu, protože teplota uvnitř průřezu pokračovala v růstu. Ve srovnání s touto prací dosáhly nestabilního deformačního stavu již během požární expozice, u D1 přibližně po 28.–30. minutě a u D2 již po 11. minutě. Zhang et al. (2012) u dřevěných nosníků vystavených třístrannému požáru ukázali, že průhyb během expozice postupně narůstá a před porušením dochází k jeho výraznému zrychlení. U menšího průřezu 100×200 mm se požární odolnost výrazně snižovala se zvyšující se úrovní zatížení: při 25 % zatížení byla 28 min, při 37,5 % 17 min a při 50 % pouze 13 min. Význam sledování průhybu při požární expozici potvrzují také Lineham et al. (2016), kteří u CLT nosníků zatížených během požáru sledovali časový vývoj deformace a upozornili na obtížnost přesného popisu skutečné odezvy pouze pomocí zjednodušeného modelu redukovaného průřezu. Tento poznatek odpovídá i výsledkům této práce, kde byl rozhodující zejména okamžik prudkého zrychlení průhybu.

5.8.4 Vyhodnocení nosnosti a klasifikace požární odolnosti

Požární zkouška lepeného lamelového nosníku z dubu byla provedena podle ČSN EN 1365-3 (2000). Výsledky zkoušky pro nosník PUR + PF a PUR je uvedeny v tabulce 7 a 8. Zkušební tělesa byla vystavena normovému teplotnímu namáhání podle křivky teplota/čas ze tří stran. Nosník byl uložen jako prostý nosník o rozpětí $L = 4150$ mm. Zatížení bylo tvořeno spojitým zatížením

od vlastní tíhy vzorku a záklopu o hodnotě $1,00 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ a čtyřmi silami $2,59 \text{ kN}$ působícími v lichých osminách rozpětí.

Tab. 10 Výsledky zkoušky požární odolnosti PUR+PF

Parametr	Výsledek / popis
Zkušební metoda	ČSN EN 1365-3 (2020)
Teplotní namáhání	Normová křivka teplota/čas ISO 834-1 (1999)
Směr požárního namáhání	Ze 3 stran
Podpěrné podmínky	Prostý nosník, rozpětí ($L = 4150 \text{ mm}$)
Vyvozené zatížení	Spojité zatížení ($1,00 \text{ kN/m}$ a čtyři síly $2,59 \text{ kN}$ v lichých osminách rozpětí)
Mezní rychlost průhybu	16 mm/min
Mezní průhyb	$358,8 \text{ mm}$
Čas dosažení mezní rychlosti průhybu	30 min
Čas dosažení mezního průhybu	38 minut
Klasifikace požární odolnosti	R30

Tab. 11 Výsledky zkoušky požární odolnosti PUR

Parametr	Výsledek / popis
Zkušební metoda	ČSN EN 1365-3 (2020)
Teplotní namáhání	Normová křivka teplota/čas ISO 834-1 (1999)
Směr požárního namáhání	Ze 3 stran
Podpěrné podmínky	Prostý nosník, rozpětí ($L = 4150 \text{ mm}$)
Vyvozené zatížení	Spojité zatížení ($1,00 \text{ kN/m}$ a čtyři síly $2,59 \text{ kN}$ v lichých osminách rozpětí)
Mezní rychlost průhybu	16 mm/min
Mezní průhyb	$358,8 \text{ mm}$
Čas dosažení mezní rychlosti průhybu	Nedosaženo / ukončeno dříve
Čas dosažení mezního průhybu	12 minut
Klasifikace požární odolnosti	Požadavek nesplněn

Nosník s optimalizovaným systémem lepení PUR+PF, označený v grafickém vyhodnocení modrou křivkou, vykazoval příznivější průběh deformace. Nárůst průhybu byl ve srovnání s referenční variantou pozvolný. Výraznější zvýšení rychlosti průhybu nastalo až v pozdější fázi požární expozice. Mezního průhybu $358,8 \text{ mm}$ bylo dosaženo po 38 minutách. Na základě dosaženého času je možné testovaný nosník klasifikovat ve třídě

požární odolnosti R30 podle ČSN EN 13501-2 (2017). Nosník s lepidlem PUR vykazoval méně příznivý průběh deformace. Rychlost průhybu u této varianty narůstala již v počáteční fázi požární expozice a mezní rychlosti průhybu $16,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ bylo dosaženo přibližně po 12 minutách. Mezního průhybu 358,8 mm dosaženo nebylo, protože došlo k dřívějšímu porušení, respektive ukončení zkoušky. Tato varianta proto nesplnila požadavek požární odolnosti.

Význam současného hodnocení průhybu a rychlosti průhybu při požární zkoušce nosných prvků zdůrazňují Dumont et al. (2016), kteří se zabývali kritérii nosnosti při zkouškách požární odolnosti. Autoři uvádějí, že vyhodnocení nosnosti může být významně ovlivněno tím, zda je za rozhodující považováno dosažení mezního průhybu, nebo mezní rychlosti průhybu. Rychlost průhybu přitom charakterizuje nástup zrychlené deformace a může být dosažena dříve než samotná mezní hodnota průhybu (Dumont, 2017; Perković & Rajčić 2022). Tento závěr odpovídá výsledkům provedené zkoušky, kde jednotlivé varianty nosníků vykazovaly rozdílný časový průběh deformace. Nosník s lepidlem PUR dosáhl mezní rychlosti průhybu dříve, zatímco varianta s adhezním systémem PUR+PF vykazovala pozvolnější nárůst deformace a mezního průhybu až 359 mm při 38 minutách požární expozice. Výsledky tak potvrzují význam současného hodnocení průhybu i rychlosti průhybu při stanovení požární odolnosti ohýbaných prvků. Podobně Oksanen & Kangas (1999) hodnotili požární odolnost zatížených lamelových nosníků se spoji na vlepené ocelové tyče. Zkoušky byly provedeny při normovém požárním namáhání podle ČSN EN 1363-1(2021), jejíž průběh odpovídá normové teplotní křivce ISO 834-1 (1999) a zatížení odpovídalo 40 % návrhového zatížení za běžné teploty. Autoři dosáhli tříd požární odolnosti R30, R60 a R90, a to při použití požární ochrany z minerální vlny o tloušťce 20, 40 a 60 mm v kombinaci se zakrytím ocelových částí dřevem. Významným poznatkem bylo také zjištění, že průhyb nosníků se začal výrazně zvyšovat přibližně deset minut před porušením spoje. Tyto výsledky podporují závěr, že klasifikace požární odolnosti je ovlivněna nejen samotným materiálem nosníku, ale také zatížením, konstrukčním detailem, požární ochranou a průběhem deformace při zkoušce. Sjöström et al. (2020) se zabývali požární zkouškou tří kompozitních dřevo-skleněných nosníků. Zkušební prvky měly délku 3920 mm a byly zatíženy při rozpětí 3300 mm. Zatížení bylo tvořeno spojitým zatížením $0,154 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ a čtyřbodovým zatížením. Požární expozice probíhala podle

normové křivky ČSN EN 1363-1 (2021) a ISO 834-1 (1999) a zkouška byla ukončena po 16 minutách. Mezního průhybu bylo u jednotlivých nosníků dosaženo po 9, 10 a 14 minutách. Autoři uvádějí, že hlavní příčinou časného porušení nebylo samotné mechanické zatížení, ale především teplotní gradienty ve skleněné části kompozitního prvku. Tento výsledek potvrzuje, že při hodnocení požární odolnosti nosníků je nutné sledovat nejen zatížení a dosažený průhyb, ale také teplotní odezvu průřezu a chování jednotlivých materiálových složek konstrukčního prvku. Chen et al. (2017) se zabývali požární odolností lepeného lamelového nosníku o rozměrech $4700 \times 300 \times 480$ mm. Nosník byl zkoušen taktéž v peci dle teplotní křivky ISO 834-1 (1999), přičemž požární expozici byly vystaveny tři strany průřezu. Testovaný prvek byl uložen jako prostý nosník a zatížen rovnoměrným zatížením 0,76 kN/m. Autoři zjistili výrazné zmenšení průřezu v důsledku tepelného rozkladu a zuhelnatění dřeva, zatímco svislá deformace byla po dobu zkoušky relativně malá a nepřesáhla 3,95 mm. Za rozhodující mezní stav bylo považováno dosažení teploty 180 °C na horním povrchu nosníku, ke kterému došlo po 57 minutách. Významným poznatkem bylo také intenzivnější zuhelnatění v oblasti otvorů a spár, kde se požár mohl šířit do vnitřních částí prvku. Opět se potvrzuje, že požární chování lepené lamelového prvku není ovlivněno pouze globální deformací, ale také lokálním šířením tepla, geometrií detailů a stavem narušených oblastí průřezu.

Přímé porovnání dosažených výsledků s dostupnou literaturou je omezené, protože požární zkoušky lepených lamelových nosníků z dubového dřeva nejsou v dostupných studiích běžně uváděny. Většina publikovaných prací se zaměřuje především na lepené lamelové prvky z jehličnatých dřevin, případně na kompozitní nebo konstrukčně odlišné systémy. Porovnání s těmito studiemi je proto možné pouze orientačně, zejména z hlediska použité zkušební metody, normového teplotního namáhání, sledování průhybu, rychlosti průhybu a doby zachování nosnosti. Výsledky provedené zkoušky dubového lepeného nosníku je proto nutné interpretovat ve vztahu ke konkrétnímu materiálu, geometrii prvku, použitému adheznímu systému, způsobu zatížení a podmínkám požární expozice. Tato skutečnost současně potvrzuje význam provedeného experimentu, protože rozšiřuje poznatky o požárním chování dubového konstrukčního lepeného lamelového dřeva, které je v odborné literatuře dosud zastoupeno pouze omezeně.

6 ZÁVĚR

Disertační práce byla zaměřena na posouzení vlivu zvýšené teploty iniciované ohněm na pevnost konstrukčního lepeného lamelového dřeva z dubu. Celý experimentální postup byl koncipován jako návazné ověření možnosti využití dubového dřeva pro výrobu lepeného konstrukčního prvku vystaveného zvýšené teplotě a požárnímu namáhání. Než bylo možné přistoupit k samotné výrobě a požární zkoušce nosníku, bylo nutné nejprve připravit a charakterizovat vstupní materiál, tedy dubové lamely určené pro konstrukční lepení. Pozornost byla věnována jejich výběru, přípravě a hodnocení povrchových vlastností, zejména drsnosti povrchu, včetně posouzení vlivu povrchové úpravy a penetračních systémů na kvalitu následného lepení. Současně byly testovány vybrané adhezní systémy, zahrnující termosetické pryskyřice i PUR lepidla, s cílem stanovit jejich vhodnost pro lepení dubového dřeva.

Na připravených zkušebních tělesech byly následně hodnoceny pevnostní charakteristiky lepených spojů, především pevnost ve smyku po klimatizaci, zatěžujících cyklech a při působení zvýšených teplot. Tato část práce byla zásadní pro výběr vhodného systému lepení, protože samotná pevnost spoje za běžných podmínek nemůže být považována za dostačující kritérium pro konstrukční prvek vystavený zvýšené teplotě nebo požárnímu zatížení. Z tohoto důvodu bylo nutné sledovat nejen dosažené hodnoty pevnosti, ale také stabilitu výsledků, charakter porušení, vliv povrchové úpravy lamel a chování lepidel v inkriminovaných teplotních rozsazích.

Na základě dosažených výsledků byl stanoven optimalizovaný systém lepení dubového dřeva, který byl následně použit pro výrobu konstrukčních lepených lamelových prvků. Tyto prvky byly nejprve podrobeny mechanickému ověření za účelem stanovení jejich základních fyzikálně-mechanických charakteristik, zejména maximální síly, únosnosti, tuhosti a deformačního chování při ohybovém namáhání. Teprve po tomto ověření bylo možné přistoupit k výrobě požárních nosníků z nejlépe hodnocených variant, které byly následně vystaveny normovému požárnímu zatížení. V rámci požární zkoušky bylo sledováno zejména zachování únosnosti, průhyb nosníku, rychlost nárůstu průhybu, redukce průřezu vlivem zuhelnatění a celkové chování lepeného konstrukčního prvku při zvýšené teplotě.

Základní cíl práce, zaměřený na výzkum chování lepidel při působení zvýšených teplot iniciovaných ohněm a na jejich interakci s povrchem dubového dřeva, byl splněn. V rámci práce byl navržen a experimentálně ověřen systém lepení pro konstrukční lepené lamelové dřevo dubu, a to jak na úrovni lepených spojů, tak na úrovni konstrukčních prvků vystavených požárnímu zatížení. Součástí řešení bylo rovněž sestavení teoretického modelu popisujícího chování nosníku v závislosti na teplotě, redukci průřezu a mechanickém zatížení. Naplnění základního cíle bylo dále ověřeno prostřednictvím následujících dílčích cílů:

- Cíl, zaměřený na stanovení a porovnání vlivu chemických modifikačních prostředků na adhezi povrchu dubového dřeva, byl splněn hodnocením povrchových vlastností lamel, drsnosti povrchu a vlivu penetračních systémů na kvalitu lepené spáry. Výsledky potvrdily, že příprava povrchu a jeho interakce s lepidlem ovlivňují pevnost a stabilitu lepeného spoje.
- Další dílčí cíl byl splněn hodnocením vybraných konstrukčních lepidel a termosetických systémů v definovaných teplotních rozsazích. Byly prokázány rozdíly mezi jednotlivými lepidly z hlediska pevnosti, stability při zvýšené teplotě a chování po zatěžujících cyklech.
- Cíl, stanovení optimalizovaného systému pro lepení konstrukčního lamelového dřeva dubu, byl naplněn výběrem nejvhodnější varianty pro výrobu konstrukčních prvků. Výsledky ukázaly, že vhodně zvolený polyuretanový systém v kombinaci s povrchovou úpravou lamel může vytvořit lepenou spáru schopnou přenášet zatížení i při zvýšené teplotě.
- Čtvrtý dílčí cíl byl splněn realizací požární zkoušky konstrukčního prvku lepeného lamelového dřeva dubu dle ČSN EN 1365-3 (2000). Zkoušený nosník byl vystaven normovému teplotnímu namáhání podle křivky teplota/čas ze tří stran a byl uložen jako prostý nosník o rozpětí 4,15 m. Zatížení bylo tvořeno spojitým zatížením od vlastní tíhy vzorku a záklopu o hodnotě $1,00 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ a čtyřmi silami 2,59 kN umístěnými v lichých osminách rozpětí. Kritéria rychlosti nárůstu průhybu dosaženo po 12 minutách a kritéria průhybu po 38 minutách požární expozice. Na základě

klasifikace provedené podle ČSN EN 13501-2 (2017) byl testovaný nosník zařazen do třídy požární odolnosti R30.

- Poslední dílčí cíl byl splněn sestavením teoretického modelu chování konstrukčního prvku v závislosti na teplotě. Model umožnil popsat vývoj teplotního zatížení, redukci průřezu, změnu mechanické odezvy a deformační chování nosníku. Zároveň poskytl rámec pro porovnání s experimentálními výsledky, přičemž je nutné jej chápat jako zjednodušený predikční model reálného požárního chování.

Na základě naplnění stanovených cílů bylo možné konstatovat, že:

- První hypotéza byla potvrzena. Navržený adhezni systém prokázal vhodnost pro konstrukční lepení dubového lamelového dřeva z hlediska pevnostních i termomechanických vlastností. Výsledky zároveň potvrdily význam přípravy povrchu lamel a kvality lepené spáry.
- Druhá hypotéza byla taktéž potvrzena v rozsahu provedeného experimentálního ověření. Optimalizovaná varianta dubového lepeného nosníku splnila požadavek požární odolnosti R30 a vykazovala nižší deformační odezvu než neoptimalizovaná varianta. Výsledek je však vztažen ke konkrétní geometrii nosníku, použitému systému lepení, zatížení a podmínkám požární zkoušky.
- Třetí hypotéza byla taktéž potvrzena. Sestavený teoretický model vystihl základní trendy chování nosníku při požárním zatížení, zejména vývoj teplotní a deformační odezvy. Odchyłky od experimentu souvisejí se zjednodušením vstupních předpokladů, idealizací materiálového chování a vlivem lokálních poruch, trhlin a možného oslabení lepených spár.

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že dubové dřevo představuje perspektivní materiál pro výrobu konstrukčního lepeného lamelového dřeva, pokud je zvolen vhodný adhezni systém a odpovídající technologický postup lepení. Kvalita lepené spáry, stabilita lepidla při zvýšené teplotě a způsob přípravy povrchu lamel mají zásadní význam pro výsledné chování nosného prvku při požárním zatížení. Disertační práce tak poskytuje podklad pro další rozvoj konstrukčního využití dubového lepeného lamelového dřeva a současně přispívá k hlubšímu poznání jeho chování při zvýšené teplotě a požárním namáhání.

Přínos práce pro vědu

Přínosem disertační práce pro vědeckou oblast je rozšíření poznatků o chování konstrukčního lepeného lamelového dřeva z dubu při zvýšené teplotě a požárním namáhání. V dostupné literatuře jsou požární zkoušky lepených lamelových nosníků zaměřeny převážně na jehličnaté dřeviny, zatímco dubové lepené konstrukční prvky jsou zastoupeny pouze omezeně. Práce proto přináší nové poznatky o možnosti využití dubového dřeva jako materiálu pro konstrukční lepené prvky vystavené požárnímu zatížení. Významným vědeckým přínosem je také komplexní posouzení vztahu mezi povrchovou úpravou dubových lamel, adhezním systémem, kvalitou lepené spáry a výsledným chováním nosníku při požární zkoušce. Výsledky ukázaly, že požární chování lepeného prvku není ovlivněno pouze vlastnostmi dřeva, ale také stabilitou lepidla, přípravou povrchu a interakcí lepidla s dubovým dřevem. Práce tak přispívá k hlubšímu pochopení vazby mezi materiálovou úrovní lepeného spoje a chováním celého konstrukčního prvku. Dalším přínosem je sestavení teoretického modelu pro popis chování lepeného lamelového nosníku v závislosti na teplotě a mechanickém zatížení. Model poskytuje podklad pro interpretaci experimentálně naměřených hodnot a může sloužit jako základ pro další rozvoj predikčních postupů při hodnocení požární odezvy dřevěných konstrukčních prvků.

Přínos práce pro praxi

Přínosem práce pro stavební praxi je ověření možnosti využití dubového dřeva pro výrobu konstrukčních lepených lamelových prvků s požadovanou požární odolností. Na základě provedených experimentů byl vybrán vhodný systém lepení, který umožnil dosažení příznivých pevnostních charakteristik lepených spojů a následné ověření nosníku při požární zkoušce. Výsledky prokázaly, že kvalita adhezního systému, úprava lepeného povrchu a stabilita lepené spáry významně ovlivňují chování dubového lepeného nosníku při zvýšené teplotě.

Požární zkouška byla provedena podle ČSN EN 1365-3 (2000) a klasifikace požární odolnosti byla stanovena podle ČSN EN 13501-2 (2017). Referenční varianta vykazovala méně příznivý průběh deformace a požadavek požární odolnosti nesplnila, zatímco upravená varianta dosáhla klasifikace požární odolnosti R30. Tím byly získány důležité technické podklady pro další posuzování použitelnosti navrženého dubového lepeného lamelového prvku v nosných konstrukcích staveb.

Z praktického hlediska mohou výsledky sloužit jako podklad pro optimalizaci výroby dubových lepených lamelových nosníků, zejména z hlediska volby adhezního systému, přípravy povrchu lamel a kontroly kvality lepené spáry. Současně představují vstupní podklad pro navazující proces technického posouzení, klasifikace a případného uplatnění obdobného konstrukčního prvku v praxi, za předpokladu splnění požadavků příslušných výrobních norem, systému řízení výroby a dalších certifikačních postupů.

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obr. 1 Řezy a směry ve dřevě.....	20
Obr. 2 Příčný řez kmene, s popisky jednotlivé struktury.....	21
Obr. 3 Schéma vrstvy buněčné stěny v buněčné struktuře dřeva	23
Obr. 4 Schématické znázornění struktury hlavních složek dřeva.....	25
Obr. 5 Základní vzor vrstev tepelného toku v kompozitní stěně během vedení	31
Obr. 6 Obecný pracovní (napět'ové – deformační) diagram.....	36
Obr. 7 Třídy pevnosti a charakteristické hodnoty pro konstrukční dřevo	39
Obr. 8 Diagram trvalého zatížení.....	40
Obr. 9 Madisonova křivka	41
Obr. 10 Pevnost dřeva ve statickém ohybu.....	42
Obr. 11 Jednoduchý ohyb (napět'ové stavy a ohybový moment)	43
Obr. 12 Model lepeného spoje (dřevo – lepidlo)	44
Obr. 13 Schéma přilnavosti (adheze) a soudržnosti (koheze)	46
Obr. 14 Schématické znázornění vad spoje	47
Obr. 15 Močovino-formaldehydové pryskyřice UF	54
Obr. 16 Melamin-formaldehydové pryskyřice	54
Obr. 17 Vzorec fenol-formaldehydové pryskyřice	55
Obr. 18 Reakce izokyanátu s H ₂ O	58
Obr. 19 Mikroskopická analýza SEM - PU lepidlo na dubovém dřevě	63
Obr. 20 Trojrozměrný graf - vliv teploty a vlhkosti na povnost spoje.	65
Obr. 21 Lepené lamelové dřevo.....	66
Obr. 22 Stanovení pevnosti v ohybu 4bodový ohyb, měření lokálního modulu pružnosti ..	72
Obr. 23 Trojúhelník hoření	78
Orb. 24 Mechanismus hoření dřeva.....	79
Obr. 25 Návrhové rychlosti zuhelnatění (ČSN EN 1995-1-2, 2006).....	81
Obr. 26 Zbytkový a účinný průřez (ČSN EN 1995-1-2, 2006)	85
Obr. 27 Teplotní křivky	87
Obr. 28 Diferenční skenovací kalorimetr; lis na pánvičky s pokličkami; zkušební vzorky	95
Obr. 29 Kontaktní metoda měření drsnosti.....	96
Obr. 30 Výroba zkušebních těles	97
Obr. 31 Zkušební těleso a zkušební stroj (ČSN EN 302-1, 2023).....	98
Obr. 32 Expozice těles jednotlivým fázím dle ČSN EN 302-1 (2023).....	98
Obr. 33 Zkušební těleso a zkušební stroj INSTRON (ČSN EN 302-1, 2023)	100
Obr. 34 Výroba nosníku k předtestování	101
Obr. 35 Stanovení pevnosti v ohybu 4bodový ohyb dle ČSN EN 408+A1 (2012).....	102
Obr. 36 Model redukce průřezu lepeného nosného prvku exponovaného požárem.....	112
Obr. 37 Průběh zatížení nosného prvku exponovaného	113
Obr. 38 Teplotní pole prostup tepla v průřezu nosného prvku exponovaného požárem	114
Obr. 39 Přístroj WoodEye	116
Obr. 40 Proces přípravy materiálu	117
Obr. 41 Tloušťkování materiálu	117
Obr. 42 Návrh rozmístění teplotních čidel v nosníku.....	118
Obr. 43 Drážky pro vývod teplotních čidel.....	118
Obr. 44 Drážky pro element	118

Obr. 45 Speciální elementy pro implementaci teplotního čidla	119
Obr. 46 Aplikace teplotního čidla na element.....	120
Obr. 47 Aplikace lepidla do vyhotovených drážek	120
Obr. 48 Koláž – vkládání teplotních čidel do drážek a fixování.....	120
Obr. 49 Aplikace lepidla na lamely.....	121
Obr. 50 Fixování lamel při lepení	121
Obr. 51 Vrtání přístrojem Resistograf 4452-S	122
Obr. 52 Fixování lamel při lepení	122
Obr. 54 Dezintegrováná termosetická hmota.....	Chyba! Záložka není definována.
Obr. 53 Penetrování kontaktní ploch lamel.....	Chyba! Záložka není definována.
Obr. 55 Aplikace směsi lepidla a termosetické látky na lamely	124
Obr. 56 Implementace lanka – průtahoměru	124
Obr. 57 Lepení 3 lamely - kompletace modifikovaného nosníku	125
Obr. 58 Frézování bočních ploch nosníků	125
Obr. 59 Broušení nosníků - dokončování povrchu	126
Obr. 60 Kontrola čidel a balení nosníků	126
Obr. 61 Technická dokumentace zkušební vzorku v peci + teplotní čidla	127
Obr. 62 Nosníky instalované ve velké horizontální peci	128
Obr. 63 Detail nosníku v peci.....	128
Obr. 64 Tepelná degradace zkušebních vzorků	129
Tab. 1 Pevnostní charakteristiky vybraných dřevin	35
Tab. 2 Zvolené typy testovaných lepidel	92
Tab. 3 Zvolené typy modifikačních prostředků	94
Tab. 4 Technické parametry termosetické pryskyřice	94
Tab. 5 Doba expozice a typ označení prostředí pro testování zkušebních těles	99
Tab. 6 Výsledné hodnoty drsnosti povrchu dřeva dubu.....	131
Tab. 7 Výsledky zkoušky pro kritérium únosnosti dle ČSN EN 1363-1 (2021)	155
Tab. 8 Výsledky zkoušky maximálních hodnot vnitřních sil.....	156
Tab. 9 Tabulkové predikce vybraných časových stavů.....	157
Tab. 10 Výsledky zkoušky požární odolnosti PUR+T.....	173
Tab. 11 Výsledky zkoušky požární odolnosti PUR	173
Graf 1 Drsnost povrchu dřeva dubu	132
Graf 2 Drsnost povrchu dřeva dubu modifikovaného KOH·H ₂ O.....	132
Graf 3 Podélná smyková pevnost při tahovém namáhání v expozici 1 (klimatizování)....	134
Graf 4 Podélná smyková pevnost při tahovém namáhání v expozici 2 (máčení)	137
Graf 5 Podélná smyková pevnost při tahovém namáhání v expozici 3 (vaření).....	139
Graf 6 DSC graf teplotní křivky lepidel.....	142
Graf 7 Tepelná stabilita lepidel	144
Graf 8 DSC graf teplotní křivky adhezivního systému	145
Graf 9 Smyková pevnost při tahovém namáhání při zvýšených teplotách (PUR2010).....	149
Graf 10 Smyková pevnost při tahovém namáhání při zvýšených teplotách (PUR+PF)	151
Graf 11 Pevnosti v ohybu lepeného lamelového nosníku k předtestování	153
Graf 12 Průměrná teplota v peci	160

Graf 13 Procentuální odchylka d_e	161
Graf 14 Maxima a minima odchylek jednotlivých čidel v peci.....	162
Graf 15 Tlak v peci	163
Graf 16 Vnitřní teplota testovaného vzorku PUR + PF	167
Graf 17 Vnitřní teplota testovaného vzorku PUR2010.....	168
Graf 18 Průhyb / rychlost průhybu ve středu rozpětí nosníku.....	170

Seznam vědeckých publikací

Sahula, L., Hájková, K., Holeček, T., Zeidler, A., Gach, B. M., Radoń, R., Słowiński, K., Bednarz, B., Michalec, K., & Romanek, P. (2026) Properties and depth-related changes in moderately fire-affected pedunculate Oak wood. *Fire*, 9(248), 1-15. DOI:

[10.3390/fire9060248](https://doi.org/10.3390/fire9060248).

Zachara, T., Šedivka, P., Borůvka, V., Kubista, K., Holeček, T., Lexa, M., **Sahula, L.**, & Sikora, A. (2026). Cold-pressed insulation boards from recycled cotton fibers using a water-borne PVAc–starch binder: processing, structure and properties. *Materials*, 19(6), 1097, 1-19. DOI: [10.3390/ma19061097](https://doi.org/10.3390/ma19061097).

Holeček, T., **Sahula, L.**, Hájková, K., Zeidler, A., Gach, M. B., Tylek, P., Słowiński, K., Wąsik, R., Michalec, K., & Marcinik, T. (2025). Changes in Chemical and Mechanical Wood Properties in Silver Fir, Norway Spruce and Scots Pine Trees as a Result of High Temperatures Due to Fire. *Fire*, 9(1), 6. DOI: [10.3390/fire9010006](https://doi.org/10.3390/fire9010006).

Hájková, K., Šedivka, P., Holeček, T., Berčák, R., & **Sahula, L.** (2025). The effect of chemical modification by synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of structural fir (*Abies alba* L.) wood. *Fire*, 8(3), 116, 1-16. DOI: [10.3390/fire8030116](https://doi.org/10.3390/fire8030116).

Holeček, T., Šedivka, P., **Sahula, L.**, Berčák, R., Zeidler, A., & Hájková, K. (2025). Investigation of pressure vacuum impregnation using inorganic, organic, and natural fire retardants on Beech wood (*Fagus sylvatica*) and its impact on fire resistance. *Fire*, 8(8), 318, 1-13. DOI: [10.3390/fire8080318](https://doi.org/10.3390/fire8080318).

Hýsek, Š., **Sahula, L.**, Němec, M., Żółtowska, S., Kytka, T., & Wimmer, R. (2025). Non-standard adhesives for wood-based composites: powder adhesives and bicomponent fibers. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 39(5), 778-800. DOI: [10.1080/01694243.2024.2423005](https://doi.org/10.1080/01694243.2024.2423005).

- Hýsek, Š., **Sahula, L.**, Němec, M., Żółtowska, S., Kytka, T., & Wimmer, R. (2025). Non-standard adhesives for wood-based composites: powder adhesives and bicomponent fibers. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 39(5), 778-800. DOI: [10.1080/01694243.2024.2423005](https://doi.org/10.1080/01694243.2024.2423005).
- Němec, M., Janesch, J., **Sahula, L.**, Hájková, K., Pipiška, T., Král, P., & Hýsek, Š. (2025). Development of an innovative powder adhesive based on epoxy-polyester and lignin for production of particleboards. *Case Studies in Construction Materials*, e04985. DOI: [10.1016/j.cscm.2025.e04985](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04985).
- Kytka, T., Gašparík, M., Novák, D., **Sahula, L.**, Karami, E. & Das, S. (2024). Burning properties of combined glued laminated timber. *Fire*, 7(1), 30, 1-18. DOI: [10.3390/fire7010030](https://doi.org/10.3390/fire7010030).
- Kytka, T., Gašparík, M., **Sahula, L.**, Novák, D., Karami, E., Das, S., & Sviták, M. (2024). Predicted and experimental bending behaviour of glulam bonded by RPF adhesive. *Materials*, 17(2), 514, 1-18. DOI: [10.3390/ma17020514](https://doi.org/10.3390/ma17020514).
- Sahula, L.**, Šedivka, P., Zachara, T., & Borůvka, V. (2023). The effect of chemical modification of the surface of the glued surface on the strength of the structural joint of oak wood. *Central European Forestry Journal*, 69(2), 120-125. DOI: [10.2478/forj-2023-0009](https://doi.org/10.2478/forj-2023-0009).
- Kytka, T., Gašparík, M., **Sahula, L.**, Karami, E., Teterin, D., Das, S., & Kvietková, M. S. (2022). Bending characteristics of glued laminated timber depending on the alternating effects of freezing and heating. *Construction and Building Materials*, 350, 128916. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.128916](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128916).
- Dvořák, O., Pánek, M., Kvietková, M. S., Pastierovič, F., Štěrbová, I., Kubista, K., & **Sahula, L.** (2022). Influence of wood species on quality of exterior transparent acrylic coating during outdoor exposure. *Polymers*, 15, 3251, 1-13. DOI: [10.3390/polym15153251](https://doi.org/10.3390/polym15153251).
- Sahula L.**, Šedivka P., Żółtowska S., Kytka T., & Borůvka V. (2022) Increasing the adhesion of core wood by chemical surface modification. 10th Hardwood conference proceedings. 12-14 october 2022. University of Sopron press. Sopron, Hungary. Pp152-156. ISBN 978-963-334-446-0. ISSN 2631-004X. DOI: [10.35511/978-963-334-446-0](https://doi.org/10.35511/978-963-334-446-0)

Sahula L., Kytka T., Novák D., Borůvka V., & Šedivka P. (2022). Chemical modification of oak core wood for the application of construction adhesive. 62nd student scientific international conference. 25th may 2022. Technical university in Zvolen, Slovak Republic. Pp.150-160. ISBN 978-80-228-3315-8.

Dvořák, O.; Zachara, T.; Sarvašová K., M.; Štěrbová, I., & **Sahula, L.** (2023). Increasing the durability of the exterior coating system by surface sealing. 32nd International Conference on Wood Science and Technology - ICWST 2023, Unleashing the Potential of Wood-Based Materials, proceeding of papers, 7-8 December, Zagreb, pp. 50-57, ISBN 978-953-292-083-3.

Kubista, K., Pavelek, M.; Zachara, T., Krotký, M., **Sahula, L.**, Lexa, M., & Šedivka, P. (2023). Increasing the durability of the exterior coating system by surface sealing. 32nd International Conference on Wood Science and Technology - ICWST 2023, Unleashing the Potential of Wood-Based Materials, proceeding of papers, 149-153 December, Zagreb, pp. 50-57, ISBN 978-953-292-083-3.

Zachara, T., Šedivka, P., Borůvka, V., Kubista, K., Holeček, T., Lexa, M., **Sahula, L.**, & Sikora, A. (2026). Cold-pressed insulation boards from recycled cotton fibers using a water-borne PVAc–starch binder: Processing, structure and properties. *Materials*, 19(6), 1097. DOI: [10.3390/ma19061097](https://doi.org/10.3390/ma19061097).

Seznam použitých zdrojů

- Aicher, S., & Stapf, G. (2014). Glulam from European white oak: finger joint influence on bending size effect. *Materials and Joints in Timber Structures* (pp. 641-656). Springer, Dordrecht. DOI: [10.1007/978-94-007-7811-5_58](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5_58).
- Aicher, S., Ohnesorge, D. (2011). Shear strength of glued laminated timber made from European beech timber. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69, 143-154. DOI: [10.1007/s00107-009-0399-9](https://doi.org/10.1007/s00107-009-0399-9).
- Aicher, S., Christian, Z., & Dill-Langer, G. (2014, August). Hardwood glulams—emerging timber products of superior mechanical properties. Proceedings of the World Conference on Timber Engineering, Quebec City, QC, Canada (pp. 10-14).
- Aicher, S., Ahmad, Z., & Hirsch, M. (2018). Bondline shear strength and wood failure of European and tropical hardwood glulams. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(4), 1205-1222. DOI: [10.1007/s00107-018-1305-0](https://doi.org/10.1007/s00107-018-1305-0).
- Arriaga, F., Wang, X., Íñiguez-González, G., Llana, D. F., Esteban, M., & Niemz, P. (2023). Mechanical properties of wood: A review. *Forests*, 14(6), 1202, 1-61. DOI: [10.3390/f14061202](https://doi.org/10.3390/f14061202).
- ASTM D4761-19. (2019). Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-based structural materials. ASTM International.
- ASTM E119-20. (2020). Standard test methods for fire tests of building construction and materials. ASTM International.
- ASTM D198-22a. (2022). Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. ASTM International.
- ASTM D3737-18(2023)e1. (2023). Standard practice for establishing allowable properties for structural glued laminated timber (glulam). ASTM International.
- Aydemir, D., Gündüz, G., Altuntaş, E., Ertaş, M., Şahin, H. T., & Alma, M. H. (2011). Investigating changes in the chemical constituents and dimensional stability of heat-treated hornbeam and uludag fir wood. *BioResources*, 6(2), 1308-1321.
- Babiak, M., & Dubovský, J. (2001). *Problémy z mechanických vlastností dreva. Príručka*. Technická univerzita. ISBN: 80-228-1076-2
- Back, E. L. (1993). Oxidative activation of wood surfaces for glue bonding. *Wood Science and Technology*, 27, 183-193. DOI: [10.1007/BF00192815](https://doi.org/10.1007/BF00192815).
- Báder, M., Horváth, D. Á., & Fehér, S. (2025). Properties of 2–5 layers small-sized glued-laminated timber using lower quality Oak (*Quercus spp.*) lamellae. *Forests*, 16(12), 1767, 1-14. DOI: [10.3390/f16121767](https://doi.org/10.3390/f16121767).

- Balabán, K. *Nauka o dřevě: část I. – Anatomie dřeva*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1955. 216 s. Lesnická knihovna. Velká řada. Svazek 16.
- Bednarek, Z., & Griškevičius, M. (2008). *Influence of strength reduction of timber in fire on structural resistance*. Zeszyty Naukowe SGSP. Szkoła Główna Służby Pożarniczej.
- Bergman, T. L. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- Bernaczyk, A., Wagenführ, A., Terfloth, C., Lincke, J., Krystofiak, T., & Niemz, P. (2023). Investigations into the influence of temperature on the tensile shear strength of various adhesives. *Materials*, 16(18), 6173, 1-12. DOI: [10.3390/ma16186173](https://doi.org/10.3390/ma16186173).
- Bekhta, P., & Niemz, P. (2003). Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung*, 57(5), 539-546. DOI: [10.1515/HF.2003.080](https://doi.org/10.1515/HF.2003.080).
- Bente, M., Avramidis, G., Förster, S., Rohwer, E. G., & Viöl, W. (2004). Wood surface modification in dielectric barrier discharges at atmospheric pressure for creating water repellent characteristics. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 62(3), 157-163. DOI: [10.1007/s00107-004-0475-0.pdf](https://doi.org/10.1007/s00107-004-0475-0.pdf).
- Beyler, C., Beitel, J., Iwankiw, N., & Lattimer, B. (2007). *Fire resistance testing for performance-based fire design of buildings*. Final report. Quincy, MA: The Fire Protection Research Foundation, Batterymarch Park.
- Bila, N. F., Trianoski, R., Iwakiri, S., Egas, A. F., Manhiça, A. A., & Da Rocha, M. P. (2021). Bonding quality of two lesser-used wood species *Brachystegia spiciformis* and *Julbernardia globiflora* from Mozambique. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 23, 1-12. DOI: [10.4067/s0718-221x2021000100441](https://doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100441).
- Binder, W., H., & Dunky, M. (2004). Melamine–formaldehyde resins. *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, 4, 1-8. DOI: [10.1002/0471440264](https://doi.org/10.1002/0471440264).
- Bockel, S., Mayer, I., Konnerth, J., Niemz, P., Swaboda, C., Beyer, M., & Pichelin, F. (2017). Influence of wood extractives on two-component polyurethane adhesive for structural hardwood bonding. *The Journal of Adhesion*, 94(10), 829-845. DOI: [10.1080/00218464.2017.1389279](https://doi.org/10.1080/00218464.2017.1389279).
- Bockel, S., Mayer, I., Konnerth, J., Niemz, P., Swaboda, C., Beyer, M., & Pichelin, F. (2018). Influence of wood extractives on two-component polyurethane adhesive for structural hardwood bonding. *The Journal of Adhesion*, 94(10), 829-845. DOI: [10.1080/00218464.2017.1389279](https://doi.org/10.1080/00218464.2017.1389279).
- Bockel, S., Mayer, I., Konnerth, J., Harling, S., Niemz, P., Swaboda, C., Beyer, M., Bieri, N., Weiland, G., & Pichelin, P. (2019). The role of wood extractives in structural hardwood bonding and their influence on different adhesive systems. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 91, 43-53. DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2019.03.001](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.03.001).

- Bockel, S., Harling, S., Grönquist, P., Niemz, P., Pichelin, F., Weiland, G., & Konnerth, J. (2020). Characterization of wood-adhesive bonds in wet conditions by means of nanoindentation and tensile shear strength. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(3), 449-459. DOI: [10.1007/s00107-020-01520-1](https://doi.org/10.1007/s00107-020-01520-1).
- Bodig, J., Jayne, B., A. (1982). *Mechanics of wood and wood composites* (2nd ed.). Van Nostrand Reinhold Company. ISBN 0-442-00822-8.
- Böger, T., Engelhardt, M., Suh, F. T., Richter, K., & Sanchez-Ferrer, A. (2024). Wood-water interactions of primers to enhance wood-polyurethane bonding performance. *Wood Science and Technology*, 58(1), 135-160. DOI: [10.1007/s00226-023-01508-z](https://doi.org/10.1007/s00226-023-01508-z).
- Bogensperger, T., Unterwieser, H., & Schickhofer, G. (2006). *The Mechanical inconsistency in the evaluation of the modulus of elasticity according to EN384*. In CIB W18, 39th Meeting (1-12).
- Bohannon, B. (1966). Effect of size on bending strength of wood members. *Forest Product*, 56, 1-14.
- Bolton, A. J., Dinwoodie, J. M., & Davies, D. A. (1988). The validity of the use of SEM/EDAX as a tool for the detection of UF resin penetration into wood cell walls in particleboard. *Wood Science and Technology*, 22(4), 345-356.
- Booth, K., Cummings, B., Karoly, W., J., Mullins, S., Robert, W., P., Spence, M., & Banta, J. (2009). Measurements of airborne methylene diphenyl diisocyanate (MDI) concentration in the US workplace. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 6(4), 228-238. DOI: [10.1080/15459620902724060](https://doi.org/10.1080/15459620902724060).
- Boström, L., Ormarsson, S., & Dahlblom, O. (1996). *On determination of modulus of elasticity*. CIB W18 Meeting 29, Bordeaux, France. Paper 29-10-3.
- Boyd, G. E., & Livingston, H. K. (1942). Adsorption and the energy changes at crystalline solid surfaces. *Journal of the American Chemical Society*, 64(10), 2383-2388. DOI: [10.1021/ja01262a047](https://doi.org/10.1021/ja01262a047).
- Browne, F. L., & Brouse, D. (1929). Nature of adhesion between glue and wood: A Criticism of the hypothesis that the strength of glued wood joints is due chiefly to mechanical adhesion. *Industrial & Engineering Chemistry*, 21(1), 80-84. DOI: [10.1021/ie50229a023](https://doi.org/10.1021/ie50229a023).
- Brunetti, M., Nocetti, M., Pizzo, B., Aminti, G., Cremonini, C., Negro, F., & Mugnozza, G. S. (2020). Structural products made of beech wood: quality assessment of the raw material. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(5), 961-970. DOI: [10.1007/s00107-020-01542-9](https://doi.org/10.1007/s00107-020-01542-9).
- Brandmair, A., Clauß, S., Haß, P., & Niemz, P. (2012). Verklebung von Laubhölzern mit 1K-PUR-Klebstoffen für den Holzbau. *Bauphysik*, 34(5), 210-216. DOI: [10.1002/bapi.201200025](https://doi.org/10.1002/bapi.201200025).

- Buchanan, A. H., & Abu, A. (2001). *Structural design for fire safety* (Vol. 273). New York: Wiley.
- Buchanan, A. H., & Abu, A. K. (2017). *Structural design for fire safety*. John Wiley & Sons.
- Cábová, K., Lišková, N., Novotná, P., Benýšek, M., Zeman, F., & Wald, F. (2017). Modelling of standard fire test. *Engineering Mechanics*, 23, 226-229.
- Camú, C. T., & Aicher, S. (2018). Oak glulam bending strength by XFEM simulation including stochastic and autocorrelated board properties. *Engineering Structures*, 255(15), 113862, 1-11.
- Carlquist, S. (2013). Comparative wood anatomy: systematic, ecological, and evolutionary aspects of dicotyledon wood. Springer Science & Business Media.
- Castanié, B., Peignon, A., Marc, C., Eyma, F., Cantarel, A., Serra, J., & Marcon, B. (2024). Wood and plywood as eco-materials for sustainable mobility: A review. *Composite Structures*, 329, 117790, 1-45. DOI: [10.1016/j.compstruct.2023.117790](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117790).
- Cheng, E., & Sun, X. (2006). Effects of wood-surface roughness, adhesive viscosity and processing pressure on adhesion strength of protein adhesive. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20(9), 997-1017. DOI: [10.1163/156856106777657779](https://doi.org/10.1163/156856106777657779).
- Chrebet, T., & Balog, K. (2010). Critical rate of thermal decomposition of pure and impregnated lignocellulosic materials. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 18(28), 109-118. DOI: [10.2478/v10186-010-0014-2](https://doi.org/10.2478/v10186-010-0014-2).
- Chuteira, C.A., & Grao, A.B. (2013). *Oak: Ecology, types and management*. Nova Science Publisher.
- Cibecchini, D., Cavalli, A., Goli, G., & Togni, M. (2016). Beech sawn timber for structural use: a case study for mechanical characterization and optimization of the Italian visual strength grading rule. *Journal of Forest Science*, 62(11), 521-528. DOI: [10.17221/93/2016-JFS](https://doi.org/10.17221/93/2016-JFS).
- Clauß, S., Joscak, M., & Niemz, P. (2011). Thermal stability of glued wood joints measured by shear tests. *European Journal of Wood and Wood Products*, 69(1), 101-111.
- Clauß, S., Allenspach, K., Gabriel, J., & Niemz, P. (2011). Improving the thermal stability of one-component polyurethane adhesives by adding filler material. *Wood Science and Technology*, 45(2), 383-388.
- Conner, A. H. (1996). Urea-formaldehyde adhesive resins. *Polymeric Materials Encyclopedia*, 11(8), 8497-8501.
- Council, C., W. (1991). *Wood reference handbook. A guide to the architectural use of wood in building construction*. Canadian Wood Council.

- Côté, W. A., & Kollmann, F. F. (1984). *Principles of wood science and technology. I solid wood*. Springer Science & Business Media.
- Custodio, J., Broughton, J., Cruz, H., & Hutchinson, A. (2008). A review of adhesion promotion techniques for solid timber substrates. *The Journal of Adhesion*, 84(6), 502-529. DOI: [10.1080/00218460802161558](https://doi.org/10.1080/00218460802161558).
- Čunderlík, I. *Štruktúra dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. s. 135. ISBN 978-80-228-2061-5.
- Dukarska, D., & Mirski, R. (2023). Wood-Based materials in building. *Materials*, 16(8), 2987, 1-5. DOI: [10.3390/ma16082987](https://doi.org/10.3390/ma16082987).
- De Avila Bockorny, G., Forte, M. M. C., Stamboroski, S., Noeske, M., Keil, A., & Cavalcanti, W. L. (2016). Modifying a thermoplastic polyurethane for improving the bonding performance in an adhesive technical process. *Applied Adhesion Science*, 4(1), 1-16. DOI: [10.1186/s40563-016-0060-x](https://doi.org/10.1186/s40563-016-0060-x).
- Čabalová, I., Kačík, F., Lagaňa, R., Výbohová, E., Bubeníková, T., Čaňová, I., & Ďurkovič, J. (2018). Effect of thermal treatment on the chemical, physical, and mechanical properties of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) wood. *BioResources*, 13(1), 157-170. ISSN: 1930-2126. DOI: [10.15376/biores.13.1.157-170](https://doi.org/10.15376/biores.13.1.157-170).
- Časopis Konstrukce. (28.5.2026) Stanovení teplotního zatížení konstrukcí při požáru. [Online]: <http://old.konstrukce.cz>.
- ČSN 49 0108. (1993). Drevo. Zisťovanie hustoty. Federální úřad pro měření. Český normalizační institut. Praha.
- ČSN 49 0115. (1979). Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe. Úřad pro normalizaci a měření. Československá státní norma.
- ČSN 73 0540-1. (2005). Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie. Český normalizační institut.
- ČSN 73 0802. (2023). Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 204. (2017). Klasifikace termoplastických lepidel na dřevo pro nekonstrukční aplikace. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha.
- ČSN EN 302-1. (2023). Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Zkušební metody – Část 1: Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání. Česká agentura pro standardizaci.
- ČSN EN 338. (2016). Konstrukční dřevo – Třídy pevnosti. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

- ČSN EN 408+A1. (2012). Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Praha.
- ČSN EN 975-1. (2009). Řezivo – Vizuální třídění listnatého dřeva – Část 1: Dub a buk. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 1363-1. (2021). Zkoušky požární odolnosti – Část 1: Obecné požadavky. Česká agentura pro standardizaci.
- ČSN EN 1365-3. (2000). Zkoušení požární odolnosti nosných prvků – Část 3: Nosníky. Český normalizační institut.
- ČSN EN 1995-1-1. (2006). Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Český normalizační institut. Praha.
- ČSN EN 1995-1-2. (2006). Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Český normalizační institut. Praha.
- ČSN EN 4287. (1999). Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Český normalizační institut.
- ČSN EN 12092. (2002). Lepidla – Stanovení viskozity. Český normalizační institut. Praha.
- ČSN EN 13381-7. (2019). Zkušební metody pro stanovení příspěvku k požární odolnosti konstrukčních prvků – Část 7: Ochrana aplikovaná na dřevěné prvky. Česká agentura pro standardizaci.
- ČSN EN 13501-2. (2017). Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 2: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 14080. (2013). Dřevěné konstrukce – Lepené lamelové dřevo a lepené rostlé dřevo – Požadavky. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- ČSN EN 14081-2+A1. (2022). Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo obdélníkového průřezu tříděné podle pevnosti – Část 2: Strojní třídění; doplňující požadavky na zkoušky typu. Česká agentura pro standardizaci.
- ČSN EN 15425. (2023). Lepidla – Jednosložková polyurethanová (PUR) lepidla pro nosné dřevěné konstrukce – Klasifikace a funkční požadavky. Česká agentura pro standardizaci.
- ČSN EN ISO 4288. (1999). Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. Český normalizační institut.

- Dachev, D., Kazilas, M., Alfano, G., & Omairey, S. (2025). Towards reliable adhesive bonding: A comprehensive review of mechanisms, defects, and design considerations. *Materials*, 18(12), 2724, 1-31. DOI: [10.3390/ma18122724](https://doi.org/10.3390/ma18122724)
- Darnikowski, D., Mieloszyk, M., & Weryk, M. (2022). Fire resistance of construction elements. *Mechanical, and Aerospace Systems*, 12046, 203-218. DOI: [10.1117/12.2612503](https://doi.org/10.1117/12.2612503).
- Derkowski, A., Kuliński, M., Trociński, A., Krzosek, S., & Mirski, R. (2022). Selected mechanical properties of glue-laminated timber produced from locally repaired timber. *Materials*, 15(22), 8112, 1-13. DOI: [10.3390/ma15228112](https://doi.org/10.3390/ma15228112).
- Desch, H.E., & Dinwoodie, J.M. (1996). Density of Wood. *Timber Structure, Properties, Conversion and Use*. Palgrave, London. DOI: [10.1007/978-1-349-13427-4_8](https://doi.org/10.1007/978-1-349-13427-4_8).
- Detlefsen, W., D. (2002). Phenolic resins: some chemistry, technology, and history. *Adhesion Science and Engineering* (pp. 869-945). Elsevier Science BV.
- Dietenberger, M. A., & Hasburgh, L. E. (2016). Wood products thermal degradation and fire. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1(1), 1-7.
- Dougal, E. F., & Ef, D. (1980). *Glueline characteristics and bond durability of southeast Asian species after solvent extraction and planing of veneers*. Springer Nature Link.
- Drysdale, D. (2011). An introduction to fire dynamics (3. vyd.). Wiley. Drysdale, D. *An introduction to fire dynamics*. 3rd ed. Chichester: Wiley, 2011. ISBN: 9780470319031.
- Dumont, F., Wellens, E., Gernay, T., & Franssen, J. M. (2016). Loadbearing capacity criteria in fire resistance testing. *Materials and Structures*, 49(11), 4565-4581. DOI: [10.1617/s11527-016-0807-7](https://doi.org/10.1617/s11527-016-0807-7).
- Dumont, F. (2017). *Fire resistance testing*. Katholieke Universiteit Leuven.
- Dunky, M. (2003). Chemistry of adhesives. *COST Action E13* (sv. 3). European Cooperation in Science and Technology.
- Duquesne, S., Le Bras, M., Bourbigot, S., Delobel, R., Camino, G., Eling, B., & Roels, T. (2001). Thermal degradation of polyurethane and polyurethane/expandable graphite coatings. *Polymer degradation and stability*, 74(3), 493-499. DOI: [10.1016/S0141-3910\(01\)00177-X](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(01)00177-X).
- Dzurenda, L. (2018). The shades of color of Quercus robur L. wood obtained through the processes of thermal treatment with saturated water vapor. *BioResources*, 13(1), 1525-1533. DOI: [10.15376/biores.13.1.1525-1533](https://doi.org/10.15376/biores.13.1.1525-1533).
- Ehmcke, G., & Grosser, D. (2014). *Das Holz der Eiche—Eigenschaften und Verwendung*. LWF Wissen.

- Ehrhart, T., Fink, G., Steiger, R., & Frangi, A. (2016a). Experimental investigation of tensile strength and stiffness indicators regarding European beech timber. *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*, WCTE 22-25 August, Vienna, Austria 600-607.
- Ehrhart, T., Fink, G., Steiger, R., & Frangi, A. (2016b). Strength grading of European beech timber for the production of GLT & CLT. *International Network on Timber Engineering Research: Proceedings of Meeting 49* (Vol. 49, pp. 29-44). Timber Scientific Publishing, KIT Holzbau und Baukonstruktionen. DOI: [10.3929/ethz-a-010795316](https://doi.org/10.3929/ethz-a-010795316).
- Ehrhart, T., Steiger, R., & Frangi, A. (2018a) Mechanical properties of European beech glued laminated timber. In: *Proceedings of the International Network on Timber Engineering Research*, INTER, Meeting 51, Tallin, Estonia. paper 51-12-4.
- Ehrhart, T., Steiger, R., Palma, P., & Frangi, A. (2018b). Mechanical properties of European beech glued laminated timber. International council for research and innovation in building and construction (ed) Working commission W18-Timber structures, 51-12. DOI: [10.1007/s00107-017-1279-3](https://doi.org/10.1007/s00107-017-1279-3).
- Ek, M., Gellerstedt, G., & Henriksson, G. (2009). *Volume 1 Wood Chemistry and Wood Biotechnology*. De Gruyter. DOI: [10.1515/9783110213409](https://doi.org/10.1515/9783110213409).
- Element Fire Extinguishers. (21.03.2026). The four components of the fire tetrahedron and fire triangle explained. [Online]: <https://https://elementfire.com>
- Esteves, B., & Pereira, H. (2009). Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources*, 4(1), 370-404.
- Fahrni, R., Schmid, J., Klippel, M., & Frangi, A. (2018). Correct temperature measurements in fire exposed wood. In *Proceedings of the 2018 World Conference on Timber Engineering*. World Conference on Timber Engineering (WCTE). DOI: [10.3929/ethz-b-000289850](https://doi.org/10.3929/ethz-b-000289850).
- Fahrni, R., Klippel, M., Just, A., Ollino, A., & Frangi, A. (2019). Fire tests on glued-laminated timber beams with specific local material properties. *Fire Safety Journal*, 107, 161-169. DOI: [10.1016/j.firesaf.2017.11.003](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.11.003).
- Farmer, B. A. (1981). *Handbook of Hardwood*. 2nd Edition. Department of the Environment. Princes Risborough Laboratory.
- Ferrari, S., Allegretti, O., Cuccui, I., Moretti, N., Marra, M., & Todaro, L. (2013). A revaluation of turkey oak wood (*Quercus cerris* L.) through combined steaming and thermo-vacuum treatments. *BioResources*, 8(4), 5051-5066.
- Franke, S. (2013). *Hoch belastet–optimieren mit Laubholz*. Holzbautag Biel.
- Frese, M., & Blaß, H. J. (2005, August). Beech glulam strength classes. In *Proceedings of the Meeting* (Vol. 38).

- Frese, M. (2006). *Die Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche. Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Laminierungseffekt*. Universitätsverlag Karlsruhe.
- Fridley, K. J., Pollock, J. D. G., & Cobein, K. (2006). *Design of Wood Structures-ASD/LRFD*. New York, NY: McGraw-Hill. ISBN-13: 978-0-07-145539-8.
- Frihart, C., R. (2005). *Wood adhesion and adhesives*. In: Row-ell, R.M., ed. Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton, FL: Taylor & Francis. 215-278. ISBN-13: 978-1-4398-5381-8.
- Frihart, C. R. (2009). Adhesive groups and how they relate to the durability of bonded wood. *Journal of adhesion science and technology*, 23(4), 601-617. DOI: [10.1163/156856108X379137](https://doi.org/10.1163/156856108X379137).
- Frihart, C.R., & Hunt, C.G. (2021). Chapter 10: Wood adhesives: bond formation and performance. In: Wood handbook—wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-282. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 23 pp.
- Friquin, K. L. (2011). Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. *Fire and Materials*, 35(5), 303-327. DOI: [10.1002/fam.1055](https://doi.org/10.1002/fam.1055).
- Furuno, T., Imamura, Y., & Kajita, H. (2004). The modification of wood by treatment with low molecular weight phenol-formaldehyde resin: a properties enhancement with neutralized phenolic-resin and resin penetration into wood cell walls. *Wood Science and Technology*, 37(5), 349-361. DOI: [10.1007/s00226-003-0176-6](https://doi.org/10.1007/s00226-003-0176-6).
- Gaff, M., Kačík, F., Sandberg, D., Babiak, M., Turčani, M., Niemz, P., Hanzlík, P. (2019). The effect of chemical changes during thermal modification of European oak and Norway spruce on elasticity properties. *Composite Structures*, 220, 529-538. DOI: [10.1016/j.compstruct.2019.04.034](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.04.034).
- Gall, R., Ispas, M., Zeleniuc, O., Bedeleian, B., Georgescu, S., & Campean, M. (2025). Moisture Behaviour of Glulam Made from Mixed Species. *Applied Sciences*, 15(23), 12432, 1-13. DOI: [10.3390/app152312432](https://doi.org/10.3390/app152312432).
- Galvez, P., de Armentia, S. L., Abenojar, J., & Martinez, M. A. (2020). Effect of moisture and temperature on thermal and mechanical properties of structural polyurethane adhesive joints. *Composite Structures*, 247, 112443, 1-13. DOI: [10.1016/j.compstruct.2020.112443](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112443).
- Gandelová, L., Horáček, P., & Šlezingerová, J. (2009). *Nauka o dřevě*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita.
- Gardner, D. J., Generalla, N. C., Gunnells, D. W., & Wolcott, M. P. (1991). Dynamic wettability of wood. *Langmuir*, 7(11), 2498-2502. DOI: [10.1021/la00059a017](https://doi.org/10.1021/la00059a017).

- Gaston, C., W. (2014). Visual wood product trends in North American nonresidential buildings. *Forest Products Journal*, 64(3-4), 107-115. DOI: [10.13073/FPJ-D-13-00077](https://doi.org/10.13073/FPJ-D-13-00077).
- Gérardin, P. (2016). New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood - a review. *Annals of Forest Science*, 73(3), 559-570. DOI: [10.1007/s13595-015-0531-4](https://doi.org/10.1007/s13595-015-0531-4).
- Gierlinger, N., Keplinger, T., & Harrington, M. (2012). Imaging of plant cell walls by confocal Raman microscopy. *Nature protocols*, 7(9), 1694-1708. DOI: [10.1038/nprot.2012.092](https://doi.org/10.1038/nprot.2012.092).
- Gindl, M., Reiterer, A., Sinn, G., & Stanzl-Tschegg, S. E. (2004). Effects of surface ageing on wettability, surface chemistry, and adhesion of wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 62(4), 273-280. DOI: [10.1007/s00107-004-0471-4](https://doi.org/10.1007/s00107-004-0471-4).
- Glass, S., & Zelinka, S. (2021). Moisture relations and physical properties of wood. *Chapter 4 in FPL-GTR-282*, 4-1.
- Glos, P., Denzler, J. K., & Linsenmann, P. (2004). Strength and stiffness behaviour of beech laminations for high strength glulam. *Proceedings Meeting*, 37.
- Glos, P., & Denzler, J. K. (2006). Allocation of central European hardwoods into EN 1912. In *Proceedings of the CIB W* (Vol. 18).
- Gosselin, A., Blanchet, P., Lehoux, N., & Cimon, Y. (2017). Main motivations and barriers for using wood in multi-story and non-residential construction projects. *BioResources*, 12(1), 546-570. DOI: [10.15376/biores.12.1.546-570](https://doi.org/10.15376/biores.12.1.546-570).
- Green, D. W., Winandy, J. E., & Kretschmann, D. E. (1999). *Mechanical properties of wood*. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General Technical Report FPL; GTR-113: Pages 4.1-4.45, 113.
- Grosser, D., & Teetz, W. (1998). *Loseblattsammlung: Einheimische Nutzhölzer-Vorkommen, Baum-und Stammform, Holzbeschreibung, Eigenschaften, Verwendung*. Georgs-August Universität Göttingen.
- Grosser, D. (1977). *Die Hölzer Mitteleuropas*. Springer-Verlag.
- Grøstad, K., & Pedersen, A. (2010). Emulsion polymer isocyanates as wood adhesive: a review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24(8-10), 1357-1381. DOI: [10.1163/016942410X500981](https://doi.org/10.1163/016942410X500981).
- Grøstad, K., & Bredesen, R. (2014). *EPI for glued laminated timber*. In *Materials and Joints in Timber Structures* (pp. 355-364). Springer, Dordrecht. DOI: [10.1007/978-94-007-7811-5_32](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5_32).
- Gruber, N. J., & Powell, C. E. (1986). *Aqueous latex adhesive composition* (U.S. Patent No. 4,609,690). U.S. Patent and Trademark Office.

- Gržan, T., Novosel, A., Špada, V., Mihulja, G., & Živković, V. (2025). Achieving maximum strength in oak wood (*Quercus robur*, L.) bonding: techniques for surface preparation and adhesive application. *European Journal of Wood and Wood Products*, 83(1), 44. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02179-8>.
- Guitard, D. (1994). *Mechanical behavior of wood. Wood an engineering material*, Continuing Education and Development, Inc.
- Güllü, D., & Demirbaş, A. (2001). Biomass to methanol via pyrolysis process. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1349-1356. DOI: [10.1016/S0196-8904\(00\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00126-6).
- Halama, R., Adámková, L., Fojtík, F., Frydryšek, K., Šofer, M., Rojíček, J., & Fusek, M. (2011). *Pružnost a pevnost*. Vysoká škola báňská–Technická univerzita Ostrava a Západočeská univerzita v Plzni.
- Hahn, D. W., & Özisik, M. N. (2012). *Heat conduction*. John Wiley & Sons. ISBN 10: 0470902930
- Hall, J. R., Westerdahl, C. A., Devine, A. T., & Bodnar, M. J. (1969). Activated gas plasma surface treatment of polymers for adhesive bonding. *Journal of applied polymer science*, 13(10), 2085-2096. DOI: [10.1002/app.1969.070131006](https://doi.org/10.1002/app.1969.070131006).
- Harada, T., Hata, T., & Ishihara, S. (1998). Thermal constants of wood during the heating process measured with the laser flash method. *Journal of Wood Science*, 44, 425-431.
- Hasanagić, R., Fathi, L., Kapić, Z., Bahmani, M., Crnkić, A., Hrnjica, B., & Humar, M. (2022). Experimental and numerical determination of the longitudinal modulus of elasticity in wooden structures. *Drewno. Prace Naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 65(210). DOI: [DOI: 10.12841/wood.1644-3985.421.10](https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.421.10).
- Hasburgh, L. E., Bourne, K., & Barber, D. (2023). *Fire performance of penetrations in glulam beams: a preliminary study*. In Paper in World Conference on Timber Engineering (pp. 1545-1550). DOI: [10.52202/069179-0209](https://doi.org/10.52202/069179-0209).
- Herausgeber: Holzabsatzfonds–Absatzförderungsfonds der deutschen Forstwirtschaft, Bonn
Keywords Wood of Scots Pine (European Redwood), description of its wood, properties of its wood, use of its wood.
- Hernandez, R., Bender, D. A., Richburg, B. A., & Kline, K. S. (1992). Probabilistic modeling of glued-laminated timber beams. *Wood and Fiber Science*, 24(3), 294-306.
- Hibbeler, R. C. (2017). *Mechanics of materials: Plus mastering engineering*. Pearson. Hill, C. A. (2007). *Wood modification: chemical, thermal and other processes*. John Wiley & Sons. ISBN-13 978-0-470-02172-9.
- Hill, C., Altgen, M., & Rautkari, L. (2021). Thermal modification of wood - A review: Chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science*, 56(11), 6581-6614. DOI: [10.1021/acsomega.0c05778](https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05778).

- Hoffmeyer, P. (2003). Strength under long-term loading. In S. Thelandersson (Ed.), *Timber engineering* (pp. 131–152). Wiley.
- Holan, J., & Merenda, L. (2014). Vybrané mechanické vlastnosti modifikovaného bukového dřeva. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 56(1), 245–250.
- Hon, D. N., & Shiraishi, N. (2000). *Wood and cellulosic chemistry* (revised and expanded vyd.). CRC Press.
- Horáček, P. (1998). *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-715-7347-7.
- Hrčka, R., & Babiak, M. (2017). *Wood Thermal Properties*. In *Wood in Civil Engineering*. InTech. DOI: [10.5772/65805](https://doi.org/10.5772/65805).
- Hrčka, R., Kučerová, V., & Hýrošová, T. (2018). Correlations between oak wood properties. *BioResources*, 13(4), 8885-8898. DOI: [10.15376/biores.13.4.8885-8898](https://doi.org/10.15376/biores.13.4.8885-8898).
- Hse, C. Y., & Kuo, M. L. (1988). Influence of extractives on wood gluing and finishing-a review. *Forest Products Journal* 38 (1): 52-56.
- Hu, H., Liu, H., Zhao, J., & Li, J. (2006). Investigation of adhesion performance of aqueous polymer latex modified by polymeric methylene diisocyanate. *The Journal of Adhesion*, 82(1), 93-114. DOI: [10.1080/00218460500418623](https://doi.org/10.1080/00218460500418623).
- Huang, L., Krigsvoll, G., Johansen, F., Liu, Y., & Zhang, X. (2018). Carbon emission of global construction sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1906-1916. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.001.
- Huč, S., Hozjan, T., & Pečenko, R. (2025). Effective cross-section of a timber beam exposed to natural fires. *European Journal of Wood and Wood Products*, 83(2), 71, 1-16. DOI: [10.1007/s00107-025-02202-6](https://doi.org/10.1007/s00107-025-02202-6).
- Hunt, C., O'Dell, J., Jakes, J., Grigsby, W. J., & Frihart, C. R. (2015). Wood as polar size exclusion chromatography media: Implications to adhesive performance. *Forest Products Journal*, 65(1-2), 9-14. DOI: [10.13073/FPJ-D-14-00039](https://doi.org/10.13073/FPJ-D-14-00039).
- Hýsek, Š., Šedivka, P., Böhm, M., Schönfelder, O., & Beran, R. (2018). Influence of using recycled polyurethane particles as a filler on properties of polyurethane adhesives for gluing of wood. *BioResources*, 13(2), 2592-2601. ISSN: 1930-2126.
- Chattopadhyay, D. K., & Webster, D. C. (2009). Thermal stability and flame retardancy of polyurethanes. *Progress in Polymer Science*, 34(10), 1068-1133. DOI: [10.1016/j.progpolymsci.2009.06.002](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.06.002).
- Chang, C. I., Keith, C. T. (1978). *Properties of heat-darkened wood: II. Mechanical properties and gluability*. Aspen Bibliography Inc.

- Chen, C. M. (1970). Effect of extractive removal on adhesion and wettability of some tropical woods. *Forest Products Journal*, 20(1), 36-41.
- Chen, K., Cheng, X., Chen, Y., Qi, J., Xie, J., Huang, X., & Xiao, H. (2021). Thermal degradation kinetics of urea–formaldehyde resins modified by almond shells. *ACS omega*, 6(39), 25702-25709. DOI: [10.1021/acsomega.1c03896](https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03896).
- Chuterira, C., A. (2012) *Oak: Ecology, Types and Management*. Nova Science Publishers, Incorporated. ISBN: 978-1-61942-492-0.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (1996). Fundamentals of heat and mass transfer (Vol. 6, p. 116). New York: Wiley.
- International Agency for Research on Cancer. (2006). Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-tert-Butoxypropan-2-ol. In Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-tert-Butoxypropan-2-ol (pp. 478-478).
- ISO 834-1. (1999). Fire-resistance tests—Elements of building construction—Part 1: General requirements. International Organization for Standardization.
- ISO 13910. (2014). Timber structures — Strength graded timber — Test methods for structural properties. International Organization for Standardization.
- Issa, C. A., & Kmeid, Z. (2005). Advanced wood engineering: glulam beams. *Construction and Building Materials*, 19(2), 99-106.
- Jakub, S., & Martino, N. (2005). Wood surface roughness-what is it. In Rosenheim Workshop, BOKU University of Natural Sources and Applied Life Sciences (pp. 29-30)
- Jamadar, A, Khan, M. M. B., Ansari, M. R., Kamari, M., & Kasu, A. Applicability of acoustic waves in extinguishing fire. 2021.
- Jankowska, A., Zbiec, M., Kozakiewicz, P., Koczan, G., Olenska, S., & Beer, P. (2018). The wettability and surface free energy of sawn, sliced and sanded European oak wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 20(3), 443-454. DOI: [10.4067/S0718-221X2018005031401](https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005031401).
- Janowiak, J. J., Manbeck, H. B., Hernandez, R., Moody, R. C., & Blankenhorn, P. R. (1995). *Efficient utilization of red maple lumber in glued-laminated timber beams*. Forest Service research paper (No. PB-96-118567/XAB; FPL-RP-541). Forest Service, Madison, WI (United States). Forest Products Lab..
- Kačík, F., Geffert, A., & Kačíková, D. (2007). *Chémia* (2. vyd. 2007). Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene. ISBN: 978-80-228-1813-1.
- Kačíková, D., Netopilová, M., & Osvald, A. (2006). *Drevo a jeho termická degradácia* (1. vyd). Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství. ISBN 80-86634-78-7.

- Kačíková, D., Kačík, F., Čabalová, I., & Ďurkovič, J. (2013). Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood. *Bioresource Technology*, 144, 669-674. DOI: [10.1016/j.biortech.2013.06.110](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.110).
- Kaltschmitt M, Hartmann H, & Hofbauer H. (2016). *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer-Verlag.
- Kamarudin, N., Awang Biak, D. R., Abidin, Z., Cardona, F., & Sapuan, S. M. (2020). Rheological study of phenol formaldehyde resole resin synthesized for laminate application. *Materials*, 13(11), 2578, 1-16. DOI: [10.3390/ma13112578](https://doi.org/10.3390/ma13112578).
- Kamke, F. A., & Lee, J. N. (2007). Adhesive penetration in wood - a review. *Wood and Fiber Science*, 205-220.
- Kaplan, S. L., & Rose, P. W. (1991). Plasma surface treatment of plastics to enhance adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 11(2), 109-113. DOI: [10.1016/0143-7496\(91\)90035-G](https://doi.org/10.1016/0143-7496(91)90035-G).
- Kaplan, L., Sedlecký, M., Kvietková, M., & Sikora, A. (2018). The effect of thermal modification of oak wood on waviness values in the planar milling process, monitored with a contact method. *BioResources*, 13(1), 1591-1604. DOI: [10.15376/biores.13.1.1591-1604](https://doi.org/10.15376/biores.13.1.1591-1604).
- Kawalerczyk, J., Dukarska, D., Barczewski, M., Dziurka, D., & Mirski, R. (2023). Optimization of isocyanate content in PF/pMDI adhesive for the production of high-performing particleboards. *Polymers*, 15(24), 4645. [10.3390/polym15244645](https://doi.org/10.3390/polym15244645).
- Källsner, B., & Ormarsson, S. (1999, September). Measurement of modulus of elasticity in bending of structural timber. In RILEM symposium on timber engineering, Stockholm (pp. 639-648).
- Khelifa, M., Thi, V. D., Oudjène, M., Khennane, A., El Ganaoui, M., & Rogaume, Y. (2024). Modelling the response of timber beams under fire. *International Journal of Civil Engineering*, 22(9), 1537-1549. DOI: [10.1007/s40999-024-00973-2](https://doi.org/10.1007/s40999-024-00973-2).
- Kinjo, H., Katakura, Y., Hirashima, T., Yusa, S., & Saito, K. (2018). Deflection behavior and load-bearing period of structural glued laminated timber beams in fire including cooling phase. *Journal of Structural Fire Engineering*, 9(4), 287-299. DOI: [10.1108/JSFE-01-2017-0009](https://doi.org/10.1108/JSFE-01-2017-0009).
- Kinloch, A. J. (1987). *Adhesion and Adhesives Science and Technology*. Chapman & Hall. ISBN: 978-90-481-4003-9.
- Kitchens, S. C., Amburgey, T. L., Barnes, H. M., & Seale, R. D. (2016). Mechanical and durability properties of steam-pressed scrim lumber. *BioResources*, 11(2), 5343-5357.
- Klass, D. L. (1998). *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. Elsevier.

- Kläusler, O., Clauß, S., Lübke, L., Trachsel, J., & Niemz, P. (2013). Influence of moisture on stress–strain behaviour of adhesives used for structural bonding of wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 44, 57-65. DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2013.01.015](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.01.015).
- Kläusler, O. F. (2014). Improvement of one-component polyurethane bonded wooden joints under wet conditions (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- Kläusler, O., Hass, P., Amen, C., Schlegel, S., & Niemz, P. (2014). Improvement of tensile shear strength and wood failure percentage of 1C PUR bonded wooden joints at wet stage by means of DMF priming. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72(3), 343-354. DOI [10.1007/s00107-014-0786-8](https://doi.org/10.1007/s00107-014-0786-8).
- Klébert, S., Mohai, M., & Csiszár, E. (2022). Can plasma surface treatment replace traditional wood modification methods? *Coatings*, 12(4), 487.
- Klippel, M., Schmid, J., & Frangi, A. (2012). The Reduced Cross-section Method for timber members subjected to compression, tension and bending in fire. International council for research and innovation in building construction, working commission W18—timber structures.
- Klippel, M., & Frangi, A. (2017). Fire safety of glued-laminated timber beams in bending. *Journal of Structural Engineering*, 143(7), 04017052. DOI: [10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001781](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001781).
- Krackler, V., Keunecke, D., Niemz, P., & Hurst, A. (2011). Possible fields of hardwood application. *Wood Research*, 56(1), 125-136.
- Kobayashi, K., Kegasa, T., Hwang, S. W., & Sugiyama, J. (2019). Anatomical features of Fagaceae wood statistically extracted by computer vision approaches: Some relationships with evolution. *PloS one*, 14(8), e0220762. DOI: [10.1371/journal.pone.0220762](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220762)
- Kocaefe, D., Poncsak, S., & Boluk, Y. (2008). Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen. *BioResources*, 3(2), 517-537. ISSN: 1930-2126.
- Kolar, V., & Müller, M. (2018). Research on influence of polyurethane adhesive modified by polyurethane filler based on recyclate. *Manufacturing Technology*, 18(3), 418-423. DOI: [10.21062/ujep/115.2018/a/1213-2489/MT/18/3/418](https://doi.org/10.21062/ujep/115.2018/a/1213-2489/MT/18/3/418).
- Kollmann, F., & Malmquist, L. (1956). Über die Wärmeleitzahl von Holz und Holzwerkstoffen. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 14(6), 201-204.
- König, J. (1999). One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and postprotection situations.
- König, J. (2004, June). Notional versus one-dimensional charring rates of timber. In World conference on timber engineering (pp. 483-486).

- Konnerth, J., & Gindl, W. (2006). Mechanical characterisation of wood-adhesive interphase cell walls by nanoindentation. DOI: 10.1515/HF.2006.067.
- Konnerth, J., Kluge, M., Schweizer, G., Miljković, M., & Gindl-Altmutter, W. (2016). Survey of selected adhesive bonding properties of nine European softwood and hardwood species. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(6), 809-819. DOI: [10.1007/s00107-016-1087-1](https://doi.org/10.1007/s00107-016-1087-1).
- Korkmaz, O., & Büyüksarı, Ü. (2019). Effects of moisture content on mechanical properties of micro-size oak wood. *BioResources*, 14(4), 7655-7663. DOI: 10.15376/biores.14.4.7655-7663.
- Kotilainen, R. (2000). Chemical changes in wood during heating at 150-260 C (No. 80.).
- Kovačević, V., Šmit, I., Hacı, D., Sućeska, M., Mudri, I., & Bravar, M. (1993). Role of the polyurethane component in the adhesive composition on the hydrolytic stability of the adhesive. *International journal of adhesion and adhesives*, 13(2), 126-136.
- Kovryga, A. (2023). Strength grading of hardwoods for glulam application. Mechanical properties and quality control options (Doctoral dissertation, Technische Universität München).
- Král, P., Klímek, P., & Děcký, D. (2015). Comparison of the bond strength of oak (*Quercus L.*) and beech (*Fagus sylvatica L.*) wood glued with different adhesives considering various hydrothermal exposures. *Journal of Forest Science*, 61(5). DOI: [10.17221/95/2014-JFS](https://doi.org/10.17221/95/2014-JFS).
- Kubovský, I., Kačíková, D., & Kačík, F. (2020). Structural changes of oak wood main components caused by thermal modification. *Polymers*, 12(2), 485, 1-12. DOI: [10.3390/polym12020485](https://doi.org/10.3390/polym12020485)
- Kumar, S. (1994). Chemical modification of wood. *Wood and Fiber Science*, 26(2), 270-280.
- Kumar, S., Singla, A., & Vidwans, R. R. Fire Investigation and Ignitable Liquid Residue Analysis. In: *Technologies to Advance Automation in Forensic Science and Criminal Investigation*. IGI Global, 2022. p. 91-118.
- Lam, F. (2001). Modern structural wood products. Progress in structural engineering and materials, 3(3), 238-245. DOI: [10.1002/pse.79](https://doi.org/10.1002/pse.79).
- Lam, F. (2011). Size effect of bending strength in glulam beams. In *Proceedings Meeting* (Vol. 44).
- Langan, P., Petridis, L., O'Neill, H. M., Pingali, S. V., Foston, M., Nishiyama, Y., & Davison, B. H. (2014). Common processes drive the thermochemical pretreatment of lignocellulosic biomass. *Green Chemistry*, 16(1), 63-68. DOI: [10.1039/c3gc41962b](https://doi.org/10.1039/c3gc41962b).

- Lange, D., Boström, L., Schmid, J., & Albrektsson, J. (2015). The reduced cross section method applied to glulam timber exposed to non-standard fire curves. *Fire technology*, 51(6), 1311-1340. DOI: [10.1007/s10694-015-0485-y](https://doi.org/10.1007/s10694-015-0485-y).
- Le Floch, A., Jourdes, M., & Teissedre, P. L. (2015). Polysaccharides and lignin from oak wood used in cooperage: Composition, interest, assays: A review. *Carbohydrate Research*, 417, 94-102. DOI: [10.1016/j.carres.2015.07.003](https://doi.org/10.1016/j.carres.2015.07.003).
- Leggate, W., McGavin, R. L., Outhwaite, A., Dorries, J., Robinson, R., Kumar, C., & Knackstedt, M. (2021). The influence of mechanical surface preparation method, adhesive type, and curing temperature on the bonding of Darwin stringybark. *BioResources*, 16(1), 302.
- Leszczyńska, A., Stafin, K., Pagacz, J., Mičušík, M., Omastova, M., Hebda, E., & Pielichowski, K. (2018). The effect of surface modification of microfibrillated cellulose (MFC) by acid chlorides on the structural and thermomechanical properties of biopolyamide 4.10 nanocomposites. *Industrial Crops and Products*, 116, 97-108.
- Leur, P. H. E., & Twilt, L. (1999, June). Thermal Exposure in Fire Resistance Furnaces. In *Proceedings of 6 th IAFSS conference held in Poitiers*.
- Li, L., Chen, Z., Lu, J., Wei, M., Huang, Y., & Jiang, P. (2021). Combustion behavior and thermal degradation properties of wood impregnated with intumescent biomass flame retardants: Phytic acid, hydrolyzed collagen, and glycerol. *ACS Omega*, 6(5), 3921-3930.
- Lignau (21.5.2026) Glulam oak beam. [Online]: www.lignaushop.de.
- Lin, C. F., Karlsson, O., Martinka, J., Rantuch, P., Garskaite, E., Mantanis, G. I., & Sandberg, D. (2021). Approaching highly leaching-resistant fire-retardant wood by in situ polymerization with melamine formaldehyde resin. *ACS Omega*, 6(19), 12733-12745.
- Lisperguer, J., Droguett, C., Ruf, B., & Nuñez, M. (2005). Differential scanning calorimetry and dynamic mechanical analysis of phenol-resorcinol-formaldehyde resins. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 50(2), 451-453. DOI: [10.4067/S0717-9707200500020000](https://doi.org/10.4067/S0717-9707200500020000).
- Liven, H., & Abrahamsen, R. (2023, June). Mjøstårnet: the world's tallest timber building. In *World Conference on Timber Engineering (Vol. 1, pp. 19-22)*.
- Liu, H., Li, C., & Sun, X., S. (2017). Soy-oil-based waterborne polyurethane improved wet strength of soy protein adhesives on wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 73: 66-74. DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2016.09.006](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.09.006).
- Liu, J., Yue, K., Xu, L., Wu, J., Chen, Z., Wang, L., & Lu, W. (2020). Bonding performance of melamine-urea-formaldehyde and phenol-resorcinol-formaldehyde adhesive glulams at elevated temperatures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 98, 102500, 1-7. DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2019.102500](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102500).

- Loader, N. J., Robertson, I., & McCarroll, D. (2003). Comparison of stable carbon isotope ratios in the whole wood, cellulose and lignin of oak tree-rings. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 196(3-4), 395-407. DOI: [10.1016/S0031-0182\(03\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00466-8).
- Lodge, T. P., & Hiemenz, P. C. (2020). *Polymer chemistry*. CRC press. ISBN: 978-1-4665-8164-7.
- López-Suevos, F., & Richter, K. (2009). Hydroxymethylated resorcinol (HMR) and novolak-based HMR (n-HMR) primers to enhance bond durability of Eucalyptus globulus glulams. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23(15), 1925-1937. DOI: [10.1163/016942409X12508517390914](https://doi.org/10.1163/016942409X12508517390914).
- Luedtke, J., Amen, C., van Ofen, A., & Lehringer, C. (2015). 1C-PUR-bonded hardwoods for engineered wood products: influence of selected processing parameters. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(2), 167-178. DOI: [10.1007/s00107-014-0875-8](https://doi.org/10.1007/s00107-014-0875-8).
- Lukacevic, M., Lederer, W., & Füssl, J. (2017). A microstructure-based multisurface failure criterion for the description of brittle and ductile failure mechanisms of clear-wood. *Engineering Fracture Mechanics*, 176, 83-99. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2017.02.020](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.02.020).
- Lynd, L. R., Laser, M. S., Bransby, D., Dale, B. E., Davison, B., Hamilton, R., & Wyman, C. E. (2008). How biotech can transform biofuels. *Nature biotechnology*, 26(2), 169-172. DOI: [10.1038/nbt0208-169](https://doi.org/10.1038/nbt0208-169).
- MacLean, J. D. (1941). *Thermal conductivity of wood*. ASHVE Trans., 47, 323-354.
- Madsen, B. (1979). Time-strength relationship for lumber.
- Manbeck, H., B., Blankenhorn, P., R., Janowiak, J., J., Witmer Jr, R., W., Labosky, P., Powers, P., S., & Schram, P., D. (1999). Northern red oak glued-laminated timber bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 4(4), 269-278. DOI: [10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(1999\)4:4\(269\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(1999)4:4(269)).
- Marra, A. A. (1992). *Technology of wood bonding: principles in practice*. Van Nostrand Reinhold.
- Matovič, A. (1993). *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva: určeno pro posluchače lesnické fakulty, obor dřevařský a lesnický*. Vysoká škola zemědělská.
- Merela, M., & Čufar, K. (2013). Mechanical properties of sapwood versus heartwood, in three different oak species. *Drvna Industrija*, 64(4). DOI: [10.5552/drind.2013.1325](https://doi.org/10.5552/drind.2013.1325).
- Merline, D. J., Vukusic, S., & Abdala, A. A. (2013). Melamine formaldehyde: curing studies and reaction mechanism. *Polymer Journal*, 45(4), 413-419. DOI: [10.1038/pj.2012.162](https://doi.org/10.1038/pj.2012.162).
- Menis, A. (2012). Fire resistance of elements of laminated veneer wood (LVL) and cross-glued wood (XLAM).

- Mittal, K., L., Pizzi, A. (ed.). Adhesion promotion techniques: technological applications. CRC press, 1999.
- Mittal, K., L. (ed.). Progress in adhesion and adhesives. John Wiley & Sons, 2015. ISBN: 978-1-119-16219-3.
- Modest, M. F., & Mazumder, S. (2021). Radiative heat transfer. Academic press.
- Montaudo, G., Puglisi, C., Scamporrino, E., & Vitalini, D. (1984). Mechanism of thermal degradation of polyurethanes. Effect of ammonium polyphosphate. *Macromolecules*, 17(8), 1605-1614.
- Moore, W. R., & Donnelly, E. (1963). Thermal degradation of melamine-formaldehyde resins. *Journal of applied Chemistry*, 13(12), 537-543.
- Moreira, T. A., Colmanetti, A. R. A., & Tibirica, C. B. (2019). Heat transfer coefficient: a review of measurement techniques. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(6), 264.
- Morena, A. G., & Tzanov, T. (2022). Antibacterial lignin-based nanoparticles and their use in composite materials. *Nanoscale advances*, 4(21), 4447-4469. DOI: [10.1039/D2NA00423B](https://doi.org/10.1039/D2NA00423B).
- Morin-Bernard, A., Blanchet, P., Dagenais, C., & Achim, A. (2020). Use of northern hardwoods in glued-laminated timber: A study of bondline shear strength and resistance to moisture. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(5), 891-903. DOI: [10.1007/s00107-020-01572-3](https://doi.org/10.1007/s00107-020-01572-3).
- Mullerova, J. (2018). Definition of fire process. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM, 18(5.2), 293-300. DOI: [10.5593/sgem2018/5.2/S20.039](https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.2/S20.039).
- Na, B., Lu, X., Pizzi, A., & Epinal, F. (2014). Creep and temperature-dependent creep of one component polyurethane adhesives for green wood gluing. *Wood Research*, 59(2), 265-272.
- Na, J., Fan, Y., Tan, W., Guo, S., & Mu, W. (2018). Mechanical behavior of polyurethane adhesive bonded joints as a function of temperature and humidity. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 32(5), 457-472. DOI: [10.1080/01694243.2017.1363141](https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1363141).
- Naterer, G. F. (2021). Advanced heat transfer. CRC Press. DOI: [10.1201/9781003206125](https://doi.org/10.1201/9781003206125).
- Nearn, W. T. (1965). Wood-adhesive interface relations. Off. Dig., Fed. Soc. *Paint Technol*, 37, 720-733.
- Nearn, W. T. (1974). *Application of the ultrastructure concept in industrial wood products research*.
- Netzsch Analyzing & Testing. (20.3.2026) UF: močovinoformaldehydová pryskyřice-vzorec. [Online]: <https://analyzing-testing.netzsch.com/>.

- Netzsch Analyzing & Testing. (15.3.2026) Melamin-formaldehydové pryskyřice-vzorec. [Online]: <https://analyzing-testing.netzsch.com>.
- Netzsch Analyzing & Testing. (1.3.2026) Fenolformaldehydové pryskyřice-vzorec. [Online]: <https://canov.jergym.cz/polymery/polykond/novolak.html>.
- Nimz, H., H. (1983). *Wood adhesives chemistry and technology*. Marcel Dekker.
- Nocetti, M., Brancheriau, L., Bacher, M., Brunetti, M., & Crivellaro, A. (2013). Relationship between local and global modulus of elasticity in bending and its consequence on structural timber grading. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(3), 297-308. DOI [10.1007/s00107-013-0682-7](https://doi.org/10.1007/s00107-013-0682-7).
- Nogueira, R. D. S., Moritani, F. Y., Christoforo, A. L., Monteiro, S. N., de Azevedo, A. R. G., Dos Santos, H. F., & Lahr, F. A. R. (2024). Influence of Test Method on the Determination of Tensile Strength Perpendicular to Grain of Timber for Civil Construction. *Materials*, 17(18), 4506. DOI: [10.3390/ma17184506](https://doi.org/10.3390/ma17184506).
- Nussbaum, R. M., & Sterley, M. (2002). The effect of wood extractive content on glue adhesion and surface wettability of wood. *Wood and Fiber Science*, 34(1), 57-71.
- Nussbaum, R. M. (1999). Natural surface inactivation of Scots pine and Norway spruce evaluated by contact angle measurements. *European Journal of Wood and Wood Products*, 57(6), 419-424. DOI: [10.1007/s001070050067](https://doi.org/10.1007/s001070050067).
- Nylund, J., Sundberg, K., Shen, Q., & Rosenholm, J. B. (1998). Determination of surface energy and wettability of wood resins. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 133(3), 261-268. DOI: [10.1016/S0927-7757\(97\)00209-4](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(97)00209-4).
- Odrásková, M., Zahoranová, A., Tiňo, R., & Černák, M. (2008). Plasma activation of wood surface by diffuse coplanar surface barrier discharge. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 28(2), 203-211. DOI: [10.1007/s11090-007-9117-8](https://doi.org/10.1007/s11090-007-9117-8).
- O'Dwyer, M. H. (1939). The hemicelluloses of the wood of English oak: The structure of hemicellulose A. *Biochemical Journal*, 33(5), 713.
- Ohnesorge, D., Richter, K., & Becker, G. (2010). Influence of wood properties and bonding parameters on bond durability of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) glulams. *Annals of Forest Science*, 67(6), 601-601. DOI: [10.1051/forest/2010002](https://doi.org/10.1051/forest/2010002).
- Oksanen, T., & Kangas, J. (1999). Strength and fire resistance of connections based on glued-in rods. VTT Technical Research Centre of Finland.
- Osvald, A., Krajčovičová, J., Mitterová, I., & Orémusová, E. (2009). Hodnotenie materiálov a konštrukcii pre potreby protipožiarnej ochrany. Evaluation of materials and construction for the needs of fire protection)(Technical University, Zvolen, 2009).

- Özakin, B., & Gültekin, K. (2025). Synergetic effect of hybrid surface treatment on the mechanical properties of adhesively bonded AA2024-T3 joints. *The Journal of Adhesion*, 101(8), 1033–1060. DOI: [10.1080/00218464.2024.2412714](https://doi.org/10.1080/00218464.2024.2412714).
- Packham, D., E. The mechanical theory of adhesion. In: Handbook of Adhesive Technology, eds. A. Pizzi and K. L. Mittal (2nd ed.), 69–93. New York: Marcel Dekker, 2003. ISBN: 0-8247-0986-1.
- Pagel, H. F., & Luckman, E. R. (1984). A new isocyanate-containing wood adhesive. In: applied polymer symposia. 605 Third ave, New York, NY 10158-0012: John Wiley & Sons INC. p. 191-202.
- Panshin, A.J., & Zueew, C. (1980). Textbook of Wood Technology. McGraw-Hill Book Company, New York, USA. 722pp.
- Papadopoulou, E., & Chrissafis, K. (2011). Thermal study of phenol–formaldehyde resin modified with cashew nut shell liquid. *Thermochimica Acta*, 512(1-2), 105-109. DOI: [10.1016/j.tca.2010.09.008](https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.09.008).
- Papp, E. A., & Csiha, C. (2017). Contact angle as function of surface roughness of different wood species. *Surfaces and Interfaces*, 8, 54-59. DOI: [10.1016/j.surfin.2017.04.009](https://doi.org/10.1016/j.surfin.2017.04.009).
- Park, B. D., & Jeong, H. W. (2011). Hydrolytic stability and crystallinity of cured urea–formaldehyde resin adhesives with different formaldehyde/urea mole ratios. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(6), 524-529. DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2011.05.001](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.05.001).
- Pečenko, R., Knez, N., Hozjan, T., Šejna, J., Cabová, K., & Turk, G. (2024). On the char front temperature of beech (*Fagus sylvatica*). *Wood Science and Technology*, 58(4), 1535-1553. DOI: [10.1007/s00226-024-01574-x](https://doi.org/10.1007/s00226-024-01574-x).
- Pereira, H., Graça, J., & Rodrigues, J. C. (2003). Wood chemistry in relation to quality. *Wood quality and its Biological Basis*, 3, 53-83.
- Perković, N., & Rajčić, V. (2022). Mechanical and fire performance of innovative hollow glue-laminated timber beams. *Polymers*, 14(16), 3381. DOI: [10.3390/polym14163381](https://doi.org/10.3390/polym14163381).
- Pizzi, A., & Adhesive, W. (1983). *Chemistry and technology*. New York: Marcell Deckker.
- Pizzi, A., & Mittal, K., L. (2003). *Urea-formaldehyde adhesives. Handbook of adhesive technology*, 2.
- Pizzi, A., & Mittal, K., L. (2011). *Wood adhesives*. CRC Press. ISBN-13: 978-9-00-419092-4.
- Pizzi, A., & Mittal, K. L. (Eds.). (2017). *Handbook of adhesive technology*. CRC press. ISBN-13: 978-1-14987-3644-2 (Hardback)
- Pocius, A. V. (2021). *Adhesion and adhesives technology: an introduction*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

- Podgorski, L., Chevet, B., Onic, L., & Merlin, A. (2000). Modification of wood wettability by plasma and corona treatments. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20(2), 103-111. DOI: [10.1016/S0143-7496\(99\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(99)00043-3).
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., & Babiak, M. (1993). *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Príroda.
- Qiao, L., Easteal, A. J., Bolt, C. J., Coveny, P. K., & Franich, R. A. (2000). Thermomechanical analysis and performance tests of some EPI wood adhesives. *Pigment & Resin Technology*. DOI: [10.1108/03699420010339371](https://doi.org/10.1108/03699420010339371).
- Qin, R., Zhou, A., Chow, C. L., Lau, D. (2021). Structural performance and charring of loaded wood under fire. *Engineering Structures*, 228, 111491. DOI: [10.1016/j.engstruct.2020.111491](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111491).
- Radovic, B., Wiegand, T. Oberflächenqualität von Konstruktionsvollholz KVH®.
- Rafsanjani, A., Stiefel, M., Jefimovs, K., Mokso, R., Derome, D., & Carmeliet, J. (2014). Hygroscopic swelling and shrinkage of latewood cell wall micropillars reveal ultrastructural anisotropy. *Journal of the Royal Society Interface*, 11(95), 20140126. DOI: [10.1098/rsif.2014.0126](https://doi.org/10.1098/rsif.2014.0126)
- Rehn, P., Wolkenhauer, A., Bente, M., Förster, S., & Viöl, W. (2003). Wood surface modification in dielectric barrier discharges at atmospheric pressure. *Surface and Coating Technology*, 174, 515-518. DOI: [10.1016/S0257-8972\(03\)00372-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00372-4).
- Ren, D. (2010). *Moisture-cure polyurethane wood adhesives: wood/adhesive interactions and weather durability*. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Richter, K., Pizzi, A., & Despres, A. (2006). Thermal stability of structural one-component polyurethane adhesives for wood—structure-property relationship. *Journal of Applied Polymer Science*, 102(6), 5698-5707. DOI: [10.1002/app.25084](https://doi.org/10.1002/app.25084).
- Roberts, A. F. (1971). The heat of reaction during the pyrolysis of wood. *Combustion and Flame*, 17(1), 79-86.
- Romano, A., Rosato, A., Sisti, L., Zanaroli, G., Asadauskas, S. J., Nemaniutė, P., & Totaro, G. (2024). Enzyme-catalyzed polyurethane adhesive degradation. *Reaction Chemistry & Engineering*, 9(12), 3133-3145. DOI: [10.1039/D4RE00253A](https://doi.org/10.1039/D4RE00253A).
- Ross, R. J. (2010). Wood handbook: wood as an engineering material. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010: 509 p. 1 v., 190.
- Rowell, R., M. (2005). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC Press. ISBN-13: 978-1-4398-5381-8.

- RSBP spol. s r.o. (21.03.2026). Požární ochrana. [Online]: <https://www.rsbp.cz/pozarni-ochrana>.
- Rusakov, D., Sokolova, E., Varankina, G., & Chubinsky, A. (2020, October). Research of strength of gluing of wood. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 574, No. 1, p. 012070). IOP Publishing. DOI: [10.1088/1755-1315/574/1/012070](https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012070).
- Sahula, L., Šedivka, P., Zachara, T., & Borůvka, V. (2023). The effect of chemical modification of the surface of the glued surface on the strength of the structural joint of oak wood. *Central European Forestry Journal*, 69(2), 120-125. DOI: [10.2478/forj-2023-0009](https://doi.org/10.2478/forj-2023-0009).
- Sakata, I., Morita, M., Tsuruta, N., & Morita, K. (1993). Activation of wood surface by corona treatment to improve adhesive bonding. *Journal of Applied Polymer Science*, 49(7), 1251-1258. DOI: [10.1002/app.1993.070490714](https://doi.org/10.1002/app.1993.070490714).
- Sandberg, D. (2016). Additives in wood products—today and future development. In *Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-based Bioproducts* (pp. 105-172). Springer, Singapore. DOI: [10.1007/978-981-10-0655-5_4](https://doi.org/10.1007/978-981-10-0655-5_4).
- Santos, J. A., Carvalho, J. P., & Santos, J. (2012). Oak wood. Oak: Ecology, Types and Management, 119-150. ISBN: 978-1-61942-492-0.
- Selbo, M.L., 1975. Adhesive bonding of wood, Technical Bulletin No. 1512. USDA Forest Products Laboratory, Madison, WI.
- Seregi, B. L., Ficzer, P., & Zsoldos, G. (2026). Investigation of Polymer Adhesion of Materials in Multimaterial FFF Process. *Polymers*, 18(7), 805, 1-29. DOI: [10.3390/polym18070805](https://doi.org/10.3390/polym18070805).
- Shafizadeh, F. (1982). Chemistry of pyrolysis and combustion of wood. *Progress in biomass conversion*, 3, 51-76.
- Shedlauskas, J., P., Manbeck, H., B., Janowiak, J., J., Hernandez, R., Moody, R., C., Labosky Jr, P., & Blankenhorn, P., R. (1996). Efficient use of red oak for glued-laminated beams. *Transactions of the ASAE*, 39(1), 203-209. DOI: [10.13031/2013.27499](https://doi.org/10.13031/2013.27499).
- Schaffer, E. L. (1971). *Elevated temperature effect on the longitudinal mechanical properties of wood*. The University of Wisconsin-Madison.
- Schaffer, E. L. (1984). Structural fire design: Wood (Vol. 450). Forest Products Laboratory.
- Schaffer, E. L. (1986). Strength validation and fire endurance of glued-laminated timber beams (Vol. 467). US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Schmid, J., König, J., & Köhler, J. (2010). Fire-exposed cross-laminated timber—modelling and tests. In World Conference on Timber Engineering. *Structural Engineering International*, 22(4), 514-522. DOI: [10.2749/101686612X13363929517578](https://doi.org/10.2749/101686612X13363929517578).

- Schmidt, M., Glos, P., & Wegener, G. (2010). Verklebung von Buchenholz für tragende Holzbauteile. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68(1), 43-57. DOI: [10.1007/s00107-009-0382-5](https://doi.org/10.1007/s00107-009-0382-5).
- Shi, S. Q., & Gardner, D. J. (2001). Dynamic adhesive wettability of wood. *Wood and Fiber Science*, 58-68.
- Schmid, J., Just, A., Klippel, M., & Fragiaco, M. (2015). The reduced cross-section method for evaluation of the fire resistance of timber members: discussion and determination of the zero-strength layer. *Fire Technology*, 51(6), 1285-1309. DOI: [10.1007/s10694-014-0421-6](https://doi.org/10.1007/s10694-014-0421-6).
- Schmid, J., Klippel, M., Just, A., & Frangi, A. (2014). Review and analysis of fire resistance tests of timber members in bending, tension and compression with respect to the Reduced Cross-Section Method. *Fire Safety Journal*, 68, 81-99. DOI: [10.1016/j.firesaf.2014.05.006](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.05.006).
- Schmid, J., König, J., & Just, A. (2012). The reduced cross-section method for the design of timber structures exposed to fire-background, limitations and new developments. *Structural engineering international*, 22(4), 514-522. DOI: [10.2749/101686612X13363929517578](https://doi.org/10.2749/101686612X13363929517578).
- Schnabl, S., & Turk, G. (2006, September). Numerical modelling of charring in timber beams exposed to fire. In Proceedings of the Eighth International Conference on Computational Structures Technology, Las Palmas de Gran Canaria, Spain (pp. 12-15).
- Siimer, K., Kaljuvee, T., Christjanson, P., & Lasn, I. (2006). Curing of urea-formaldehyde resins on a wood substrate. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 84(1), 71-77. DOI: [10.1007/s10973-005-7185-7](https://doi.org/10.1007/s10973-005-7185-7).
- Sikora, A., Kačík, F., Gaff, M., Vondrová, V., Bubeníková, T., & Kubovský, I. (2018). Impact of thermal modification on color and chemical changes of spruce and oak wood. *Journal of Wood Science*, 64(4), 406-416. DOI: [10.1007/s10086-018-1721-0](https://doi.org/10.1007/s10086-018-1721-0).
- Sixta, H. (2006). *Handbook of Pulp*, Volume 2., Wiley Inc. ISBN: 3-527-30997-7.
- Sjöström, E. (1993). Front Matter, in: Wood Chemistry (Second Edition). Academic Press, San Diego, p. iii. DOI: [10.1016/B978-0-08-092589-9.50001-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092589-9.50001-2)
- Sjöström, E., & Alén, R. (2013). *Analytical methods in wood chemistry, pulping, and papermaking*. Springer Science & Business Media.
- Sjöström, J., & Eilks, I. (2020). The Bildung theory-From von Humboldt to Klafki and beyond. In Science education in theory and practice: An introductory guide to learning theory (pp. 55-67). Cham: Springer International Publishing. DOI: [10.1007/978-3-030-43620-9_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-43620-9_33).
- Solli, K. H. (1996, August). Determination of modulus of elasticity in bending according to EN 408. In Proceedings of the CIB-W18 Meeting (pp. 26-29).
- Solli, K. H. (2000, July). Modulus of elasticity—local or global values. In Proceedings of the 6th World Conference on Timber Engineering, 31st July–3rd August, Whistler, Canada.

- Somani, K. P., Kansara, S. S., Patel, N. K., Rakshit, A. K. (2003). Castor oil based polyurethane adhesives for wood-to-wood bonding. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23(4), 269-275. DOI: [10.1016/S0143-7496\(03\)00044-7](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(03)00044-7).
- Söğütü, C. (2017). Determination of the effect of surface roughness on the bonding strength of wooden materials. *BioResources*, 12 (1), 1417-1429. DOI: [10.15376/biores.12.1.1417-1429](https://doi.org/10.15376/biores.12.1.1417-1429).
- Son, Jungil; TZE, William TY; GARDNER, Douglas J. Thermal behavior of hydroxymethylated resorcinol (HMR)-treated maple veneer. *Wood and fiber science*, 2005, 37.2: 220-231.
- Sterley, M. (2004). Green gluing of wood (Doctoral dissertation, Bygghvetenskap).
- Stevanovic, T. (2016). Chemical composition and properties of wood (pp. 49-106). Scrivener Publishing, Beverly, MA.
- Stora Enso, 2012. Solid construction timber brochure. <https://www.google.com/search?q=dub>.
- Stockist. (30.4.2026) Základní informace o dřevě. [Online]:
- Strobech, C. (1990). Polyurethane adhesives. *Construction and Building Materials*, 4(4), 214-217. DOI: [10.1016/0950-0618\(90\)90042-Y](https://doi.org/10.1016/0950-0618(90)90042-Y).
- Sultan, M. A. (2006). Fire resistance furnace temperature measurements: plate thermometers vs shielded thermocouples. *Fire technology*, 42(3), 253-267. DOI: [10.1007/s10694-006-8431-7](https://doi.org/10.1007/s10694-006-8431-7).
- Sultan, M. A. (2010). Comparisons of temperature and heat flux in furnaces controlled by. *Journal of ASTM International*, 7(1), 44-62. DOI: [10.1520/JAI102334](https://doi.org/10.1520/JAI102334).
- Sun, B., C., Hawke, R., N., Gale, M., R. (1994). Effect of polyisocyanate level on physical properties of wood fiber composite materials. *Forest Products Journal*, 44(4), 53.
- Sun, R. C., & Sun, X. F. (2002). Fractional and structural characterization of hemicelluloses isolated by alkali and alkaline peroxide from barley straw. *Carbohydrate Polymers*, 49(4), 415-423.
- Szycher, M. (ed.). Szycher's handbook of polyurethanes. CRC press, 1999.
- Šejna, J., Cábová, K., Pečenko, R., Hozjan, T., Křišťanová, M., & Wald, F. (2022). Validation of a Virtual Room Corner Fire Test With Spruce Members and the Development of the Char Layer. In *Proceedings of the 12th International Conference on Structures in Fire Hong Kong* (pp. 1093-1102). Hong Kong, China: Hong Kong Polytechnic University.
- Šejna, J., Štraus, D., Křišťanová, M., Rušarová, S., Cábová, K., Pečenko, R., & Wald, F. (2025). Experimental data of charring of timber elements under natural fire: Full-scale fire testing

- of timber structures using the room corner test method. Data in Brief, 112410. DOI: [10.1016/j.dib.2025.112410](https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.112410).
- Špilák, D., Majlingová, A., Kačíková, D., & Tischler, P. (2022). Determining the charred layer of wooden beams with finite element analysis based on enthalpy approach. *Buildings*, 12(7), 875. <https://doi.org/10.3390/buildings12070875>.
- Šuhajdová, E., Schmid, P., Novotný, M., Pěňčík, J., Šuhajda, K., & Uhlík, O. (2023). Experimental research on hybrid hardwood glue-laminated beams. *Buildings*, 13(4), 1055. DOI: [10.3390/buildings13041055](https://doi.org/10.3390/buildings13041055).
- Tannert, T., & Moudgil, M. (2017). Structural design, approval, and monitoring of a UBC tall wood building. In *Structures Congress 2017* (pp. 541-547). DOI: [10.1061/9780784480410.045](https://doi.org/10.1061/9780784480410.045).
- Thormark, C. (2006). The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. *Building and environment*, 41(8), 1019-1026. DOI: [10.1016/j.buildenv.2005.04.026](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.026).
- Thunman, H., & Leckner, B. (2002). Thermal conductivity of wood—models for different stages of combustion. *Biomass and Bioenergy*, 23(1), 47-54. DOI: [10.1016/S0961-9534\(02\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00031-4).
- Thurston, R. H. (1881). On the effect of prolonged stress upon the strength and elasticity of pine timber. *Journal of the Franklin Institute*, 112(3), 161-169.
- Todaro, L., Rita, A., Moretti, N., Cuccui, I., & Pellerano, A. (2015). Assessment of thermo-treated bonded wood performance: comparisons among Norway Spruce, Common Ash, and Turkey Oak. *BioResources*, 10(1), 772-781.
- Tran, V. D., Oudjene, M., Méausoone, P. J., Pizzi, A., Gautier, M., & Roy, K. (2014, August). Experimental study of multi-layered beams made of beech timber glued with different adhesives. In *World Conference on Timber Engineering (WCTE)* (pp. 10-14).
- Tran, V., D., Oudjene, M., & Méausoone, P., J. (2016). Performance of oak timber in glued structural elements and joints.
- Troughton, G. E., & Chow, S. Z. (1971). Migration of fatty acids to white spruce veneer surface during drying: relevance to theories of inactivation. *Wood Sci*, 3(3), 129-133.
- Tymyk, D., Bekhta, P., & Sedliačik, J. (2013). The effect of chemical modification of wood veneer surfaces on their bondability. *Annals of Warsaw University of Life Sciences SGGW Forestry and Wood Technology*, 81, 269-273.
- Ülker, O. (2016). Wood adhesives and bonding theory. *Adhesives—applications and properties*, 271-288. DOI: [10.5772/65759](https://doi.org/10.5772/65759).

- Uysal, B., & Özçifçi, A. (2006). Bond strength and durability behavior of polyurethane-based Desmodur-VTKA adhesives used for building materials after being exposed to water-resistance test. *Journal of applied polymer science*, 100(5), 3943-3947. DOI: [10.1002/app.22899](https://doi.org/10.1002/app.22899).
- Uzcategui, M. C., Seale, R. D., & França, F. N. (2020). Physical and mechanical properties of clear wood from red oak and white oak. *BioResources*, 15(3), 4960.
- Uzelac G., I., Boko, I., Torić, N., & Lovrić V., J. (2020). Application of hardwood for glued laminated timber in Europe. *Građevinar*, 72(07), 607-616. DOI: [10.14256/JCE.2741.2019](https://doi.org/10.14256/JCE.2741.2019).
- Van de Kuilen, J. W. G., Koppenens, B., Gard, W. F., & Antonelli, V. Mechanical-physical properties of steam bent timber. In 8th–International Scientific Conference on Hardwood Processing (p. 257).
- Vaněrek, J., Bálková, R., Běťák, A., & Laciková, P. (2026). Temperature resistance of spruce joints bonded with four adhesives and correlation with thermal behaviour of wood and thin adhesive films. *European Journal of Wood and Wood Products*, 84(2), 49. DOI: [10.1007/s00107-026-02408-2](https://doi.org/10.1007/s00107-026-02408-2).
- Vazquez, G., Antorrena, G., González, J., & Mayor, J. (1995). Lignin-phenol-formaldehyde adhesives for exterior grade plywoods. *Bioresource Technology*, 51(2-3), 187-192. DOI: [10.1016/0960-8524\(94\)00120-P](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)00120-P).
- Verma, N., & Salem, O. (2018). Fire performance of screwed built-up glulam box-section beams.
- Veytsman, B. A., & Cosgrove, D. J. (1998). A model of cell wall expansion based on thermodynamics of polymer networks. *Biophysical journal*, 75(5), 2240-2250. Vick, Charles B. Coupling agent improves durability of PRF bonds to CCA-treated southern pine. *Forest Products Journal*, 1995, 45: 78-78. DOI: [10.1016/S0006-3495\(98\)77668-4](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(98)77668-4).
- Viana, G. M. S. O., Costa, M., Banea, M. D., & da Silva, L. F. (2017). A review on the temperature and moisture degradation of adhesive joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 231(5), 488-501. DOI: [10.1177/1464420716671503](https://doi.org/10.1177/1464420716671503).
- Vick, C. B. (1999). Adhesive bonding of wood materials. *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL; GTR-113: Pages 9.1-9.24, 113.
- Vick, C. B., Christiansen, A. W., & Okkonen, E. A. (1998). Reactivity of hydroxymethylated resorcinol coupling agent as it affects durability of epoxy bonds to Douglas-fir. *Wood and Fiber Science*, 312-322.
- Vick, C. B., & Okkonen, E. A. (1998). Strength and durability of one-part polyurethane adhesive bonds to wood. *Forest Products Journal*, 48 (11/12), 71-76.

- Vick, C. B., & Okkonen, E. A. (2000). Durability of one-part polyurethane bonds to wood improved by HMR coupling agent. *Forest Products Journal*, 50(10), 69-75.
- Vida, C., Lukacevic, M., Pech, S., & Füssl, J. (2025). Strength distribution predictions of glued laminated timber beams: Influence of size, load configuration, and strength class described by the finite weakest-link theory. *Construction and Building Materials*, 458, 139514, 1-16. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.139514](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139514).
- Wagenführ, R. (2006): Holzatlas. 6.Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl HanserVerlag, 816 S.
- Wald, F. (2005). *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Vydavatelství ČVUT.
- Wall, S. (2021). CE Marking of Construction Products—Evolution of the European Approach to Harmonisation of Construction Products in the Light of Environmental Sustainability Aspects. *Sustainability*, 13(11), 6396.
- Wang, X., Hagman, O., Sundqvist, B., Ormarsson, S., Wan, H., & Niemz, P. (2015). Impact of cold temperatures on the shear strength of Norway spruce joints glued with different adhesives. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(2), 225-233. DOI: [10.1007/s00107-015-0882-4](https://doi.org/10.1007/s00107-015-0882-4).
- Wang, X. A., Björnberg, J., Hagman, O., Ahmed, S. A., Wan, H., & Niemz, P. (2016). Effect of low temperatures on the block shear strength of norway spruce glulam joints. *BioResources*, 11(4), 9638-9648. DOI: [10.15376/BIORES.11.4.9638-9648](https://doi.org/10.15376/BIORES.11.4.9638-9648).
- Wang, J., Wu, H., Liu, R., Long, L., Xu, J., Chen, M., & Qiu, H. (2019). Preparation of a fast water-based UV cured polyurethane-acrylate wood coating and the effect of coating amount on the surface properties of Oak (*Quercus alba* L.). *Polymers*, 11(9), 1414, 1-13. DOI: [10.3390/polym11091414](https://doi.org/10.3390/polym11091414).
- Wålinder, M. (2000). Wetting phenomena on wood: factors influencing measurements of wood wettability. KTH-Royal Institute of Technology, Department of Manufacturing Systems, Wood Technology and Processing, Stockholm, Sweden.
- Werther, N. (2016). External and internal factors influencing the charring of timber—an experimental study with respect to natural fires and moisture conditions. In *Structures in fire-SIF'2016* (pp. 650-658).
- Widmann, R., Beikircher, W., & Richter, K. (2007). Bending and tension strength of finger-jointed boards made of thermally treated beech. In *COST International Workshop Proceedings* (pp. 39-45).
- Winandy, J.E., & Rowell, R.M., Chemistry of wood strength. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, ed. R.M. Rowell, CRC press: Boca Raton, Florida, pp. 303–347, 2005.

- Wolkenhauer, A., Miltz, H., & Viöl, W. (2008). Increased PVA-glue adhesion on particle board and fibre board by plasma treatment. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 66(2), 143-145. DOI: [10.1007/s00107-007-0217-1](https://doi.org/10.1007/s00107-007-0217-1).
- Wood, L. W. (1951). Relation of strength of wood to duration of load (No. 1916). US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laborator
- Woods, G. (1990). The ICI polyurethanes book. (No Title).
- Wu, S. (2017). Polymer interface and adhesion. Routledge. DOI: [10.1201/9780203742860](https://doi.org/10.1201/9780203742860).
- Wu, Q., Huo, L., Zhu, E., Niu, S., & Wang, H. (2021). An investigation of the duration of load of structural timber and the clear wood. *Forests*, 12(9), 1148. DOI: [10.3390/f12091148](https://doi.org/10.3390/f12091148).
- Wyman, C. E. (2007). What is (and is not) vital to advancing cellulosic ethanol. *TRENDS in Biotechnology*, 25(4), 153-157. DOI: [10.1016/j.tibtech.2007.02.009](https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.02.009).
- Xu, J., Zhang, Y., Shen, Y., Li, C., Wang, Y., Ma, Z., & Sun, W. (2019). New perspective on wood thermal modification: Relevance between the evolution of chemical structure and physical-mechanical properties, and online analysis of release of VOCs. *Polymers*, 11(7), 1145. DOI: [10.3390/polym11071145](https://doi.org/10.3390/polym11071145).
- Xu, W., Li, Y., & Huang, B. (2021). Study on the application of Oak in wood structure building. *Advances in Applied Sciences*, 6(3), 59-64. DOI: [10.11648/J.AAS.20210603.14](https://doi.org/10.11648/J.AAS.20210603.14).
- Yaman, S. (2004). Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy conversion and management*, 45(5), 651-671. DOI: [10.1016/S0196-8904\(03\)00177-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00177-8).
- Yang, B. Z., Seale, R. D., Shmulsky, R., Dahlen, J., & Wang, X. (2015). Comparison of nondestructive testing methods for evaluating No. 2 southern pine lumber: Part A, modulus of elasticity. *Wood and Fiber Science*, 47(4), 375-384.
- Yasir, M., Macilwraith, A., O’Ceallaigh, C., & Ruane, K. (2023). Effect of protective cladding on the fire performance of vertically loaded cross-laminated timber (CLT) wall panels. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 8(4), 199-208. DOI: [10.1080/24705314.2023.2189683](https://doi.org/10.1080/24705314.2023.2189683).
- Yi, Z., Zhang, J., Zhang, S., Gao, Q., Li, J., & Zhang, W. (2016). Synthesis and mechanism of metal-mediated polymerization of phenolic resins. *Polymers*, 8(5), 159. DOI: [10.3390/polym8050159](https://doi.org/10.3390/polym8050159).
- Yildiz, S., Gezer, E. D., & Yildiz, U. C. (2006). Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. *Building and Environment*, 41(12), 1762-1766. DOI: [10.1016/j.buildenv.2005.07.017](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.017).
- Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011). Introduction to polymers. CRC Press. ISBN-13: 978-0-8493-3929-5.

- Young, T. (1805). III. An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical transactions of the royal society of London*, (95), 65-87. DOI: [10.1098/rstl.1805.0005](https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005).
- Zavarin, E. (1984). Activation of wood surface and nonconventional bonding. DOI: [10.1021/ba-1984-0207.ch010](https://doi.org/10.1021/ba-1984-0207.ch010)
- Zawadzki, J., Gawron, J., Antczak, A., Klosinska, T., & Radomski, A. (2016). The influence of heat treatment on the physico-chemical properties of pinewood (*Pinus sylvestris* L.). *Drewno*, 59 (196), 49-57. DOI: [10.12841/wood.1644-3985.135.04](https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.135.04).
- Zelinka, S. L., Sullivan, K., Pei, S., Ottum, N., Bechle, N. J., Rammer, D. R., & Hasburgh, L. E. (2019). Small scale tests on the performance of adhesives used in cross laminated timber (CLT) at elevated temperatures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 95, 102436, 1-8. DOI: [10.1016/j.ijadhadh.2019.102436](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102436).
- Zelinka, S., Pei, S., Bechle, N., Sullivan, K., Ottum, N., Rammer, D., & Hasburgh, L. E. (2018). Performance of wood adhesive for cross laminated timber under elevated temperatures. In *Proceedings, WCTE 2018-world conference on timber engineering*. Seoul, Republic of Korea: Korean Institute of Forest Science. 7 p.
- Zickler, G. A., Schöberl, T., & Paris, O. (2006). Mechanical properties of pyrolysed wood: a nanoindentation study. *Philosophical Magazine*, 86(10), 1373-1386. DOI: [10.1080/14786430500431390](https://doi.org/10.1080/14786430500431390).
- Zhang, Y., Xia, Z., Huang, H., & Chen, H. (2009). Thermal degradation of polyurethane based on IPDI. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 84(1), 89-94. DOI: [10.1016/j.jaap.2008.11.008](https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.008).
- Zhang, J., Xu, Q. F., Xu, Y. X., Wang, B., & Shang, J. X. (2012). A numerical study on fire endurance of wood beams exposed to three-side fire. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 13(7), 491-505. DOI: [10.1631/jzus.A1200022](https://doi.org/10.1631/jzus.A1200022).
- Zhang, C., Yu, L., Ferdosian, F., Vijayaraghavan, S., Mesnager, J., Jollet, V., & Zhao, B. (2018). Behavior of water/pMDI emulsion adhesive on bonding wood substrates with varied surface properties. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(48), 16318-16326. DOI: [10.1021/acs.iecr.8b03485](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b03485).
- Zhang, X., Li, L., & Xu, F. (2022). Chemical characteristics of wood cell wall with an emphasis on ultrastructure: A mini-review. *Forests*, 13(3), 439, 1-22. DOI: [10.3390/f13030439](https://doi.org/10.3390/f13030439).
- Zhao, M., Zhao, E., Zhang, X., & Yue, Q. (2023). Re-Analysis of historical data and model calibration of duration of load effect on structural timber. *Buildings*, 13(8), 2073, 1-19. DOI: [10.3390/buildings13082073](https://doi.org/10.3390/buildings13082073).
- Zhou, X., & Frazier, Ch. E. (2001). Double labeled isocyanate resins for the solid-state NMR detection of urethane linkages to wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 21(3), 259-264. DOI: [10.1016/S0143-7496\(01\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S0143-7496(01)00013-6).

Zorba, T., Papadopoulou, E., Hatjiissaak, A., Paraskevopoulos, K., & Chrissafis, K. (2008). Urea-formaldehyde resins characterized by thermal analysis and FTIR method. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 92(1), 29-33. DOI: [10.1007/s10973-007-8731-2](https://doi.org/10.1007/s10973-007-8731-2).

Seznam příloh

- Příloha č. 1 Technické parametry lepidla PUR2010
- Příloha č. 2 Technické parametry Termosetu PF 31-9005-S 6 Bakelite
- Příloha č. 3 Technické parametry penetračního nátěru
- Příloha č. 4 Popisné statistiky meze pevnosti ve smyku při tahovém namáhání
- Příloha č. 5 Test závislosti hodnot pevnosti testovaného lepeného spoje dřeva dubu
- Příloha č. 6 Popisné statistiky meze pevnosti ve smyku při tahovém namáhání při zvýšených teplotách
- Příloha č. 7 Test závislosti hodnot pevností v tahu testovaného lepeného spoje dřeva dubu při zvýšených teplotách
- Příloha č. 8 Výsledky pevnosti v čtyřbodovém ohybu
- Příloha č. 9 Popisné statistiky meze pevnosti v ohybu lepeného prvku
- Příloha č. 10 Zkušební podmínky v peci podle ČSN EN 1363-1 (2021)
- Příloha č. 11 Teploty testovaných těles
- Příloha č. 12 Průhyb / rychlost průhybu ve středu rozpětí
- Příloha č. 13 První výstup modelu – Redukce průřezu nosného prvku
- Příloha č. 14 Druhý výstup modelu – Rovnicový základ numerického modelu druhého výstupu
- Příloha č. 15 Třetí výstup modelu – Rovnice použité pro predikční výpočet teplotního pole
- Příloha č. 16 Zdrojový kód výpočtu pro Python
- Příloha č. 17 Návrh rozmístění teplotních čidel v nosníku

Příloha č. 1 Technické parametry lepidla PUR2010

Vlastnosti	Standard	Parametr
Polyuretanové lepidlo		PUR 2010
Výrobce		AkzoNobel Adhesives AB, Švédsko
Třída odolnosti	ČSN EN 204	D4
Chemické složení		Izokyanát (61,40 %) + polyol (37,60 %) + katalyzátor (0,10 %) + UV stabilizátor (0,90 %) (hmotnostní procenta)
Počet komponent		1 komponenta
Skupenství		kapalné
Barva		bílá
Optimální nános (na obě lepené plochy)		120 – 200 g.m ⁻²
Viskozita	ČSN EN 12092	6000 – 19000 mPas (Brookfield LVT sp. 4, 12 rpm, 25°C)
Čas zpracovatelnost		15 – 20 min.
Minimální čas vytvrzení (při 20 °C)		60 min.
Objemová hmotnost po vytvrzení (při 23 °C/65 % RH/280 g.m ⁻²)		1160 kg.m ⁻³
Minimální teplota zpracování		+6 °C

Příloha č. 2 Technické parametry Termosetu PF 31-9005-S 6 Bakelite

Vlastnosti	Standard	Parametr
Termoset		Bakelite® PF31-9005-S 6
Výrobce		Bakelite GmbH, Německo
Chemické složení		Epoxidová fenolová pryskyřice ($-\text{CH}_2-(\text{C}_2\text{H}_3\text{O})$)
Skupenství		Částice 1–60 nm
Barva		Černá
Hustota (23°C)	ISO 1183	1620 kg.m ⁻³
Pevnost v tahu (při 5 mm.min ⁻¹)	ISO 527-1/2	50 MPa
Modul pružnosti v tahu (při 1mm/min ⁻¹) (prodloužení _{ε1} 0,05%; _{ε2} 0,25%)	ISO 527-1/2	7500 MPa
Pevnost v tlaku	ISO 604	250 MPa

Příloha č. 3 Technické parametry penetračního nátěru

Vlastnosti	Standard	Parametr
Chemická modifikace		Hydroxid draselný (vodný roztok)
Výrobce		Lach-Ner, s.r.o., Česká republika
Chemický vzorec		KOH · H ₂ O
Koncentrace		2 %
CAS registrační číslo		1310-58-3
Skupenství		kapalné
Barva		bezbarvá
Objemová hmotnost (při 23°C/65 % RH)	ČSN ISO 758	1001 kg.m ⁻³

Příloha č. 4 Popisné statistiky meze pevnosti ve smyku při tahovém namáhání

Efekt	Popisné statistiky: Typ zkoušky Expozice 1 (Klimatizovaný)				
	Typ adhesiva	N	Pevnost ve smyku [MPa] Průměr	Pevnost ve smyku [MPa] Směrodatná odchylka	Pevnost ve smyku [MPa] St. chyba
Celkem		270	12,18067	4,971472	0,302554
Typ adhesiva	1) KESTOPUR 1010	30	9,19533	1,930415	0,352444
Typ adhesiva	2) KESTOPUR 1030	30	7,15033	1,994310	0,364110
Typ adhesiva	3) KESTOPUR G10	30	8,63867	2,679140	0,489142
Typ adhesiva	4) PURBOND HB S309	30	7,65600	2,684647	0,490147
Typ adhesiva	5) PUR 2010	30	17,33300	3,315604	0,605344
Typ adhesiva	6) ICEMA R 145/12	30	13,92100	4,250902	0,776105
Typ adhesiva	7) GRIPPRO GLUE A011 100/30	30	14,70400	2,835257	0,517645
Typ adhesiva	8) LIGNOFEN G/3/D	30	14,19867	3,258614	0,594939
Typ adhesiva	9) KESTOKOL WR6040+Hardener M	30	16,82900	5,113541	0,933601

Efekt	Popisné statistiky: Typ zkoušky Expozice 2 (Máčený)				
	Typ adhesiva	N	Pevnost ve smyku [MPa] Průměr	Pevnost ve smyku [MPa] Směrodatná odchylka	Pevnost ve smyku [MPa] St. chyba
Celkem		270	4,758926	2,945628	0,179265
Typ adhesiva	1) KESTOPUR 1010	30	2,725000	1,342013	0,245017
Typ adhesiva	2) KESTOPUR 1030	30	2,459667	1,103598	0,201488
Typ adhesiva	3) KESTOPUR G10	30	3,344000	1,342570	0,245119
Typ adhesiva	4) PURBOND HB S309	30	2,926000	1,064550	0,194359
Typ adhesiva	5) PUR 2010	30	8,922667	2,412149	0,440396
Typ adhesiva	6) ICEMA R 145/12	30	3,273667	1,987654	0,362894
Typ adhesiva	7) GRIPPRO GLUE A011 100/30	30	7,695667	1,711901	0,312549
Typ adhesiva	8) LIGNOFEN G/3/D	30	4,006000	2,060886	0,376265
Typ adhesiva	9) KESTOKOL WR	30	7,477667	2,217225	0,404808

Efekt	Popisné statistiky: Typ zkoušky Expozice 3 (Vařený)				
	Typ adhesiva	N	Pevnost ve smyku [MPa] Průměr	Pevnost ve smyku [MPa] Směrodatná odchylka	Pevnost ve smyku [MPa] St. chyba
Celkem		270	3,862222	2,768418	0,168481
Typ adhesiva	1) KESTOPUR 1010	30	2,626667	1,354108	0,247225
Typ adhesiva	2) KESTOPUR 1030	30	2,053000	1,518770	0,277288
Typ adhesiva	3) KESTOPUR G10	30	3,045667	1,850660	0,337883
Typ adhesiva	4) PURBOND HB S309	30	2,593333	1,331458	0,243090
Typ adhesiva	5) PUR 2010	30	7,384000	2,482444	0,453230
Typ adhesiva	6) ICEMA R 145/12	30	1,812667	2,258002	0,412253
Typ adhesiva	7) GRIPPRO GLUE A011 100/30	30	6,017667	2,151320	0,392775
Typ adhesiva	8) LIGNOFEN G/3/D	30	2,997000	2,190426	0,399915
Typ adhesiva	9) KESTOKOL WR 040+Hardener M	30	6,230000	2,277956	0,415896

Příloha č. 5 Test závislosti hodnot pevnosti testovaného lepeného spoje dřeva dubu

Závislá: Mez pevnosti ve smyku [MPa] Typ zkoušky Expozice 1 Klimatizovaný	Vícenásobné porovnání p hodnot (oboustr.); Typ zkoušky 1 Klimatizovaný Nezávislá (grupovací) proměnná : Typ adhesiva Kruskal-Wallisův test: H (8, N= 270) =173,0184 p =0,05								
	1) KESTOPUR 1010	2) KESTOPUR 1030	3) KESTOPUR G10	4) PURBOND HB S309	5) PUR 2010	6) ICEMA R 145/12	7) GripPro GLUE A011 100/30	8) LIGNOFEN G/3/D	9) Kestokol WR 6040+Hardener M
1) KESTOPUR 1010		1,000000	1,000000	1,000000	0,000000	0,000553	0,000046	0,000313	0,000000
2) KESTOPUR 1030	1,000000		1,000000	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
3) KESTOPUR G10	1,000000	1,000000		1,000000	0,000000	0,000127	0,000009	0,000069	0,000000
4) PURBOND HB S309	1,000000	1,000000	1,000000		0,000000	0,000001	0,000000	0,000000	0,000000
5) PUR 2010	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000		1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
6) ICEMA R 145/12	0,000553	0,000000	0,000127	0,000001	1,000000		1,000000	1,000000	1,000000
7) GRIPPRO GLUE A011 100/30	0,000046	0,000000	0,000009	0,000000	1,000000	1,000000		1,000000	1,000000
8) LIGNOFEN G/3/D	0,000313	0,000000	0,000069	0,000000	1,000000	1,000000	1,000000		1,000000
9) KESTOKOL WR 6040+HARDENER M	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	

Závislá: Mez pevnosti ve smyku [MPa] Typ zkoušky Expozice 2 Máčený	Vícenásobné porovnání p hodnot (oboustr.); Typ zkoušky 2 Máčený Nezávislá (grupovací) proměnná: Typ adhesiva Kruskal-Wallisův test: H (8, N= 270) =165,8528 p =0,05								
	1) KESTOPUR 1010	2) KESTOPUR 1030	3) KESTOPUR G10	4) PURBOND HB S309	5) PUR 2010	6) ICEMA R 145/12	7) GripPro GLUE A011 100/30	8) LIGNOFEN G/3/D	9) Kestokol WR 6040+Hardener M
1) KESTOPUR 1010		1,000000	1,000000	1,000000	0,000000	1,000000	0,000000	1,000000	0,000000
2) KESTOPUR 1030	1,000000		1,000000	1,000000	0,000000	1,000000	0,000000	0,394999	0,000000
3) KESTOPUR G10	1,000000	1,000000		1,000000	0,000000	1,000000	0,000001	1,000000	0,000005
4) PURBOND HB S309	1,000000	1,000000	1,000000		0,000000	1,000000	0,000000	1,000000	0,000000
5) PUR 2010	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000		0,000000	1,000000	0,000004	1,000000
6) ICEMA R 145/12	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,000000		0,000000	1,000000	0,000000
7) GRIPPRO GLUE A011 100/30	0,000000	0,000000	0,000001	0,000000	1,000000	0,000000		0,000035	1,000000
8) LIGNOFEN G/3/D	1,000000	0,394999	1,000000	1,000000	0,000004	1,000000	0,000035		0,000193
9) KESTOKOL WR 6040+HARDENER M	0,000000	0,000000	0,000005	0,000000	1,000000	0,000000	1,000000	0,000193	

Závislá: Mez pevnosti ve smyku [MPa]) Typ zkoušky Expozice 3 Vařený	Vícenásobné porovnání p hodnot (oboustr.); Typ zkoušky 3 Vařený Nezávislá (grupovací) proměnná: Typ adhesiva Kruskal-Wallisův test: H (8, N= 270) =149,7873 p =0,000								
	1) KESTOPUR 1010	2) KESTOPUR 1030	3) KESTOPUR G10	4) PURBOND HB S309	5) PUR 2010	6) ICEMA R 145/12	7) GripPro GLUE A011 100/30	8) LIGNOFEN G/3/D	9) Kestokol WR 6040+Hardener M
1) KESTOPUR 1010		1,000000	1,000000	1,000000	0,000000	1,000000	0,000062	1,000000	0,000027
2) KESTOPUR 1030	1,000000		1,000000	1,000000	0,000000	1,000000	0,000000	1,000000	0,000000
3) KESTOPUR G10	1,000000	1,000000		1,000000	0,000000	1,000000	0,001492	1,000000	0,000732
4) PURBOND HB S309	1,000000	1,000000	1,000000		0,000000	1,000000	0,000051	1,000000	0,000022
5) PUR 2010	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000		0,000000	0,617839	0,000000	0,948166
6) ICEMA R 145/12	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,000000		0,000000	1,000000	0,000000
7) GRIPPRO GLUE A011 100/30	0,000062	0,000000	0,001492	0,000051	0,617839	0,000000		0,001444	1,000000
8) LIGNOFEN G/3/D	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,000000	1,000000	0,001444		0,000708
9) KESTOKOL WR 6040+HARDENER M	0,000027	0,000000	0,000732	0,000022	0,948166	0,000000	1,000000	0,000708	

Příloha č. 6 Popisné statistiky meze pevnosti ve smyku při tahovém namáhání při zvýšených teplotách

Efekt	Popisné statistiky: Dub lepené PUR2010				
	Teplota [°C]	N	Pevnost ve smyku [MPa] Průměr	Pevnost ve smyku [MPa] Směrodatná odchylka	Pevnost ve smyku [MPa] St. Chyba
Celkem		210	11,00372	5,012989	0,348427
Teplota [°C]	20	30	17,33300	3,315604	0,605344
Teplota [°C]	50	30	14,40931	2,770151	0,514404
Teplota [°C]	70	30	12,74138	2,707600	0,502789
Teplota [°C]	110	30	10,39533	3,110659	0,567926
Teplota [°C]	150	30	10,67233	2,793592	0,510038
Teplota [°C]	200	30	8,65448	1,706884	0,316960
Teplota [°C]	220	30	2,91333	1,717728	0,313613

Efekt	Popisné statistiky: Dub lepené PU2010 + termoset PF31-9005-S6 + modifikace KOH·H ₂ O				
	Teplota [°C]	N	Pevnost ve smyku [MPa] Průměr	Pevnost ve smyku [MPa] Směrodatná odchylka	Pevnost ve smyku [MPa] St. Chyba
Celkem		210	13,67469	4,549366	0,316203
Teplota [°C]	20	30	17,41633	3,615566	0,660109
Teplota [°C]	50	30	16,13300	3,052995	0,557398
Teplota [°C]	70	30	15,24690	2,367891	0,439706
Teplota [°C]	110	30	15,05667	3,278862	0,598635
Teplota [°C]	150	30	13,99143	3,170952	0,599254
Teplota [°C]	200	30	11,73467	2,258574	0,412357
Teplota [°C]	220	30	6,21733	2,701087	0,493149

Příloha č. 7 Test závislosti hodnot pevností v tahu testovaného lepeného spoje dřeva dubu při zvýšených teplotách

Dub lepené PUR2010 Tukeyův HSD test; proměnná Pevnost ve smyku [MPa] Pravděpodobnost: $p = 0,05$ Chyba: meziskup. $PC = 7,0651$, $SV = 200,00$							
Teplota [°C]	{1} 17,333	{2} 14,409	{3} 12,741	{4} 10,395	{5} 10,672	{6} 8,6545	{7} 2,9133
20		0,000493	0,000026	0,000026	0,000026	0,000026	0,000026
50	0,000493		0,202861	0,000026	0,000027	0,000026	0,000026
70	0,000026	0,202861		0,012442	0,044421	0,000026	0,000026
110	0,000026	0,000026	0,012442		0,999668	0,153755	0,000026
150	0,000026	0,000027	0,044421	0,999668		0,054976	0,000026
200	0,000026	0,000026	0,000026	0,153755	0,054976		0,000026
220	0,000026	0,000026	0,000026	0,000026	0,000026	0,000026	

Dub lepené PUR2010 + termoset PF31-9005-S6 + modifikace $KOH \cdot H_2O$ Tukeyův HSD test; proměnná Pevnost ve smyku [MPa] Pravděpodobnost: $p = 0,05$ Chyba: meziskup. $PC = 8,7458$, $SV = 200,00$							
Teplota [°C]	{1} 17,416	{2} 16,133	{3} 15,247	{4} 15,057	{5} 13,991	{6} 11,735	{7} 6,217
20		0,629076	0,072178	0,032804	0,000229	0,000026	0,000026
50	0,629076		0,912228	0,796926	0,084950	0,000026	0,000026
70	0,072178	0,912228		0,999981	0,680898	0,000124	0,000026
110	0,032804	0,796926	0,999981		0,817533	0,000290	0,000026
150	0,000229	0,084950	0,680898	0,817533		0,056726	0,000026
200	0,000026	0,000026	0,000124	0,000290	0,056726		0,000026
220	0,000026	0,000026	0,000026	0,000026	0,000026	0,000026	

Příloha č. 8 Výsledky pevnosti v čtyřbodovém ohybu

Číslo	Dřevina	Fmax [N]	b [mm]	h[mm]	Fx_1[N]	Fx_2[N]	Sx1[mm]	Sx2[mm]	Globální E modul pružnosti v ohybu [N/mm ²]	Pevnost v ohybu [Mpa]
1	Dub lepený	4200,08	41,24	45,74	439,46	1795,52	1,52	5,98	10236,0	62,07
2	Dub lepený	4987,54	40,11	45,11	487,85	2014,44	1,98	4,23	24483,0	77,91
3	Dub lepený	4687,87	40,01	45,12	474,77	1887,53	1,68	6,85	9878,6	73,38
4	Dub lepený	4885,87	40,01	45,03	565,22	2287,44	2,01	8,16	10184,4	76,79
5	Dub lepený	3123,85	39,99	45,02	434,41	1257,41	1,51	3,47	15288,7	49,14
6	Dub lepený	4587,65	41,13	45,57	407,21	1914,54	1,95	4,27	22177,9	68,48
7	Dub lepený	3311,55	39,99	44,98	248,74	911,33	1,12	4,85	6485,2	52,19
8	Dub lepený	3808,52	41,15	45,87	502,11	2014,56	1,98	4,02	24802,2	56,08
9	Dub lepený	3210,41	41,14	45,01	333,21	2051,21	2,01	8,18	9861,5	49,11
10	Dub lepený	2513,42	40,99	44,99	227,41	2041,07	2,01	8,08	10635,0	38,62

Příloha č. 9 Popisné statistiky meze pevnosti v ohybu lepeného prvku

Efekt	Popisné statistiky: Dub lepené PUR2010				
	Varianta	N	Pevnost v ohybu [MPa] Průměr	Pevnost v ohybu [MPa] Směrodatná odchylka	Pevnost v ohybu [MPa] St. Chyba
Celkem		10	60,37731	13,44196	4,250722
Dřevina	Dub lepený	10	60,37731	13,44196	4,250722

Příloha č. 10 Zkušební podmínky v peci podle ČSN EN 1363-1 (2021)

Čas		Teplota v peci														Odchylka d _c			Odchylka od T		Tlak v místě sondy			Teplota		
t [min]	DST1		DST2	DST3	DST4	DST5	DST6	DST7	DST8	DST9	DST10	DST11	DST12	Ø	od - do		skut.	min.	max.	od - do		skut.	okolí			
	T	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51		[%]	[%]	[%]			[°C]	[°C]	[Pa]		[Pa]	[Pa]	[°C]
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]													
0	20	14	15	11	17	16	22	14	16	20	29	24	18	18								38,2	11			
1	349	218	335	117	346	248	372	214	307	250	268	312	202	266								38,2	11			
2	445	599	663	561	670	601	684	661	669	622	632	673	613	634			1,7					35,9	11			
3	502	629	681	664	648	613	666	684	634	642	674	678	653	653			17,1					28,7	11			
4	544	563	551	578	535	537	534	577	529	531	559	555	551	552			16,5					21,7	11			
5	576	598	620	591	584	560	601	613	571	559	589	591	569	587	-15,0	15,0	12,6			9,3	19,3	18,7	11			
6	603	600	606	613	585	562	587	615	566	561	607	598	595	591	-15,0	15,0	9,8			9,3	19,3	18,3	11			
7	626	638	652	646	631	596	625	655	601	607	637	654	634	631	-15,0	15,0	7,9			9,3	19,3	17,2	11			
8	645	624	632	639	611	586	605	645	587	591	637	627	619	614	-15,0	15,0	6,4			9,3	19,3	15,7	11			
9	663	552	580	653	649	511	578	655	614	612	670	659	640	646	-15,0	15,0	5,0			9,3	19,3	15,2	12			
10	678	687	710	708	688	647	678	713	655	660	719	708	686	688	-15,0	15,0	4,3	-31,0	40	11,3	17,3	12,7	12			
11	693	683	697	700	675	646	668	704	647	653	709	694	678	680	-14,5	14,5	3,8	-46,0	16	11,3	17,3	14,2	12			
12	705	695	716	705	684	657	684	714	659	659	718	708	685	690	-14,0	14,0	3,2	-49,0	13	11,3	17,3	14,6	12			
13	717	730	763	753	755	694	725	747	731	679	731	739		732	-13,5	13,5	2,9	-38,0	46	11,3	17,3	12,5	14			
14	728	742	778	770	765	706	740	768	739	693	745	753		745	-13,0	13,0	2,8	-36,0	49	11,3	17,3	15,5	13			
15	739	750	789	727	773	718	746	738	746	701	756	767		750	-12,5	12,5	2,8	-38,0	50	11,3	17,3	15,1	13			
16	749	760	800	796	784	731	752	795	759	711	768	775		756	-12,0	12,0	2,7	-37,0	52	11,3	17,3	14,3	13			
17	757	792	814	814	796	768	801	833	779	737	799	802		794	-11,5	11,5	2,8	-20,0	75	11,3	17,3	15,7	12			
18	766	765	768	775	750	749	770	800	741	725	775	771		763	-11,0	11,0	2,8	-40,0	34	11,3	17,3	14,7	12			
19	774	768	797	775	756	757	782	812	753	727	787	785		770	-10,5	10,5	2,6	-47,0	39	11,3	17,3	14,1	12			
20	781	789	795	802	782	777	803	841	777	747	808	808		793	-10,0	10,0	2,4	-35,0	60	11,3	17,3	13,9	12			
21	789	787	798	794	784	773	795	824	767	748	801	798		787	-9,5	9,5	2,3	-41,0	55	11,3	17,3	14,0	12			
22	796	799	810	803	791	787	816	842	786	758	815	815		802	-9,0	9,0	2,2	-37,0	47	11,3	17,3	15,0	13			
23	802	806	814	817	796	791	816	845	791	766	819	817		807	-8,5	8,5	2,1	-36,0	43	11,3	17,3	13,8	13			
24	809	810	822	815	801	796	832	848	796	770	824	823		812	-8,0	8,0	2,0	-39,0	40	11,3	17,3	14,9	13			
25	815	825	838	831	817	810	836	867	812	784	840	839		827	-7,5	7,5	2,0	-31,0	52	11,3	17,3	14,2	13			
26	820	823	841	832	813	807	832	858	808	786	835	835		824	-7,0	7,0	1,9	-35,0	37	11,3	17,3	14,9	13			
27	826	832	849	837	820	819	846	871	818	794	850	849		835	-6,5	6,5	1,9	-32,0	45	11,3	17,3	14,6	13			
28	832	839	857	845	830	824	852	874	824	802	854	853		841	-6,0	6,0	1,9	-30,0	42	11,3	17,3	15,5	13			
29	837	844	862	850	834	828	854	876	828	806	858	859		845	-5,5	5,5	1,8	-31,0	39	11,3	17,3	13,5	13			
30	842	848	866	853	837	834	860	882	835	809	862	862		850	-5,0	5,0	1,8	-32,0	40	11,3	17,3	13,5	14			
31	847	853	869	859	841	838	864	886	839	815	867	866		854	-4,9	4,9	1,8	-32,0	39	11,3	17,3	13,5	14			
32	851	855	877	862	846	841	867	888	841	819	870	869		857	-4,8	4,8	1,7	-32,0	36	11,3	17,3	13,5	14			
33	856	860	874	869	851	848	875	898	851	825	879	878		864	-4,8	4,8	1,7	-31,0	42	11,3	17,3	13,5	14			
34	860	864	876	872	854	850	876	900	854	827	881	881		867	-4,7	4,7	1,7	-33,0	39	11,3	17,3	13,5	14			
35	865	865	876	866	856	851	879	900	855	830	880	881		867	-4,6	4,6	1,6	-35,0	35	11,3	17,3	13,5	14			
36	869	874	886	884	866	863	891	915	869	840	893	894		879	-4,5	4,5	1,6	-29,0	46	11,3	17,3	13,5	14			
37	873	879	894	893	873	866	895	917	875	845	897	898		885	-4,4	4,4	1,6	-28,0	43	11,3	17,3	13,5	13			
38	877	884	897	896	876	871	899	920	878	849	902	901		888	-4,3	4,3	1,6	-28,0	43	11,3	17,3	13,5	13			
Legenda:																										
DST1 až DST 12		Označení deskových snímačů.																								
40 až 51		Označení měřicího místa v datalogeru.																								
t		Čas zkoušky, v min;																								
T		Normou požadovaná průměrná teplota v peci, ve °C; T / °C = 345.log10(8t/min +1) + 20.																								
d _c		Procentní odchylka ploch pod křivkami teplota/čas pro skut. průměr. teplotu a normou požadovanou průměrnou teplotu.																								
Tlak		Rozdíl tlaku v peci a okolního tlaku na stejné výškové úrovni (výšce nad podlahou pece).																								
		Tlak 20 Pa je požadovaný 100 mm pod spodní stranou záklopu pece, tj. ve výšce 2,25 m, potom tlak 14,3 Pa má být v místě tlakové sondy, tj. ve výšce 1,58 m.																								
		U rychle hořících zkušebních vzorků může být odchylka 100 K nad teplotní křivkou překročena po dobu nepřevyšující 10 minut za předpokladu, že tato nadměrná odchylka je jasně identifikována jako související s náhlým vznícením značného množství hořlavých materiálů, mající za následek zvýšení teploty plynu v peci.																								
		Selhání DST51 v průběhu zkoušky neovlivnilo platnost výsledků zkoušky, viz ČSN EN 1363-1 (2021)																								

Příloha č. 11 Teploty testovaných těles

Čas t (min)	Nosník PUR + Modifikátor								Nosník PUR							
	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
	30	31	32	33	34	35	36	37	20	21	22	23	24	25	26	27
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
1	20	10	10	10	10	10	10	10	28	10	10	10	10	10	10	10
2	69	13	10	10	10	11	10	10	101	16	10	10	10	11	10	10
3	106	24	11	10	10	12	10	10	142	34	12	10	10	14	10	10
4	130	38	13	11	10	16	10	10	164	53	17	11	11	20	10	10
5	144	51	17	12	11	23	10	10	183	69	23	14	12	29	10	10
6	156	65	22	15	12	30	10	11	210	83	30	19	15	38	10	10
7	177	77	28	18	13	37	10	11	240	100	38	25	18	47	10	11
8	196	92	34	24	15	45	10	12	265	111	45	33	23	56	10	11
9	217	103	40	31	18	54	10	14	289	108	53	42	29	66	10	12
10	246	110	47	39	22	62	10	15	319	122	61	50	35	75	10	13
11	267	117	53	47	25	71	11	17	340	134	69	59	42	85	11	14
12	288	124	59	56	30	80	11	20						94		
13	309	132	65	73	34	89	11	22								
14	338	142	72	89	39	99	12	25								
15	356	153	78	98	44	110	13	28								
16	387	165	84	100	49	120	14	31								
17	427	179	90	100	55	127	15	35								
18	443	193	96	100	60	134	16	39								
19	465	205	102	101	66	142	18	43								
20	496	218	109	101	71	149	20	47								
21	509	233	115	103	77	163	21	51								
22	526	249	121	106	83	184	23	56								
23	541	265	127	112	89	209	25	60								
24	547	288	130	117	95	237	28	63								
25	565	317	133	122	101	277	30	67								
26	579	310	136	130	107	336	33	70								
27	597	321	140	137	113	392	36	74								
28	608	333	147	146	119	442	38	77								
29	622	358	160	170	128	527	43	80								
30	633	377	168	184	132	558	45	82								
31	645	397	180	203	137	597	49	84								
32	657	413	193	223	141	621	53	86								
33	665	428	208	246	144	648	56	88								
34	670	452	226	270	147	668	60	89								
35	678	480	245	291	153	684	64	91								
36	688	505	264	316	163	702	68	92								
37	698	532	280	364	176	712	72	93								
38	693	560	302	417	192	718	77	93								
Legenda:																
TC1 až TC8								Označení vnitřních teplotních čidel.								
20 až 27, 30 až 37								Označení měřicího místa v dataloggeru.								

Příloha č. 12 Průhyb / rychlost průhybu ve středu rozpětí

Čas t (min)	Průhyb		Rychlost průhybu	
	Nosník PUR + Modifikátor D (mm)	Nosník PUR D (mm)	Nosník PUR + Modifikátor D' (mm/min)	Nosník PUR D' (mm/min)
0,0	0	0		
1,0	5	3	7	5
2,0	15	11	9	8
3,0	23	18	8	7
4,0	31	25	7	6
5,0	37	31	7	7
6,0	45	38	8	7
7,0	53	46	8	8
8,0	61	55	7	8
9,0	68	62	7	8
10,0	75	72	7	10
11,0	82	82	7	12
12,0	88	96	7	139
13,0	95	359	7	
14,0	102		6	
15,0	107		4	
16,0	110		3	
17,0	113		3	
18,0	116		3	
19,0	119		3	
20,0	121		3	
21,0	124		3	
22,0	126		2	
23,0	129		2	
24,0	131		2	
25,0	134		3	
26,0	136		3	
27,0	139		3	
28,0	142		4	
29,0	147		7	
30,0	156		14	
31,0	176		21	
32,0	198		19	
33,0	214		14	
34,0	225		10	
35,0	234		8	
36,0	240		6	
37,0	247		7	
38,0	254		56	
38,5	359			
Legenda:				
D_i	Průhyb uprostřed rozpětí nosníku i (i = 1, 2) (kladné hodnoty - směr dolů)			
D'_i	Rychlost průhybu vypočítaná jako: $D'_i(t) = [D_i(t - 1 \text{ min}) - D_i(t + 1 \text{ min})] / 2 \text{ min}$			
d	120 mm nominální výška průřezu nosníku na začátku zkoušky			
L	4150 mm rozpětí nosníku			
D_{lim}	359 mm mezní průhyb			
D'_{lim}	16 mm/min mezní rychlost průhybu			
D, D'	Dosažení limitního průhybu / limitní rychlosti průhybu			

Príloha č. 13 První výstup modelu – Redukce průřezu nosného prvku

- Hloubka zuhelnatění byla v modelu stanovena vztahem:

$$d_{cha}(t) = \beta \cdot t$$

kde

$d_{char}(t)$	hloubka zuhelnatění v čase t (mm),
β	nominální rychlost zuhelnatění ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$),
t	doba požární expozice (min).

- Účinná redukce průřezu byla stanovena jako součet hloubky zuhelnatění a nulové vrstvy:

$$d_{eff}(t) = d_{char}(t) + k_0(t) \cdot d_0$$

kde

$d_{eff}(t)$	účinná hloubka redukce průřezu (mm),
d_0	tloušťka nulové vrstvy (mm),
$k_0(t)$	součinitel časového náběhu nulové vrstvy (-).

- Časový náběh nulové vrstvy byl uvažován ve tvaru:

$$k_0(t) = \min\left(\frac{t}{20}, 1\right)$$

- Pro třístranně exponovaný průřez byly účinné rozměry stanoveny vztahy:

$$b_{eff}(t) = b - 2d_{eff}(t)$$

$$h_{eff}(t) = h - d_{eff}(t)$$

kde

$b_{eff}(t)$	účinná šířka průřezu (mm),
$h_{eff}(t)$	účinná výška průřezu (mm),
b	původní šířka průřezu (mm),
h	původní výška průřezu (mm).

- Z účinných rozměrů průřezu byla následně stanovena účinná plocha průřezu:

$$A_{eff}(t) = b_{eff}(t)h_{eff}(t)$$

- Účinný moment setrvačnosti průřezu byl určen jako:

$$I_{eff}(t) = \frac{b_{eff}(t) \cdot h_{eff}^3(t)}{12}$$

- Účinný průřezový modul v ohybu byl stanoven vztahem:

$$W_{eff}(t) = \frac{b_{eff}(t) \cdot h_{eff}^2(t)}{6}$$

- Ohybové napětí v účinném průřezu bylo stanoveno podle vztahu:

$$\sigma_m(t) = \frac{M_{max}}{W_{eff}(t)}$$

kde

$\sigma_m(t)$ vypočtené ohybové napětí (MPa),
 M_{max} maximální ohybový moment (N·mm),
 $W_{eff}(t)$ účinný průřezový modul (mm³).

- Napětíové využití průřezu bylo vyjádřeno poměrem:

$$\eta(t) = \frac{\sigma_m(t)}{f_{m,d}}$$

kde

$\eta(t)$ napětíové využití průřezu (-),
 $f_{m,d}$ návrhová pevnost v ohybu (N·mm⁻²).

- Mezní stav únosnosti je v predikčním modelu dosažen při splnění podmínky:

$$\eta(t) \geq 1$$

Tento vztah byl použit jako kritérium okamžiku, kdy je účinný redukovaný průřez z hlediska návrhové pevnosti již neúnosný.

Příloha č. 14 Druhý výstup modelu – Rovnicový základ numerického modelu druhého výstupu

Normová teplotní křivka požáru

- Teplota plynů v peci byla stanovena podle normové teplotní křivky ČSN EN 1363-1 (2021) dle ISO 834-1 (1999):

$$T_g(t) = 20 + 345 \log_{10}(8 \cdot t + 1)$$

kde

$T_g(t)$ teplota plynů v peci ve (°C),
 t čas požární expozice (min).

- Nestacionární vedení tepla v průřezu

Teplotní pole v průřezu nosníku bylo popsáno dvourozměrnou formou Fourierovy rovnice vedení tepla:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

kde

T teplota (°C),
 t čas (s),
 ρ objemová hmotnost materiálu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
 c měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),
 λ_y, λ_z součinitele tepelné vodivosti ve směru šířky a výšky průřezu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

- Okrajová podmínka požární expozice

Tepelný tok do exponovaného povrchu nosníku byl uvažován jako kombinace proudění a sálání:

$$q = h_c \cdot (T_g - T_s) + \varepsilon \sigma \cdot \left[(T_g + 273,15)^4 - (T_s + 273,15)^4 \right]$$

kde

q tepelný tok ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$),
 h_c součinitel přestupu tepla prouděním ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$),
 T_g teplota plynů v peci (°C),
 T_s povrchová teplota nosníku (°C),
 ε emisivita povrchu (-),
 σ Stefanova–Boltzmannova konstanta ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

- Hloubka zuhelnatění a účinná redukce průřezu

Postup zuhelnatění byl vyjádřen pomocí nominální rychlosti zuhelnatění:

$$d_{char}(t) = \beta \cdot t$$

kde

d_{char} hloubka zuhelnatění (mm),
 β rychlost zuhelnatění ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)

- Pro mechanické posouzení byl použit účinný úbytek průřezu zahrnující také nulovou vrstvu:

$$d_{eff}(t) = d_{char}(t) + k_0(t) \cdot d_0$$

$$k_0(t) = \min\left(\frac{t}{20}, 1\right)$$

kde

d_{eff} účinná redukce průřezu (mm),
 d_0 nulová vrstva (mm),
 k_0 součinitel jejího časového náběhu (-).

- U třístranně exponovaného nosníku byly účinné rozměry průřezu stanoveny jako:

$$b_{eff}(t) = b - 2 \cdot d_{eff}(t)$$

$$h_{eff}(t) = h - d_{eff}(t)$$

kde

b_{eff} účinná šířka (mm),
 h_{eff} výška průřezu (mm)

- Vrstvený průřez a poloha neutrální osy

Protože byl nosník tvořen dubovými lamelami a PUR lepenými spárami, byla poloha neutrální osy stanovena jako tuhostně vážená hodnota:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i}$$

kde

E_i je modul pružnosti i -té vrstvy ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$),
 A_i její plocha (mm^2),
 z_i poloha těžiště vrstvy (mm).

- Účinná ohybová tuhost vrstveného průřezu byla stanovena podle vztahu:

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^n E_i \cdot [I_i + A_i \cdot (z_i - z_0)^2]$$

kde

I_i vlastní moment setrvačnosti i -té vrstvy vzhledem k její vlastní těžišťové ose (mm^4)

- Hookeův zákon pro ortotropní dřevo

Obecný vztah mezi napětím a poměrným přetvořením byl pro ortotropní materiál vyjádřen poddajnostním tvarem:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{Bmatrix}$$

kde

$\varepsilon_L, \varepsilon_R, \varepsilon_T$	normálová poměrná přetvoření (-),
$\gamma_{RT}, \gamma_{LT}, \gamma_{LR}$	smyková poměrná přetvoření (-),
$\sigma_L, \sigma_R, \sigma_T$	normálová napětí (N·mm ⁻²),
$\tau_{RT}, \tau_{LT}, \tau_{LR}$	smyková napětí (N·mm ⁻²),
E_L, E_R, E_T	moduly pružnosti v hlavních směrech (N·mm ⁻²),
G_{RT}, G_{LT}, G_{LR}	smykové moduly pružnosti (N·mm ⁻²),
$\nu_{LR}, \nu_{RL}, \nu_{LT}, \nu_{TL}, \nu_{RT}, \nu_{TR}$	Poissonovy součinitele (-).

- Pro ohýbaný nosník bylo rozhodující podélné napětí ve směru vláken. V modelu bylo proto možné použít zjednodušený vztah:

$$\sigma_L = E_L \cdot \varepsilon_L$$

- Poměrné přetvoření v průřezu bylo stanoveno z křivosti nosníku:

$$\varepsilon_L(z) = \kappa(z - z_0)$$

kde

$\varepsilon_L(z)$	poměrné přetvoření v poloze (-),
κ	křivost nosníku (mm ⁻¹),
z	poloha bodu v průřezu (mm),
z_0	poloha neutrální osy (mm).

- Křivost nosníku byla určena vztahem:

$$\kappa = \frac{M}{(EI)_{eff}}$$

kde

M	ohybový moment (N·mm),
$(EI)_{eff}$	efektivní ohybová tuhost (N·mm ²),

Po dosazení je napětí v libovolné vrstvě průřezu dáno vztahem:

$$\sigma_L(z, T) = E_L(T) \cdot \frac{M}{(EI)_{eff}} \cdot (z - z_0)$$

kde

$E_L(T)$ vyjadřuje možnost zohlednění teplotně závislého modulu pružnosti.

- Hermitovy tvarové funkce pro průhyb

Průhyb nosníku byl stanoven pomocí kubických Hermitových tvarových funkcí Euler–Bernoulliho nosníkového prvku:

$$w(\xi) = N_1 w_1 + N_2 \theta_1 + N_3 w_2 + N_4 \theta_2$$

kde

w_1, w_2	svislé posuny uzlů prvku (mm),
θ_1, θ_2	jejich natočení (-, rad)
N_1, N_3	tvarové funkce pro posun (-)
N_2, N_4	tvarové funkce pro natočení (mm)

- Jednotlivé tvarové funkce mají tvar:

$$\begin{aligned} N_1 &= 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3 \\ N_2 &= L_e(\xi - 2\xi^2 + \xi^3) \\ N_3 &= 3\xi^2 - 2\xi^3 \\ N_4 &= L_e(-\xi^2 + \xi^3) \end{aligned}$$

kde

ξ	lokální bezrozměrná souřadnice prvku (-)
L_e	délka nosníkového prvku (mm).

- Kritérium porušení

Míra využití průřezu byla stanovena jako poměr vypočteného ohybového napětí a návrhové pevnosti v ohybu:

$$\eta(t) = \frac{\sigma_m(t)}{f_{m,d}}$$

kde

$\sigma_m(t)$	vypočtené ohybové napětí v čase ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$),
$f_{m,d}$	návrhová pevnost v ohybu ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$).

- K porušení v modelu dochází při splnění podmínky:

$$\eta(t) \geq 1$$

Příloha č. 15 Třetí výstup modelu – Rovnice použité pro predikční výpočet teplotního pole

- Normová teplotní křivka ČSN EN 1363-1 (2021) dle ISO 834-1 (1999)

Teplota plynů v peci byla v čase definována normovou teplotní křivkou:

$$T_g(t) = 20 + 345 \log_{10}(8 \cdot t + 1)$$

kde

$T_g(t)$ teplota plynů v peci (°C),
 t čas požární expozice (min).

- Nestacionární vedení tepla v příčném průřezu

Teplotní pole v průřezu bylo modelováno jako dvourozměrný nestacionární problém vedení tepla:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

kde

T teplota (°C),
 t čas (s),
 y souřadnice ve směru šířky průřezu (m),
 z souřadnice ve směru výšky průřezu (m),
 ρ objemová hmotnost materiálu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
 c měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),
 λ_y, λ_z součinitele tepelné vodivosti ve směru šířky a výšky průřezu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

- Teplotní difuzivita

Pro jednotlivé materiálové oblasti lze zavést teplotní difuzivitu:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

kde

α teplotní difuzivita ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$),
 λ součinitel tepelné vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),
 ρ objemová hmotnost ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
 c měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

- Okrajová podmínka požární expozice

Na exponovaných plochách byl tepelný tok stanoven jako součet konvekční a radiační složky:

$$q = h_c \cdot (T_g - T_s) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left[(T_g + 273,15)^4 - (T_s + 273,15)^4 \right]$$

kde

q	hustota tepelného toku ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$),
h_c	součinitel přestupu tepla prouděním ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$),
T_g	teplota plynů v peci ($^{\circ}\text{C}$),
T_s	povrchová teplota nosníku ($^{\circ}\text{C}$),
ε	emisivita povrchu (-),
σ	Stefanova–Boltzmannova konstanta ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$).

- Diskretizace Fourierovy rovnice

Pro výpočetní řešení v síti průřezu byla použita explicitní konečně diferencní formulace. Pro vnitřní bod sítě lze zjednodušeně psát:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \Delta t \cdot \alpha_y \frac{T_{i,j+1}^n - 2 \cdot T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} + \Delta t \cdot \alpha_z \frac{T_{i+1,j}^n - 2 \cdot T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{\Delta z^2}$$

kde

$T_{i,j}^n$	teplota v bodě sítě v časovém kroku n ($^{\circ}\text{C}$)
Δt	časový krok (s),
$\Delta y, \Delta z$	jsou prostorové kroky sítě (mm),
α_y, α_z	jsou teplotní difuzivity ve směrech y a z ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$)

- Kritérium zuhelnatělé oblasti podle izotermy

Jako informativní hranice zuhelnatělé oblasti byla ve vizualizaci uvažována izoterma:

$$T(y, z, t) \geq 300 \text{ C}$$

Tato izoterma slouží k orientačnímu vyznačení oblasti, ve které lze očekávat vznik zuhelnatělé nebo mechanicky výrazně oslabené vrstvy.

- Hloubka zuhelnatění

Predikční hloubka zuhelnatění byla stanovena vztahem:

$$d_{char}(t) = \beta \cdot t$$

kde

d_{char}	je hloubka zuhelnatění (mm),
β	je rychlost zuhelnatění ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$),
t	je čas požární expozice (min).

- Účinná redukce průřezu

Pro stanovení mechanicky účinného průřezu byla k hloubce zuhelnatění připočtena nulová vrstva:

$$d_{eff}(t) = d_{char}(t) + k_0 \cdot (t) d_0$$

kde

d_{eff}	účinná redukce průřezu (mm),
d_0	nulová vrstva (mm),
$k_0(t)$	součinitel časového náběhu nulové vrstvy (-).

Součinitel $k_0(t)$ byl v modelu uvažován ve tvaru:

$$k_0(t) = \min\left(\frac{t}{20 \text{ min}}, 1\right)$$

- Redukovaný průřez při třístranném ohřevu

Protože byl nosník exponován ze spodní a obou bočních stran, byly účinné rozměry průřezu stanoveny jako:

$$b_{eff}(t) = b - 2 \cdot d_{eff}(t)$$

$$h_{eff}(t) = h - d_{eff}(t)$$

kde

b_{eff}	účinná šířka průřezu (mm),
h_{eff}	účinná výška průřezu (mm),
b	původní šířka průřezu (mm),
h	původní výška průřezu (mm).

- Vazba na následné mechanické posouzení

Výsledný redukovaný průřez může být dále použit pro přepočet účinné ohybové tuhosti:

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^n E_i \cdot [I_i + A_i \cdot (z_i - z_0)^2]$$

kde

$(EI)_{eff}$	účinná ohybová tuhost vrstveného průřezu (N·mm ²),
E_i	modul pružnosti i-té vrstvy (N·mm ⁻²),
I_i	vlastní moment setrvačnosti i-té vrstvy (mm ⁴),
A_i	plocha i-té vrstvy (mm ²),
z_i	poloha těžiště i-té vrstvy (mm),
z_0	poloha neutrální osy (mm).

Příloha č. 16 Zdrojový kód výpočtu pro Python 3.14.3

```
0001 from __future__ import annotations
0002
0003 from pathlib import Path
0004 import math
0005 import csv
0006 import zipfile
0007 import shutil
0008 import numpy as np
0009 import matplotlib.pyplot as plt
0010 from matplotlib.patches import Rectangle
0011
0012 try:
0013     import imageio.v2 as imageio
0014 except Exception:
0015     imageio = None
0016
0017
0018 SCRIPT_DIR = Path(__file__).resolve().parent if "__file__" in globals() else Path.cwd()
0019 OUT_DIR = SCRIPT_DIR / "vystupy_predikce_dub_glulam_PUR_v11_kalibrovany"
0020
0021 if OUT_DIR.exists():
0022     shutil.rmtree(OUT_DIR)
0023 OUT_DIR.mkdir(parents=True, exist_ok=True)
0024
0025 plt.rcParams["font.family"] = "Times New Roman"
0026 plt.rcParams["axes.unicode_minus"] = False
0027
0028
0029 L_SPEC_MM = 4300.0
0030 L_MM = 4150.0
0031 B_MM = 100.0
0032 H_MM = 120.0
0033
0034 N_LAM = 3
0035 T_GLUE_MM = 0.20
0036 H_LAM_MM = (H_MM - 2.0*T_GLUE_MM) / 3.0
0037
0038 P_KN = 2.59
0039 Q_SPEC_KN_M = 0.084
0040 Q_DECK_KN_M = 0.916
0041 Q_TOTAL_KN_M = Q_SPEC_KN_M + Q_DECK_KN_M
0042 LOAD_X_MM = np.array([1, 3, 5, 7], dtype=float) * L_MM / 8.0
0043
0044 RHO_OAK = 680.0
0045 E_OAK_20 = 13990.0 # MPa
0046 G_OAK_20 = 1190.0 # MPa
0047
0048 RHO_PUR = 1200.0
0049 E_PUR_20 = 730.0
0050 NU_PUR = 0.39
0051 G_PUR_20 = E_PUR_20 / (2.0*(1.0+NU_PUR))
0052
0053 FM_G_K = 60.0
0054 GAMMA_M = 1.25
0055 K_MOD = 1.0
0056 K_H = min((600.0/H_MM)**0.1, 1.1)
0057 FM_D = 60.0 # MPa; modelová pevnost pro kalibrovaný výpočet
0058 K_RED = 0.5835 # kalibrační součinitel účinné mechanické redukce průřezu
0059
0060 BETA_CHAR = 0.70 # mm/min
0061 DO_MM = 7.0
0062 KO_FULL_TIME_MIN = 20.0
0063 MAX_TIME_MIN = 60.0
0064 PREDICTION_END_MIN = 30.0 # model běží do 30 min; mezni stav je určen výpočtem
0065 MECH_DT_MIN = 0.10
0066
0067 DY_MM = 2.0
0068 DZ_MM = 2.0
0069 DT_THERMAL_S = 0.20
0070 T0_C = 20.0
0071
0072 LAMBDA_OAK_Y = 0.17
0073 LAMBDA_OAK_Z = 0.17
0074 C_OAK = 1700.0
0075
0076 LAMBDA_PUR = 0.25
0077 C_PUR = 1500.0
0078
0079 LAMBDA_CHAR = 0.08
0080 C_CHAR = 1100.0
0081 RHO_CHAR = 180.0
0082
0083 H_CONV = 25.0
0084 EMISSIVITY = 0.80
0085 SIGMA_SB = 5.670374419e-8
0086
0087 N_ELEM_BEAM = 80
0088 N_PLOT_X = 801
0089 VISUAL_DEFLECTION_SCALE = 5.0
0090
0091 RUN_UNTIL_STRENGTH_FAILURE = True
```

```

0092 USE_TEMPERATURE_REDUCED_E_FOR_DEFLECTION = False
0093 USE_TEMPERATURE_REDUCED_E_FOR_STRENGTH = False
0094
0095 D_LIM_MM = L_MM**2/(400.0*H_MM)
0096
0097
0098 def iso834(t_min):
0099     return 20.0 + 345.0*np.log10(8.0*np.asarray(t_min) + 1.0)
0100
0101
0102 def k0_factor(t_min):
0103     return min(max(t_min/K0_FULL_TIME_MIN, 0.0), 1.0)
0104
0105
0106 def char_depths(t_min):
0107     d_char = BETA_CHAR*t_min
0108     d_eff = d_char + k0_factor(t_min)*D0_MM
0109     return d_char, d_eff
0110
0111
0112 def red_E_oak(T):
0113     T = np.asarray(T, dtype=float)
0114     k = np.ones_like(T)
0115     k = np.where((T > 80) & (T <= 150), 1.0 - 0.12*(T-80)/70, k)
0116     k = np.where((T > 150) & (T <= 250), 0.88 - 0.20*(T-150)/100, k)
0117     k = np.where((T > 250) & (T <= 300), 0.68 - 0.25*(T-250)/50, k)
0118     k = np.where(T > 300, 0.05, k)
0119     return np.clip(k, 0.05, 1.0)
0120
0121
0122 def red_E_pur(T):
0123     T = np.asarray(T, dtype=float)
0124     k = np.ones_like(T)
0125     k = np.where((T > 60) & (T <= 120), 1.0 - 0.20*(T-60)/60, k)
0126     k = np.where((T > 120) & (T <= 200), 0.80 - 0.40*(T-120)/80, k)
0127     k = np.where(T > 200, 0.12, k)
0128     return np.clip(k, 0.12, 1.0)
0129
0130
0131 def layers():
0132     z = 0.0
0133     arr = []
0134     for i in range(3):
0135         arr.append({
0136             "name": f"dubová lamela {i+1}",
0137             "mat": "OAK",
0138             "z0": z,
0139             "z1": z + H_LAM_MM,
0140         })
0141         z += H_LAM_MM
0142         if i < 2:
0143             arr.append({
0144                 "name": f"PUR spára {i+1}",
0145                 "mat": "PUR",
0146                 "z0": z,
0147                 "z1": z + T_GLUE_MM,
0148             })
0149             z += T_GLUE_MM
0150     return arr
0151
0152
0153 def mat_at_z(z):
0154     for lay in layers():
0155         if lay["z0"] <= z <= lay["z1"]:
0156             return lay["mat"]
0157     return "OAK"
0158
0159
0160 def create_grid():
0161     y = np.arange(-B_MM/2.0, B_MM/2.0 + DY_MM, DY_MM)
0162     z = np.arange(0.0, H_MM + DZ_MM, DZ_MM)
0163     Y, Z = np.meshgrid(y, z)
0164
0165     T = np.full(Y.shape, T0_C, dtype=float)
0166     rho = np.zeros_like(T)
0167     cp = np.zeros_like(T)
0168     ly = np.zeros_like(T)
0169     lz = np.zeros_like(T)
0170
0171     for i in range(T.shape[0]):
0172         for j in range(T.shape[1]):
0173             m = mat_at_z(Z[i, j])
0174             if m == "PUR":
0175                 rho[i, j] = RHO_PUR
0176                 cp[i, j] = C_PUR
0177                 ly[i, j] = LAMBDA_PUR
0178                 lz[i, j] = LAMBDA_PUR
0179             else:
0180                 rho[i, j] = RHO_OAK
0181                 cp[i, j] = C_OAK
0182                 ly[i, j] = LAMBDA_OAK_Y
0183                 lz[i, j] = LAMBDA_OAK_Z
0184
0185     return y, z, Y, Z, T, rho, cp, ly, lz
0186
0187

```

```

0188 def update_char_props(T, rho, cp, ly, lz):
0189     mask = T >= 300.0
0190     r = rho.copy()
0191     c = cp.copy()
0192     ly2 = ly.copy()
0193     lz2 = lz.copy()
0194
0195     r[mask] = RHO_CHAR
0196     c[mask] = C_CHAR
0197     ly2[mask] = LAMBDA_CHAR
0198     lz2[mask] = LAMBDA_CHAR
0199     return r, c, ly2, lz2, mask
0200
0201
0202 def thermal_step(T, rho, cp, ly, lz, t_s):
0203     dy = DY_MM/1000.0
0204     dz = DZ_MM/1000.0
0205     dt = DT_THERMAL_S
0206
0207     t_min = t_s/60.0
0208     Tg = float(iso834(t_min))
0209
0210     rho2, cp2, ly2, lz2, char_mask = update_char_props(T, rho, cp, ly, lz)
0211
0212     Tn = T.copy()
0213
0214     ay = ly2/(rho2*cp2)
0215     az = lz2/(rho2*cp2)
0216
0217     Tn[1:-1, 1:-1] = (
0218         T[1:-1, 1:-1]
0219         + dt*ay[1:-1, 1:-1]*(T[1:-1, 2:] - 2*T[1:-1, 1:-1] + T[1:-1, :-2])/(dy*dy)
0220         + dt*az[1:-1, 1:-1]*(T[2:, 1:-1] - 2*T[1:-1, 1:-1] + T[:-2, 1:-1])/(dz*dz)
0221     )
0222
0223     def q_fire(Ts):
0224         return H_CONV*(Tg-Ts) + EMISSIVITY*SIGMA_SB*((Tg+273.15)**4 - (Ts+273.15)**4)
0225
0226     ql = q_fire(T[:, 0])
0227     qr = q_fire(T[:, -1])
0228     Tn[:, 0] = T[:, 0] + dt*ql/(rho2[:, 0]*cp2[:, 0]*dy)
0229     Tn[:, -1] = T[:, -1] + dt*qr/(rho2[:, -1]*cp2[:, -1]*dy)
0230
0231     qb = q_fire(T[0, :])
0232     Tn[0, :] = T[0, :] + dt*qb/(rho2[0, :]*cp2[0, :]*dz)
0233
0234     Tn[-1, :] = Tn[-2, :]
0235
0236     return np.clip(Tn, 20.0, max(Tg, 20.0)), Tg, char_mask
0237
0238
0239 def geometric_strength_section(d_eff):
0240     b_eff = max(B_MM - 2.0*d_eff, 1.0)
0241     h_eff = max(H_MM - d_eff, 1.0)
0242     A = b_eff*h_eff
0243     I = b_eff*h_eff**3/12.0
0244     W = b_eff*h_eff**2/6.0
0245     return {"b_eff": b_eff, "h_eff": h_eff, "A": A, "I": I, "W": W}
0246
0247
0248 def stiffness_layered_section(T, z_coords, d_eff):
0249     z_cut = min(max(d_eff, 0.0), H_MM-1.0)
0250     b_eff = max(B_MM - 2.0*d_eff, 1.0)
0251
0252     Tz = np.mean(T, axis=1)
0253
0254     active = []
0255     for lay in layers():
0256         z0 = max(lay["z0"], z_cut)
0257         z1 = min(lay["z1"], H_MM)
0258         if z1 <= z0:
0259             continue
0260
0261         idx = np.where((z_coords >= z0) & (z_coords <= z1))[0]
0262         T_mean = float(np.mean(Tz[idx])) if len(idx) else 20.0
0263
0264         if lay["mat"] == "PUR":
0265             kE = float(red_E_pur(T_mean)) if USE_TEMPERATURE_REDUCED_E_FOR_DEFLECTION else 1.0
0266             E = E_PUR_20*kE
0267             G = G_PUR_20*kE
0268         else:
0269             kE = float(red_E_oak(T_mean)) if USE_TEMPERATURE_REDUCED_E_FOR_DEFLECTION else 1.0
0270             E = E_OAK_20*kE
0271             G = G_OAK_20*kE
0272
0273         if False and T_mean >= 300.0:
0274             E *= 0.05
0275             G *= 0.05
0276
0277         active.append({
0278             "z0": z0, "z1": z1, "E": E, "G": G,
0279             "mat": lay["mat"], "name": lay["name"], "T": T_mean
0280         })
0281
0282     EA = 0.0
0283     EAz = 0.0

```

```

0284     GA = 0.0
0285     A_total = 0.0
0286
0287     for a in active:
0288         h = a["z1"] - a["z0"]
0289         A = b_eff*h
0290         zc = 0.5*(a["z0"]+a["z1"])
0291         EA += a["E"]*A
0292         EAz += a["E"]*A*zc
0293         GA += a["G"]*A
0294         A_total += A
0295
0296     if EA <= 1e-12:
0297         return {"EI": 1e-9, "GA": 1e-9, "z0": H_MM, "A": 1e-9, "b_eff": b_eff,
0298               "h_eff": max(H_MM-d_eff, 1.0), "layers": active}
0299
0300     z0 = EAz/EA
0301     EI = 0.0
0302     for a in active:
0303         h = a["z1"] - a["z0"]
0304         A = b_eff*h
0305         zc = 0.5*(a["z0"]+a["z1"])
0306         I_local = b_eff*h**3/12.0
0307         EI += a["E"]*(I_local + A*(zc-z0)**2)
0308
0309     return {
0310         "EI": EI, "GA": GA, "z0": z0, "A": A_total, "b_eff": b_eff,
0311         "h_eff": max(H_MM-d_eff, 1.0), "layers": active
0312     }
0313
0314 def hooke_response(M_Nmm, W_eff, EI_stiff, y_bottom):
0315     sigma = M_Nmm/max(W_eff, 1e-9)
0316     kappa = M_Nmm/max(EI_stiff, 1e-9)
0317     epsilon = kappa*y_bottom
0318     return sigma, kappa, epsilon
0319
0320 def hermite_N(xi, Le):
0321     N1 = 1.0 - 3.0*xi**2 + 2.0*xi**3
0322     N2 = Le*(xi - 2.0*xi**2 + xi**3)
0323     N3 = 3.0*xi**2 - 2.0*xi**3
0324     N4 = Le*(-xi**2 + xi**3)
0325     return N1, N2, N3, N4
0326
0327 def moment_distribution(x):
0328     P_N = P_KN*1000.0
0329     q = Q_TOTAL_KN_M # N/mm
0330     R = 2.0*P_N + q*L_MM/2.0
0331
0332     M = R*x - q*x**2/2.0
0333     for xp in LOAD_X_MM:
0334         M = np.where(x >= xp, M - P_N*(x-xp), M)
0335     return M
0336
0337 def shear_distribution(x):
0338     P_N = P_KN*1000.0
0339     q = Q_TOTAL_KN_M
0340     R = 2.0*P_N + q*L_MM/2.0
0341
0342     V = R - q*x
0343     for xp in LOAD_X_MM:
0344         V = np.where(x >= xp, V - P_N, V)
0345     return V
0346
0347 def beam_deflection(EI, GA):
0348     nnode = N_ELEM_BEAM + 1
0349     xnodes = np.linspace(0.0, L_MM, nnode)
0350     Le = L_MM/N_ELEM_BEAM
0351     ndof = 2*nnode
0352
0353     K = np.zeros((ndof, ndof))
0354     F = np.zeros(ndof)
0355
0356     ke = EI/Le**3*np.array([
0357         [12, 6*Le, -12, 6*Le],
0358         [6*Le, 4*Le**2, -6*Le, 2*Le**2],
0359         [-12, -6*Le, 12, -6*Le],
0360         [6*Le, 2*Le**2, -6*Le, 4*Le**2],
0361     ], dtype=float)
0362
0363     q = Q_TOTAL_KN_M
0364     fe = q*Le/2.0*np.array([1.0, Le/6.0, 1.0, -Le/6.0])
0365
0366     for e in range(N_ELEM_BEAM):
0367         dofs = [2*e, 2*e+1, 2*(e+1), 2*(e+1)+1]
0368         K[np.ix_(dofs, dofs)] += ke
0369         F[dofs] += fe
0370
0371     for xp in LOAD_X_MM:
0372         node = int(round(xp/Le))
0373         node = max(0, min(nnode-1, node))
0374         F[2*node] += P_KN*1000.0

```

```

0380
0381     fixed = [0, 2*(nnode-1)]
0382     free = [i for i in range(ndof) if i not in fixed]
0383
0384     U = np.zeros(ndof)
0385     U[free] = np.linalg.solve(K[np.ix_(free, free)], F[free])
0386
0387     wnode = U[0::2]
0388     thnode = U[1::2]
0389
0390     xf = np.linspace(0.0, L_MM, N_PLOT_X)
0391     wf = np.zeros_like(xf)
0392
0393     for i, xx in enumerate(xf):
0394         e = min(int(xx/Le), N_ELEM_BEAM-1)
0395         xi = (xx - xnodes[e])/Le
0396         N1, N2, N3, N4 = hermite_N(xi, Le)
0397         wf[i] = N1*wnode[e] + N2*thnode[e] + N3*wnode[e+1] + N4*thnode[e+1]
0398
0399     if GA > 1e-9:
0400         V_est = 2.0*P_KN*1000.0 + Q_TOTAL_KN_M*L_MM/2.0
0401         w_shear = V_est*L_MM/(8.0*GA)
0402         shape = 4.0*(xf/L_MM)*(1.0-xf/L_MM)
0403         wf += w_shear*shape
0404
0405     return xf, wf, float(np.max(wf))
0406
0407
0408 def run_model():
0409     y, z, Y, Z, T, rho, cp, ly, lz = create_grid()
0410
0411     rows = []
0412     snapshots = {}
0413
0414     t_s = 0.0
0415     next_mech = 0.0
0416     final_s = PREDICTION_END_MIN*60.0
0417
0418     first_failure_found = False
0419     first_failure_time = None
0420
0421     important_times = [
0422         0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,
0423         11, 12, 12.2, 13, 14, 15, 16, 18, 20, 22, 25, 30
0424     ]
0425
0426     while t_s <= final_s + 1e-9:
0427         t_min = t_s/60.0
0428
0429         if t_min >= next_mech - 1e-9:
0430             dch_nom, deff_nom = char_depths(t_min)
0431             dch = K_RED * dch_nom
0432             deff = K_RED * deff_nom
0433
0434             s_strength = geometric_strength_section(deff)
0435
0436             s_stiff = stiffness_layered_section(T, z, deff)
0437
0438             x, w, wmax = beam_deflection(s_stiff["EI"], s_stiff["GA"])
0439             M = moment_distribution(x)
0440             V = shear_distribution(x)
0441
0442             Mmax = float(np.max(np.abs(M)))
0443             Vmax = float(np.max(np.abs(V)))
0444
0445             y_bottom = s_strength["h_eff"]/2.0
0446             sigma, kappa, epsilon = hooke_response(Mmax, s_strength["W"], s_stiff["EI"], y_bottom)
0447
0448             eta = sigma/FM_D
0449             eta_defl = wmax/D_LIM_MM
0450             collapse = eta >= 1.0
0451
0452             if collapse and not first_failure_found:
0453                 first_failure_found = True
0454                 first_failure_time = t_min
0455                 snapshots[round(t_min, 2)] = T.copy()
0456
0457             row = {
0458                 "t_min": t_min,
0459                 "T_iso_C": float(iso834(t_min)),
0460                 "T_max_C": float(np.max(T)),
0461                 "T_mean_C": float(np.mean(T)),
0462                 "d_char_mm": dch,
0463                 "d_eff_mm": deff,
0464                 "d_char_nom_mm": dch_nom,
0465                 "d_eff_nom_mm": deff_nom,
0466                 "k_red": K_RED,
0467                 "b_eff_mm": s_strength["b_eff"],
0468                 "h_eff_mm": s_strength["h_eff"],
0469                 "A_eff_mm2": s_strength["A"],
0470                 "I_eff_mm4": s_strength["I"],
0471                 "W_eff_mm3": s_strength["W"],
0472                 "EI_stiff_Nmm2": s_stiff["EI"],
0473                 "GA_stiff_N": s_stiff["GA"],
0474                 "z0_stiff_mm": s_stiff["z0"],
0475                 "Mmax_kNm": Mmax/1e6,

```

```

0476         "Vmax_kN": Vmax/1000.0,
0477         "kappa_l_mm": kappa,
0478         "epsilon_bottom": epsilon,
0479         "sigma_m_MPa": sigma,
0480         "fm_d_MPa": FM_D,
0481         "eta_strength": eta,
0482         "D_lim_mm": D_LIM_MM,
0483         "wmax_mm": wmax,
0484         "eta_deflection": eta_defl,
0485         "char_area_ratio_T300": float(np.mean(T >= 300.0)),
0486         "collapse": collapse,
0487         "first_failure_time_min": first_failure_time if first_failure_time is not None else "",
0488         "state": "NEÚNOSNÉ / PO DESTRUKCI" if collapse else "ÚNOSNÉ",
0489     }
0490     rows.append(row)
0491
0492     for it in important_times:
0493         if abs(t_min - it) <= MECH_DT_MIN/2:
0494             snapshots[round(t_min, 2)] = T.copy()
0495
0496     if abs(t_min - PREDICTION_END_MIN) <= MECH_DT_MIN/2:
0497         snapshots[round(t_min, 2)] = T.copy()
0498
0499     next_mech += MECH_DT_MIN
0500
0501     T, Tg, mask = thermal_step(T, rho, cp, ly, lz, t_s)
0502     t_s += DT_THERMAL_S
0503
0504     return y, z, Y, Z, T, rows, snapshots
0505
0506
0507 def save_section_composition():
0508     fig, ax = plt.subplots(figsize=(6.4, 5.2))
0509     for lay in layers():
0510         color = "#d8b365" if lay["mat"] == "OAK" else "#222222"
0511         ax.add_patch(Rectangle((-B_MM/2, lay["z0"]), B_MM, lay["z1"]-lay["z0"],
0512                                facecolor=color, edgecolor="black", linewidth=1))
0513         ax.text(0, 0.5*(lay["z0"]+lay["z1"]),
0514                f"{lay['name']}\n{lay['z1']-lay['z0']:.2f} mm",
0515                ha="center", va="center", fontsize=9)
0516     ax.set_aspect("equal")
0517     ax.set_xlim(-65, 65)
0518     ax.set_ylim(-5, H_MM+5)
0519     ax.set_xlabel("Šířka z [mm]")
0520     ax.set_ylabel("Výška y [mm]")
0521     ax.set_title("Predikční průřez: dubový GLULAM + PUR spáry")
0522     ax.grid(True, alpha=0.25)
0523     fig.tight_layout()
0524     fig.savefig(OUT_DIR/"01_skladba_prurezu_lamely_PUR.png", dpi=300)
0525     plt.close(fig)
0526
0527
0528 def save_load_scheme():
0529     x = np.linspace(0, L_MM, N_PLOT_X)
0530     M = moment_distribution(x)/1e6
0531     V = shear_distribution(x)/1000
0532
0533     fig, axs = plt.subplots(3, 1, figsize=(11.5, 8.2), sharex=True)
0534     axs[0].plot([0, L_MM], [0, 0], lw=8, solid_capstyle="butt")
0535     axs[0].scatter([0, L_MM], [-0.18, -0.18], marker="^", s=130, color="black")
0536     for xp in LOAD_X_MM:
0537         axs[0].annotate("", xy=(xp, 0.04), xytext=(xp, 0.70),
0538                        arrowprops=dict(arrowstyle=">", linewidth=1.7))
0539         axs[0].text(xp, 0.76, f"{P_KN:.2f} kN", ha="center", fontsize=8)
0540     axs[0].text(L_MM/2, -0.55, f"q = {Q_TOTAL_KN_M:.3f} kN/m", ha="center")
0541     axs[0].set_ylim(-0.8, 0.95)
0542     axs[0].set_yticks([])
0543     axs[0].set_title("Zatěžovací schéma predikčního modelu")
0544
0545     axs[1].plot(x, M)
0546     axs[1].set_ylabel("M [kN·m]")
0547     axs[1].set_title(f"Ohybový moment, Mmax = {np.max(M):.2f} kN·m")
0548     axs[1].grid(True, alpha=0.3)
0549
0550     axs[2].plot(x, V)
0551     axs[2].set_ylabel("V [kN]")
0552     axs[2].set_xlabel("x [mm]")
0553     axs[2].set_title(f"Posouvající síla, Vmax = {np.max(np.abs(V)):.2f} kN")
0554     axs[2].grid(True, alpha=0.3)
0555
0556     fig.tight_layout()
0557     fig.savefig(OUT_DIR/"02_zatizeni_moment_smyk.png", dpi=300)
0558     plt.close(fig)
0559
0560
0561 def plot_temp_field(ax, y, z, T, row=None, show_eff=True):
0562     im = ax.contourf(y, z, T, levels=42, cmap="inferno")
0563     if np.max(T) >= 300:
0564         ax.contour(y, z, T, levels=[300], colors="cyan", linewidths=1.8)
0565
0566     if row is not None and show_eff:
0567         dch = row["d_char_mm"]
0568         deff = row["d_eff_mm"]
0569         ax.add_patch(Rectangle((-B_MM/2+dch, dch), max(B_MM-2*dch, 0.1), max(H_MM-dch, 0.1),
0570                                fill=False, edgecolor="white", linewidth=1.3))
0571         ax.add_patch(Rectangle((-B_MM/2+deff, deff), max(B_MM-2*deff, 0.1), max(H_MM-deff, 0.1),

```

```

0572             fill=False, edgecolor="lime", linewidth=1.8))
0573     ax.set_aspect("equal")
0574     ax.set_xlabel("y [mm]")
0575     ax.set_ylabel("z [mm]")
0576     return im
0577
0578
0579 def save_temperature_final(y, z, T, rows):
0580     row = rows[-1]
0581     fig, ax = plt.subplots(figsize=(6.8, 6.2))
0582     im = plot_temp_field(ax, y, z, T, row=row)
0583     fig.colorbar(im, ax=ax, label="teplota [°C]")
0584     ax.set_title(f"2D teplotní pole v posledním predikovaném čase\n"
0585                 f"t={row['t_min']:.2f} min, ISO={row['T_iso_C']:.0f} °C, η={row['eta_strength']:.2f}")
0586     fig.tight_layout()
0587     fig.savefig(OUT_DIR/"03_teplotni_pole_pred_destrukci.png", dpi=300)
0588     plt.close(fig)
0589
0590
0591 def save_temperature_series(y, z, snapshots, rows):
0592     keys = sorted(snapshots.keys())
0593     if len(keys) > 8:
0594         idx = np.linspace(0, len(keys)-1, 8).astype(int)
0595         keys = [keys[i] for i in idx]
0596
0597     fig, axs = plt.subplots(1, len(keys), figsize=(3.1*len(keys), 4.0), sharey=True)
0598     if len(keys) == 1:
0599         axs = [axs]
0600
0601     last_im = None
0602     for ax, k in zip(axs, keys):
0603         T = snapshots[k]
0604         row = min(rows, key=lambda r: abs(r["t_min"]-k))
0605         last_im = plot_temp_field(ax, y, z, T, row=row, show_eff=True)
0606         ax.set_title(f"[k:.1f] min\η={row['eta_strength']:.2f}", fontsize=9)
0607         ax.set_xticks([])
0608
0609     axs[0].set_ylabel("z [mm]")
0610     fig.colorbar(last_im, ax=axs, shrink=0.82, label="teplota [°C]")
0611     fig.suptitle("2D časová série teplotního pole a účinného průřezu")
0612     fig.savefig(OUT_DIR/"04_teplotni_pole_serie_vice_obrazku.png", dpi=300, bbox_inches="tight")
0613     plt.close(fig)
0614
0615
0616 def draw_body(ax, x, w, row, title):
0617     wp = -w*VISUAL_DEFLECTION_SCALE
0618     h = row["h_eff_mm"]
0619     top = wp + h/2
0620     bottom = wp - h/2
0621
0622     ax.fill_between(x, -H_MM/2, H_MM/2, facecolor="none", edgecolor="0.65", linestyle="--",
0623                    label="původní obrys")
0624     ax.fill_between(x, bottom, top, facecolor="#d8b365", edgecolor="black", linewidth=0.8,
0625                    label="účinné těleso")
0626
0627     for rel in [-H_MM/6, H_MM/6]:
0628         ax.plot(x, wp+rel, color="black", lw=0.45, alpha=0.7)
0629
0630     if row["d_char_mm"] > 0:
0631         ax.fill_between(x, -H_MM/2, -H_MM/2+row["d_char_mm"], color="black", alpha=0.55)
0632
0633     for xp in LOAD_X_MM:
0634         ax.annotate("", xy=(xp, H_MM/2+8), xytext=(xp, H_MM/2+56),
0635                    arrowprops=dict(arrowstyle="→", linewidth=1.3))
0636     ax.scatter([0, L_MM], [-H_MM/2-25, -H_MM/2-25], marker="^", s=90, color="black")
0637
0638     ax.set_xlim(-90, L_MM+90)
0639     ax.set_xlabel("x [mm]")
0640     ax.set_ylabel("z [mm], průhyb zvětšený")
0641     ax.set_title(title)
0642     ax.grid(True, alpha=0.25)
0643
0644
0645 def save_deflection_comparison(z, T_final, rows):
0646     T_cold = np.full((len(z), int(B_MM/DY_MM)+1), 20.0)
0647     sec_stiff_cold = stiffness_layered_section(T_cold, z, 0.0)
0648     x, w_cold, wmax_cold = beam_deflection(sec_stiff_cold["EI"], sec_stiff_cold["GA"])
0649     row_cold = {"d_char_mm": 0, "d_eff_mm": 0, "b_eff_mm": B_MM, "h_eff_mm": H_MM}
0650
0651     row = rows[-1]
0652     sec_stiff_fire = stiffness_layered_section(T_final, z, row["d_eff_mm"])
0653     x, w_fire, wmax_fire = beam_deflection(sec_stiff_fire["EI"], sec_stiff_fire["GA"])
0654
0655     fig, axs = plt.subplots(2, 1, figsize=(12.2, 7.2), sharex=True)
0656     draw_body(axs[0], x, w_cold, row_cold, f"2D nosník - studený stav, wmax={wmax_cold:.1f} mm")
0657     draw_body(axs[1], x, w_fire, row, f"2D nosník - při destrukci dle f_m,model, t={row['t_min']:.2f} min,
0658                wmax={wmax_fire:.1f} mm")
0659     fig.tight_layout()
0660     fig.savefig(OUT_DIR/"05_2D_nosnik_pruhyb_studený_vs_destrukce.png", dpi=300)
0661     plt.close(fig)
0662
0663 def save_deflection_snapshots(z, snapshots, rows):
0664     keys = sorted(snapshots.keys())
0665     if len(keys) > 10:
0666         idx = np.linspace(0, len(keys)-1, 10).astype(int)

```

```

0667     keys = [keys[i] for i in idx]
0668
0669 fig, axs = plt.subplots(len(keys), 1, figsize=(12, 2.4*len(keys)), sharex=True)
0670 if len(keys) == 1:
0671     axs = [axs]
0672
0673 for ax, k in zip(axs, keys):
0674     T = snapshots[k]
0675     row = min(rows, key=lambda r: abs(r["t_min"]-k))
0676     sec = stiffness_layered_section(T, z, row["d_eff_mm"])
0677     x, w, wmax = beam_deflection(sec["EI"], sec["GA"])
0678     draw_body(ax, x, w, row, f"t={row['t_min']:.1f} min, wmax={wmax:.1f} mm, η={row['eta_strength']:.2f}")
0679
0680 fig.tight_layout()
0681 fig.savefig(OUT_DIR/"06_2D_nosnik_pruhyb_serie_v_case.png", dpi=300)
0682 plt.close(fig)
0683
0684
0685 def save_fire_curves(rows):
0686     t = np.array([r["t_min"] for r in rows])
0687
0688     fig, axs = plt.subplots(7, 1, figsize=(9.5, 15.5), sharex=True)
0689
0690     axs[0].plot(t, [r["T_iso_C"] for r in rows], label="ISO 834")
0691     axs[0].plot(t, [r["T_max_C"] for r in rows], label="Tmax v průřezu")
0692     axs[0].set_ylabel("T [°C]")
0693     axs[0].legend()
0694     axs[0].grid(True, alpha=0.3)
0695
0696     axs[1].plot(t, [r["d_char_mm"] for r in rows], label="d_char")
0697     axs[1].plot(t, [r["d_eff_mm"] for r in rows], label="d_eff")
0698     axs[1].set_ylabel("redukce [mm]")
0699     axs[1].legend()
0700     axs[1].grid(True, alpha=0.3)
0701
0702     axs[2].plot(t, [r["b_eff_mm"] for r in rows], label="b_eff")
0703     axs[2].plot(t, [r["h_eff_mm"] for r in rows], label="h_eff")
0704     axs[2].set_ylabel("rozměr [mm]")
0705     axs[2].legend()
0706     axs[2].grid(True, alpha=0.3)
0707
0708     axs[3].plot(t, [r["W_eff_mm3"] for r in rows])
0709     axs[3].set_ylabel("W_eff [mm³]")
0710     axs[3].grid(True, alpha=0.3)
0711
0712     axs[4].plot(t, [r["EI_stiff_Nmm2"] for r in rows])
0713     axs[4].set_ylabel("EI [Nmm²]")
0714     axs[4].grid(True, alpha=0.3)
0715
0716     axs[5].plot(t, [r["wmax_mm"] for r in rows])
0717     axs[5].axhline(D_LIM_MM, color="black", linestyle="--", linewidth=1, label="Dlim")
0718     axs[5].set_ylabel("wmax [mm]")
0719     axs[5].legend()
0720     axs[5].grid(True, alpha=0.3)
0721
0722     axs[6].plot(t, [r["eta_strength"] for r in rows])
0723     axs[6].axhline(1, color="black", linestyle="--", linewidth=1)
0724     axs[6].set_ylabel("η = σ/fm,model")
0725     axs[6].set_xlabel("čas [min]")
0726     axs[6].grid(True, alpha=0.3)
0727
0728     fig.suptitle("Predikce do destrukce podle návrhové pevnosti")
0729     fig.tight_layout()
0730     fig.savefig(OUT_DIR/"07_casove_prubehy_predikce_do_destrukce.png", dpi=300)
0731     plt.close(fig)
0732
0733
0734 def save_reduction_sections(rows):
0735     idx = np.linspace(0, len(rows)-1, min(8, len(rows))).astype(int)
0736     fig, axs = plt.subplots(1, len(idx), figsize=(3.0*len(idx), 4.0), sharey=True)
0737     if len(idx) == 1:
0738         axs = [axs]
0739
0740     for ax, i in zip(axs, idx):
0741         r = rows[i]
0742         dch = r["d_char_mm"]
0743         deff = r["d_eff_mm"]
0744
0745         ax.add_patch(Rectangle((-B_MM/2, 0), B_MM, H_MM, fill=False, edgecolor="0.5", linestyle="--"))
0746         ax.add_patch(Rectangle((-B_MM/2, 0), B_MM, dch, facecolor="black", alpha=0.55))
0747         ax.add_patch(Rectangle((-B_MM/2, 0), dch, H_MM, facecolor="black", alpha=0.55))
0748         ax.add_patch(Rectangle((B_MM/2-dch, 0), dch, H_MM, facecolor="black", alpha=0.55))
0749         ax.add_patch(Rectangle((-B_MM/2+deff, deff), max(B_MM-2*deff, 0.1), max(H_MM-deff, 0.1),
0750                                facecolor="#d8b365", edgecolor="black", linewidth=1))
0751
0752         for lay in layers():
0753             if lay["mat"] == "PUR":
0754                 z0 = max(lay["z0"], deff)
0755                 z1 = lay["z1"]
0756                 if z1 > z0:
0757                     ax.add_patch(Rectangle((-B_MM/2+deff, z0), max(B_MM-2*deff, 0.1), z1-z0,
0758                                            facecolor="black", edgecolor="none"))
0759
0760         ax.set_aspect("equal")
0761         ax.set_xlim(-55, 55)
0762         ax.set_ylim(-2, H_MM+4)

```

```

0763         ax.set_title(f"{r['t_min']:.1f} min\\n\\n={r['eta_strength']:.2f}", fontsize=9)
0764         ax.set_xticks([])
0765
0766         axs[0].set_ylabel("z [mm]")
0767         fig.suptitle("Redukce průřezu až do destrukce podle návrhové pevnosti")
0768         fig.tight_layout()
0769         fig.savefig(OUT_DIR/"08_redukce_prurezu_v_case_do_destrukce.png", dpi=300)
0770         plt.close(fig)
0771
0772
0773     def save_stress_strain_section(rows):
0774         r = rows[-1]
0775         h = r["h_eff_mm"]
0776         b = r["b_eff_mm"]
0777         z_cut = H_MM - h
0778         z = np.linspace(z_cut, H_MM, 200)
0779         z0 = z_cut + h/2
0780         y = z - z0
0781
0782         sigma = r["sigma_m_MPa"] * y / (h/2)
0783         eps = r["epsilon_bottom"] * y / (h/2)
0784
0785         fig, axs = plt.subplots(1, 2, figsize=(9, 5), sharey=True)
0786         axs[0].plot(sigma, z)
0787         axs[0].axvline(0, color="black", lw=0.8)
0788         axs[0].set_xlabel("σ [MPa]")
0789         axs[0].set_ylabel("z [mm]")
0790         axs[0].set_title("Lineární průběh napětí\\n\\npodle Hookeova zákona")
0791         axs[0].grid(True, alpha=0.3)
0792
0793         axs[1].plot(eps, z)
0794         axs[1].axvline(0, color="black", lw=0.8)
0795         axs[1].set_xlabel("ε [-]")
0796         axs[1].set_title("Lineární průběh deformace")
0797         axs[1].grid(True, alpha=0.3)
0798
0799         fig.suptitle(f"Stav při destrukci: t={r['t_min']:.2f} min, η={r['eta_strength']:.2f}")
0800         fig.tight_layout()
0801         fig.savefig(OUT_DIR/"09_Hooke_napeti_deformace_v_prurezu.png", dpi=300)
0802         plt.close(fig)
0803
0804
0805     def save_3d_deformed_single(z, T_final, rows):
0806         row = rows[-1]
0807         sec = stiffness_layered_section(T_final, z, row["d_eff_mm"])
0808         x, w, wmax = beam_deflection(sec["EI"], sec["GA"])
0809
0810         xs = x[:10]
0811         ws = w[:10]
0812         ys = np.array([-row["b_eff_mm"]/2, row["b_eff_mm"]/2])
0813         X, Y = np.meshgrid(xs, ys)
0814         W = np.tile(-ws*VISUAL_DEFLECTION_SCALE, (2, 1))
0815         Ztop = W + row["h_eff_mm"]
0816         Zbot = W
0817
0818         fig = plt.figure(figsize=(11.5, 6.2))
0819         ax = fig.add_subplot(111, projection="3d")
0820         ax.plot_surface(X, Y, Ztop, alpha=0.85, linewidth=0.2)
0821         ax.plot_surface(X, Y, Zbot, alpha=0.35, linewidth=0.2)
0822         ax.plot_surface(X, Y*0 + ys[0], (Ztop+Zbot)/2, alpha=0.20)
0823         ax.plot_surface(X, Y*0 + ys[1], (Ztop+Zbot)/2, alpha=0.20)
0824
0825         for xp in LOAD_X_MM:
0826             ax.quiver(xp, 0, H_MM+85, 0, 0, -48, arrow_length_ratio=0.25, linewidth=2)
0827
0828         ax.scatter([0, L_MM], [0, 0], [-30, -30], marker="^", s=80, color="black")
0829         ax.set_xlabel("x [mm]")
0830         ax.set_ylabel("y [mm]")
0831         ax.set_zlabel("z [mm]")
0832         ax.set_title(f"3D deformovaný nosník při destrukci dle návrhové pevnosti\\n\\n"
0833                     f"t={row['t_min']:.2f} min, w={row['wmax_mm']:.1f} mm, d_eff={row['d_eff_mm']:.1f} mm")
0834         ax.view_init(elev=20, azim=-62)
0835         ax.set_box_aspect((L_MM, B_MM*8, H_MM*5))
0836         fig.tight_layout()
0837         fig.savefig(OUT_DIR/"10_3D_deformovany_nosnik_destrukce.png", dpi=300)
0838         plt.close(fig)
0839
0840
0841     def save_3d_deformed_series(z, snapshots, rows):
0842         keys = sorted(snapshots.keys())
0843         if len(keys) > 7:
0844             idx = np.linspace(0, len(keys)-1, 7).astype(int)
0845             keys = [keys[i] for i in idx]
0846
0847         for key in keys:
0848             T = snapshots[key]
0849             row = min(rows, key=lambda r: abs(r["t_min"]-key))
0850             sec = stiffness_layered_section(T, z, row["d_eff_mm"])
0851             x, w, wmax = beam_deflection(sec["EI"], sec["GA"])
0852
0853             xs = x[:15]
0854             ws = w[:15]
0855             ys = np.array([-row["b_eff_mm"]/2, row["b_eff_mm"]/2])
0856             X, Y = np.meshgrid(xs, ys)
0857             W = np.tile(-ws*VISUAL_DEFLECTION_SCALE, (2, 1))
0858             Ztop = W + row["h_eff_mm"]

```

```

0859     Zbot = W
0860
0861     fig = plt.figure(figsize=(10.5, 5.8))
0862     ax = fig.add_subplot(111, projection="3d")
0863     ax.plot_surface(X, Y, Ztop, alpha=0.85, linewidth=0.2)
0864     ax.plot_surface(X, Y, Zbot, alpha=0.35, linewidth=0.2)
0865     for xp in LOAD_X_MM:
0866         ax.quiver(xp, 0, H_MM+85, 0, 0, -48, arrow_length_ratio=0.25, linewidth=1.7)
0867     ax.scatter([0, L_MM], [0, 0], [-30, -30], marker="^", s=70, color="black")
0868     ax.set_xlabel("x [mm]")
0869     ax.set_ylabel("y [mm]")
0870     ax.set_zlabel("z [mm]")
0871     ax.set_title(f"3D predikce - t={row['t_min']:.1f} min, η={row['eta_strength']:.2f}")
0872     ax.view_init(elev=20, azim=-62)
0873     ax.set_box_aspect([L_MM, B_MM*8, H_MM*5])
0874     fig.tight_layout()
0875     safe = str(key).replace(".", " ")
0876     fig.savefig(OUT_DIR/f"11_3D_serie_t_{safe}_min.png", dpi=300)
0877     plt.close(fig)
0878
0879
0880 def save_4d_gif(y, z, snapshots, rows):
0881     if imageio is None:
0882         return None
0883
0884     keys = sorted(snapshots.keys())
0885     frame_dir = OUT_DIR/"_frames_4D"
0886     frame_dir.mkdir(exist_ok=True)
0887
0888     files = []
0889     for n, key in enumerate(keys):
0890         T = snapshots[key]
0891         row = min(rows, key=lambda r: abs(r["t_min"]-key))
0892         sec = stiffness_layered_section(T, z, row["d_eff_mm"])
0893         x, w, wmax = beam_deflection(sec["EI"], sec["GA"])
0894
0895         fig, axs = plt.subplots(1, 2, figsize=(12.5, 5.4), gridspec_kw={"width_ratios": [1.75, 1.0]})
0896         draw_body(axs[0], x, w, row, f"4D: t={row['t_min']:.1f} min, w={wmax:.1f} mm, η={row['eta_strength']:.2f}")
0897         im = plot_temp_field(axs[1], y, z, T, row=row, show_eff=True)
0898         axs[1].set_title("Teplotní pole + redukce průřezu")
0899         fig.colorbar(im, ax=axs[1], shrink=0.80, label="°C")
0900         fig.tight_layout()
0901
0902         fp = frame_dir/f"frame_{n:03d}.png"
0903         fig.savefig(fp, dpi=135)
0904         plt.close(fig)
0905         files.append(fp)
0906
0907     imgs = [imageio.imread(p) for p in files]
0908     gif_path = OUT_DIR/"12_4D_gif_do_destrukce_teplotni_pole_pruhyb.gif"
0909     imageio.mimsave(gif_path, imgs, duration=0.42)
0910     return gif_path
0911
0912
0913 def nearest_row(rows, time_min):
0914     return min(rows, key=lambda r: abs(r["t_min"] - time_min))
0915
0916
0917 def save_eta_failure_marker(rows):
0918     t = np.array([r["t_min"] for r in rows])
0919     eta = np.array([r["eta_strength"] for r in rows])
0920     w = np.array([r["wmax_mm"] for r in rows])
0921
0922     fail_rows = [r for r in rows if r["eta_strength"] >= 1.0]
0923     fail = fail_rows[0] if fail_rows else rows[-1]
0924
0925     fig, axs = plt.subplots(2, 1, figsize=(9.5, 6.8), sharex=True)
0926
0927     axs[0].plot(t, eta, linewidth=2)
0928     axs[0].axhline(1.0, color="black", linestyle="--", linewidth=1.2)
0929     axs[0].axvline(fail["t_min"], color="black", linestyle=":", linewidth=1.2)
0930     axs[0].text(fail["t_min"], 1.03, f"první překročení únosnosti\n t={fail['t_min']:.2f} min",
0931                va="bottom", fontsize=9)
0932     axs[0].set_ylabel("η = σ / fm,model")
0933     axs[0].set_title("Rozlišení únosné a postkritické části predikce")
0934     axs[0].grid(True, alpha=0.3)
0935
0936     axs[1].plot(t, w, linewidth=2)
0937     axs[1].axvline(fail["t_min"], color="black", linestyle=":", linewidth=1.2)
0938     axs[1].set_ylabel("wmax [mm]")
0939     axs[1].set_xlabel("čas [min]")
0940     axs[1].grid(True, alpha=0.3)
0941
0942     fig.tight_layout()
0943     fig.savefig(OUT_DIR/"13_unosnost_vs_postkriticka_predikce.png", dpi=300)
0944     plt.close(fig)
0945
0946
0947 def save_comparison_failure_30min(y, z, snapshots, rows):
0948     fail_rows = [r for r in rows if r["eta_strength"] >= 1.0]
0949     fail = fail_rows[0] if fail_rows else rows[-1]
0950     final = rows[-1]
0951
0952     keys = sorted(snapshots.keys())
0953     k_fail = min(keys, key=lambda k: abs(k - fail["t_min"]))
0954     k_final = min(keys, key=lambda k: abs(k - final["t_min"]))

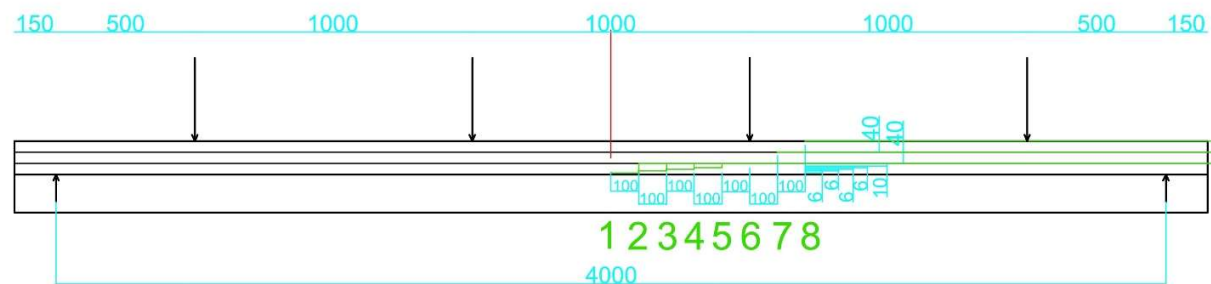
```

```

0955
0956     fig, axs = plt.subplots(1, 2, figsize=(9.5, 4.8), sharey=True)
0957
0958     im0 = plot_temp_field(axs[0], y, z, snapshots[k_fail], row=fail, show_eff=True)
0959     axs[0].set_title(f"první neúnosnost\\nt={fail['t_min']:.2f} min,  $\eta$ ={fail['eta_strength']:.2f}")
0960
0961     im1 = plot_temp_field(axs[1], y, z, snapshots[k_final], row=final, show_eff=True)
0962     axs[1].set_title(f"pokračování predikce\\nt={final['t_min']:.2f} min,  $\eta$ ={final['eta_strength']:.2f}")
0963
0964     fig.colorbar(im1, ax=axs, shrink=0.85, label="teplota [°C]")
0965     fig.suptitle("Porovnání: okamžik dosažení návrhové pevnosti vs. 30 min")
0966     fig.savefig(OUT_DIR/"14_porovnani_teplozni_pole_destrukce_vs_30min.png", dpi=300, bbox_inches="tight")
0967     plt.close(fig)
0968
0969
0970 def save_reduction_failure_30min(rows):
0971     fail_rows = [r for r in rows if r["eta_strength"] >= 1.0]
0972     fail = fail_rows[0] if fail_rows else rows[-1]
0973     final = rows[-1]
0974
0975     fig, axs = plt.subplots(1, 2, figsize=(8.8, 4.8), sharey=True)
0976
0977     for ax, r, label in zip(axs, [fail, final], ["první neúnosnost", "stav ve 30 min"]):
0978         dch = r["d_char_mm"]
0979         deff = r["d_eff_mm"]
0980
0981         ax.add_patch(Rectangle((-B_MM/2, 0), B_MM, H_MM, fill=False, edgecolor="0.5", linestyle="--"))
0982         ax.add_patch(Rectangle((-B_MM/2, 0), B_MM, dch, facecolor="black", alpha=0.55))
0983         ax.add_patch(Rectangle((-B_MM/2, 0), dch, H_MM, facecolor="black", alpha=0.55))
0984         ax.add_patch(Rectangle((B_MM/2-dch, 0), dch, H_MM, facecolor="black", alpha=0.55))
0985         ax.add_patch(Rectangle((-B_MM/2+deff, deff), max(B_MM-2*deff, 0.1), max(H_MM-deff, 0.1),
0986                               facecolor="#d8b365", edgecolor="black", linewidth=1.1))
0987
0988         ax.set_aspect("equal")
0989         ax.set_xlim(-55, 55)
0990         ax.set_ylim(-2, H_MM+4)
0991         ax.set_title(f"{label}\\nt={r['t_min']:.2f} min\\n"
0992                    f"d_eff={r['d_eff_mm']:.1f} mm,  $\eta$ ={r['eta_strength']:.2f}", fontsize=9)
0993         ax.set_xticks([])
0994
0995     axs[0].set_ylabel("z [mm]")
0996     fig.suptitle("Redukce průřezu: destrukce podle f_m,model vs. pokračování do 30 min")
0997     fig.tight_layout()
0998     fig.savefig(OUT_DIR/"15_redukce_destrukce_vs_30min.png", dpi=300)
0999     plt.close(fig)
1000
1001
1002 def save_csv_report(rows):
1003     csv_path = OUT_DIR/"00_predikce_do_30min_time_history.csv"
1004     with open(csv_path, "w", newline="", encoding="utf-8") as f:
1005         wr = csv.DictWriter(f, fieldnames=list(rows[0].keys()))
1006         wr.writeheader()
1007         wr.writerows(rows)
1008
1009
1010 def zip_outputs():
1011     zip_path = SCRIPT_DIR/f"{OUT_DIR.name}.zip"
1012     if zip_path.exists():
1013         zip_path.unlink()
1014     with zipfile.ZipFile(zip_path, "w", zipfile.ZIP_DEFLATED) as zf:
1015         for p in sorted(OUT_DIR.rglob("*")):
1016             if p.is_file():
1017                 zf.write(p, arcname=str(p.relative_to(SCRIPT_DIR)))
1018     return zip_path
1019
1020
1021 def main():
1022
1023     save_section_composition()
1024     save_load_scheme()
1025
1026     y, z, Y, Z, T_final, rows, snapshots = run_model()
1027
1028     save_csv_report(rows)
1029     save_temperature_final(y, z, T_final, rows)
1030     save_temperature_series(y, z, snapshots, rows)
1031     save_deflection_comparison(z, T_final, rows)
1032     save_deflection_snapshots(z, snapshots, rows)
1033     save_fire_curves(rows)
1034     save_reduction_sections(rows)
1035     save_stress_strain_section(rows)
1036     save_3d_deformed_single(z, T_final, rows)
1037     save_3d_deformed_series(z, snapshots, rows)
1038     save_4d_gif(y, z, snapshots, rows)
1039
1040     save_eta_failure_marker(rows)
1041     save_comparison_failure_30min(y, z, snapshots, rows)
1042     save_reduction_failure_30min(rows)
1043
1044     zip_outputs()
1045
1046
1047 if __name__ == "__main__":
1048     main(ĽS)

```

Příloha č. 17 Návrh rozmístění teplotních čidel v nosníku



Zelené linky označují průběh termočlánků

