

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ**

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Fakulta lesnická  
a dřevařská**

**PEVNOST LEPENÉHO DŘEVA V ZÁVISLOSTI NA  
STŘÍDAVÉM PŮSOBENÍ NÍZKÝCH A VYSOKÝCH TEPLOT**

**STRENGTH OF GLUED WOOD DEPENDING ON  
ALTERNATING EFFECTS OF LOW AND HIGH  
TEMPERATURES**

Disertační práce

v oboru

Protipožární ochrana lesa, dřevěných materiálů a materiálů na bázi dřeva

Autor: Ing. Tomáš Kytka

Školitel: doc. Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Praha

2024

# ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Tomáš Kytka

Protipožární ochrana lesa, dřevěných materiálů a materiálů na bázi dřeva

Název práce

**Pevnost lepeného dřeva v závislosti na střídavém působení nízkých a vysokých teplot**

Název anglicky

**Strength of glued wood depending on alternating effects of low and high temperatures**

---

## Cíle práce

Návrh lepeného dřeva pro konstrukční účely v závislosti na druhu dřeva a použitého lepidla

- Experimentální testování lepeného dřeva pro získání fyzikálních a mechanických vlastností ovlivněných změnou teploty a vlhkosti prostředí,
- Celkové zhodnocení závislosti pevnosti lepeného dřeva na střídavém vlivu různých teplot,
- Srovnání vhodnosti určitých typů lepeného dřeva pro rozdílné použití v závislosti na teplotě prostředí.

## Metodika

Následující metodika je navržena pro splnění cílů práce:

1. Analýza literárních poznatků o lepeném dřevě.
2. Návrh vhodné skladby lepeného dřeva z hlediska druhu dřeviny, typu lepidla, nánosu a použití.
3. Na základě standardizovaných testů a norem, ověřit fyzikální a mechanické vlastnosti lepeného dřeva v závislosti na různých typech lepidel a teplotách prostředí a jejich vzájemném střídání (nízké a vysoké teploty).
4. Vyhodnocení získaných dat z experimentů pomocí statistických metod (ANOVA, korelace) a zhodnocení vhodných typů lepidel pro konkrétní typy prostředí.
5. Výsledky a diskuze.
6. Shrnutí a závěry.
7. Doporučení pro vědu a praxi.

## Doporučený rozsah práce

90 – 120

## Klíčová slova

lepené dřevo, pevnost, střídání teplot, nízké teploty

---

## Doporučené zdroje informací

- AICHER, S., REINHARDT, H.-W., GARRECHT, H. Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology. Springer Science & Business Media, 2013, 819 s. ISBN: 978-94-007-7810-8
- AMBROSSE, J. Building Structures. 2nd ed., Hoboken: John Wiley & Sons, 1993, 701 s. ISBN: 0-471-54060-9
- BODIG, J., JAYNE, B. A. Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company New York, Cincinnati, Toronto, London, Melbourne, 1982, 712 s.
- HALPERIN, D. A., BIBLE, G. T. Principles of Timber Design for Architects and Builders. New York: John Wiley & Sons, 1994, 400 s. ISBN: 0-471-55768-4
- KOLB, J. Systems in Timber Engineering: Loadbearing Structures and Component Layers. 3rd ed., Basel: Birkhäuser Verlag AG, 2013, 318 p. ISBN: 978-3-0382-1444-1
- KOLLMANN, F. F. P., COTE, W. A. Jr. Principles of Wood Science and Technology: I. Solid Wood. Springer Science & Business Media, 2012, 592 s. ISBN: 978-3-642-87928-9
- KOLLMANN, F. F. P., KUENZI, E. W., STAMM, A. J. Principles of Wood Science and Technology: II. Wood Based Materials. Springer Science & Business Media, 2012, 703 s. ISBN: 978-3-642-87933-3
- SHIELDS, J. Adhesives Handbook. 3rd ed. rep., London: Butterworth & Co., 2013, 374 s. ISBN: 978-0-408-01356-7
- SMITH, I., LANDIS, E., GONG, M. Fracture and Fatigue in Wood. John Wiley & Sons Ltd., 2003, 234 s. ISBN: 978-0-471-48708-1
- 

## Předběžný termín

2020/21 LS – FLD – SDZ

## Vedoucí práce

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

## Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 13. 1. 2021

**Ing. Radek Rinn**

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 25. 8. 2022

**prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.**

Předseda oborové rady

Elektronicky schváleno dne 31. 8. 2022

**prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.**

Děkan

V Praze dne 06. 04. 2024

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Pevnost lepených spojů dřeva v závislosti na střídavém působení nízkých a vysokých teplot“ vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele. Souhlasím se zveřejněním disertační práce dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 6.5.2024

Ing. Tomáš Kytka

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval především svému školiteli, doc. Ing. Miroslavu Gašparíkovi, PhD. za jeho cenné rady, připomínky, čas a trpělivost. Velký dík patří také rodině a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu studia. Děkuji!

Vypracování disertační práce bylo umožněno díky finanční podpoře Interní grantové agentury Fakulty lesnické a dřevařské IGA FLD ČZU (IGA\_A\_20\_17) a společnosti Akzo Nobel N.A., která bezplatně poskytla lepidlo pro účely vypracování této práce.

## Abstrakt

Tato práce se zabývá možnostmi kombinace dřeva smrku (*Picea abies* (L.) H. Karst.), olše (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) a buku (*Fagus sylvatica* L.) pro použití v lepeném lamelovém dřevě vystavené působení teplotního namáhání (+60 °C, -25 °C) a jeho cyklickým působením. Dřeviny byly na základě kombinačního klíče sestaveny do homogenních kombinací (BK, OL, SM), nehomogenních symetrických kombinací (K2, K3, K5) a nehomogenních asymetrických kombinací (K1 a K4). Nosníky byly lepeny pomocí dvou adhesiv, PUR a RPF. Práce obsahuje dva způsoby modelování vlastností kombinovaných nosníků, verifikovaných pomocí experimentálních zkoušek. Hlavními sledovanými parametry je hustota, modul pružnosti, ohybová pevnost, smyková pevnost a vliv teploty na tyto parametry. Součástí práce je zjištění základních požárních charakteristik, zejména rychlost uvolňování tepla a rychlost úbytku hmoty.

Z výsledků je patrné, že analytický model vykazuje odchylku umístění neutrální osy do 5 % a při použití olše ve středových vrstvách model nadhodnocuje, zatímco při použití smrku, dochází k podhodnocování. Výsledek numerického modelu vykazuje průměrnou odchylku od reálných hodnot průhybu 1,1 mm, což odpovídá 9,6 %.

Z homogenních nosníků dosahoval nejvyšších hodnot modulu pružnosti (MOE) a ohybové pevnosti (MOR) bukový nosník, zatímco olšový dosahoval nejnižších. Kombinací dřevin došlo ke zvýšení MOE i MOR, přičemž nejlepších výsledků dosáhla kombinace K5. Z výsledků smykové pevnosti dosahovala nejvyšších hodnot kombinace buk-buk (BB) a nejnižší olše-olše (OO), která měla téměř dvojnásobně nižší smykovou pevnost než lepené bukové dřevo.

Hodnoty smykové pevnosti významně zvyšuje mrazení na -25 °C, zatímco u ohybových vlastností mají teplotní cykly významný vliv na modul pružnosti homogenních kombinací z buku a smrku. U kombinací dřevin je vliv cyklické změny teploty menší než u homogenních kombinací a není statisticky významný.

Z testování požárních charakteristik vyplývá značný vliv bukového dřeva v povrchových vrstvách nosníků a vliv použitého adhesiva. PUR adhesivum častěji podléhalo delaminaci vlivem působení zvýšené teploty.

## Klíčová slova

Lepené dřevo, pevnost, střídání teplot, nízké teploty.

## **Abstract**

This thesis deals with the possibilities of combining wood from spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.), alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) for use in glulam exposed to thermal stresses (+60 °C, -25 °C) and its cyclic influence. The wood species were assembled into homogeneous combinations (Beech, Alder, Spruce), inhomogeneous symmetrical combinations (K2, K3, K5) and inhomogeneous asymmetrical combinations (K1 and K4) based on a combination key. The beams were bonded using two adhesives, PUR and RPF. The work includes two ways of modelling the properties of the combined beams, verified by experimental tests. The main parameters studied are density, modulus of elasticity, bending strength, shear strength and the effect of temperature on these parameters. The work includes the determination of basic fire characteristics, e.g. heat release rate and mass loss rate.

Analytical model shows a deviation in the location of the neutral axis of no more than 5% and overestimates the model when alder is used in the middle layers, whereas when spruce is used, there is underestimation. The result of the numerical model shows an average deviation from the real deflection values of 1.1 mm (9.6 %).

Among the homogeneous beams, the beech beam had the highest modulus of elasticity (MOE) and bending strength (MOR) values, while the alder beam had the lowest. The combination of wood species increased both MOE and MOR, with the best results achieved by the K5 combination. In terms of shear strength results, the beech-beech (BB) combination achieved the highest values, and the alder-alder (OO) combination achieved the lowest values.

Shear strength was significantly increased by freezing at -25 °C, while for bending properties, temperature cycles have a significant effect on the elastic modulus of homogeneous beech and spruce combinations. For combined glulams, the effect of temperature cycling is lower than for the homogeneous combinations and is not statistically significant. The fire performance testing shows a significant influence of beech wood in the surface layers of the beams and the influence of the adhesive used. The PUR adhesive was more likely to undergo delamination due to higher temperatures.

## **Key words**

Glued laminated timber, strength, alternating temperatures, low temperatures.

## Obsah

1. Úvod.....	9
2. Hypotézy a cíle práce .....	11
3. Teoretický rozbor problematiky.....	12
3.1. Lepení dřeva.....	12
3.1.1. Podmínky ovlivňující lepení dřeva .....	13
3.1.2. Výhody a nevýhody lepení.....	15
3.1.3. Konstrukční lepidla pro lepení dřeva .....	17
3.1.4. Polyuretanová lepidla.....	20
3.1.5. Fenol-formaldehydová lepidla .....	22
3.1.6. Únavové chování lepeného dřeva .....	26
3.1.7. Tepelné zatížení lepeného dřeva .....	28
3.2. Dřevo a použité dřeviny .....	32
3.2.1. Olše lepkavá .....	34
3.2.2. Buk lesní.....	35
3.2.3. Smrk ztepilý .....	36
3.3. Lepené dřevo .....	37
3.4. Vlastnosti lepeného dřeva .....	44
3.4.1. Fyzikální vlastnosti lepeného dřeva .....	45
3.4.2. Mechanické vlastnosti lepeného dřeva.....	51
3.4.3. Kompozitní materiál – Laminátová teorie .....	59
3.4.4. Modelování vlastností lepeného dřeva.....	64
3.5. Hoření.....	66
3.5.1. Požární odolnost dřevěných konstrukčních prvků .....	73
3.5.2. Reakce na oheň .....	77
3.5.3. Zkušební metody požárních vlastností.....	79



4. Metodika .....	83
4.1. Materiálový model .....	84
4.2. Kombinační klíč .....	86
4.3. Výroba zkušebních těles .....	88
4.4. Teplotní cyklování .....	89
4.5. Zkušební metody fyzikálních a mechanických vlastností.....	90
4.6. Modelování vlastností nosníků .....	94
4.7. Hoření – kalorimetrická zkouška .....	99
5. Výsledky a diskuze .....	103
5.1. Hustota .....	103
5.2. Modul pružnosti .....	115
5.3. Ohybová pevnost.....	122
5.4. Analytický model .....	128
5.5. Numerický model.....	131
5.6. Podélná smyková pevnost při tahovém namáhání .....	134
5.7. Výsledky hoření .....	140
6. Závěr .....	148
Přínosy pro vědu .....	150
Přínosy pro praxi .....	151
Seznam obrázků a tabulek.....	152
Seznam zkratk .....	155
Seznam publikací .....	157
Seznam použitých zdrojů .....	159
Seznam příloh.....	186

## 1. Úvod

Lepené lamelové dřevo je moderní konstrukční materiál složený z jednotlivých lamel dřeva spojených lepidlem. Pro konstrukční účely musí jednotlivé lamely splňovat přísná kritéria, všeobecně shrnutá v pevnostních třídách. Lepené lamelové dřevo, často nazývané glulam, vychází z těchto tříd a uspořádání jednotlivých lamel podle pevnostních tříd. Lamely o vyšších pevnostních třídách jsou proto přednostně umísťovány do vnějších lamel, kde odolávají působení většího zatížení.

Tato práce reaguje na výše zmíněné požadavky, především kombinací dřevin, ve smyslu umístění lamel z listnatého dřeva do vnějších zón nosníku, kde plní funkci lamel o vyšší pevnostní třídě. Efekt vyztužení je patrný u všech navržených kombinací, což zvyšuje možnosti využití kombinovaných nosníků v praxi, jelikož se zvyšuje známý poměr cena × výkon.

Druhý efekt, který kombinované lepené lamelové dřevo vyzdvihuje je možnost lepení dostatečně pevných a únosných nosníků nejen z jehličnatého dřeva, především smrku. Olše se proto nabízí jako vhodný kandidát pro použití ve středových lamelách, kde dobře snáší nižší napětí, zatímco buk použitý ve vnějších lamelách lépe snáší větší namáhání. Smrkové porosty navíc v současné době decimuje sucho a kůrovcová kalamita. Tyto dva přírodní faktory doprovází ještě faktor lidský, kdy panuje všeobecná snaha o snížení zastoupení smrku v českých a moravských lesích a zvýšení druhové diverzity na přijatelnější úroveň bez smrkových monokultur.

Výše zmíněné důvody proto vedly ke vzniku této práce, která se zabývá lepeným lamelovým dřevem při použití kombinace dřevin (olše, smrku a buku), lepeným pomocí dvou druhů lepidla (polyuretanové a resorcinol fenol-formaldehydové), vystavené cyklickým změnám teplot a vysoké teplotě způsobující hoření.

Pro všechny tyto aspekty obsahuje disertační práce literární rozbor problematiky. První kapitolou je pojednání o lepidlech, podmínkách ovlivňující lepení, přes běžně používaná lepidla až po podrobně popsaná použitá lepidla. V této kapitole nechybí ani únavové chování lepeného dřeva a vliv teploty na mechanicko-fyzikální vlastnosti lepeného dřeva.

Druhou kapitolou je pojednání o použitých dřevinách, na což navazuje kapitola o lepeném dřevě všeobecně. Zde jsou popsány běžné druhy konstrukčních výrobků vzniklé slepením, zejména pak lepené lamelové dřevo.

Třetí kapitola se zabývá fyzikálními a mechanickými vlastnosti lepeného dřeva, zejména pak hustotou, vlhkostí a teplotou v sekci fyzikálních vlastností a modulem pružnosti, ohybovou a smykovou pevností v sekci mechanických vlastností. Tyto vlastnosti jsou doplněny o laminátovou teorii zabývající se vrstvenými kompozity, což bezesporu lepené lamelové dřevo je. Kapitola obsahuje i úvod do modelování.

Poslední teoretickou kapitolou je pojednání o hoření a procesech při hoření které se odrážejí do normativních požadavků vyžadovanými při stavbě jakéhokoliv objektu v ČR. Tato, tzv. reakce materiálu na oheň je klíčovým ukazatelem, jak se materiály chovají při požáru, na což navazuje pojednání o zkušebních metodách, které souhrnně představuje nejběžnější metody zjišťování reakce na oheň, případně termických vlastností.

Na teoretické kapitoly navazuje metodika práce, kde je souhrnně popsán způsob výběru použitých dřevin, vznik kombinačního klíče pro kombinované nosníky a samotná výroba nosníků. Metodika dále popisuje metody a způsoby cyklického teplotního namáhání, po němž následovalo otestování mechanických vlastností. Taktéž je zde popsán způsob testování reakce kombinací na oheň. Experimentální zkoušky doplňuje modelování modulu pružnosti nosníků.

Poslední důležitou kapitolou jsou pak výsledky a diskuze, kde jsou jednotlivé modely porovnávány s experimentálními výsledky, zejména modulem pružnosti, ohybovou pevností a v neposlední řadě kapitola obsahuje výsledky kalorimetrické zkoušky určující základní požární charakteristiky kombinovaného lepeného lamelového dřeva.

## **2. Hypotézy a cíle práce**

### **Hypotézy:**

- Vybrané listnaté dřeviny jsou vhodnou alternativou jehličnatým dřevinám při použití v lepeném lamelovém dřevě.
- Vhodným umístěním jednotlivých lamel lze zvýšit ohybové vlastnosti nosníků.
- Změna teploty ovlivňuje vybrané mechanické vlastnosti lepeného dřeva.

### **Cíle práce:**

Návrh lepeného dřeva pro konstrukční účely v závislosti na druhu dřeva a použitého lepidla:

- experimentální testování lepeného dřeva pro získání fyzikálních a mechanických vlastností ovlivněných změnou teploty a vlhkosti prostředí,
- celkové zhodnocení závislosti pevnosti lepeného dřeva na střídavém vlivu různých teplot,
- srovnání vhodnosti určitých typů lepeného dřeva pro rozdílné použití v závislosti na teplotě prostředí.

### 3. Teoretický rozbor problematiky

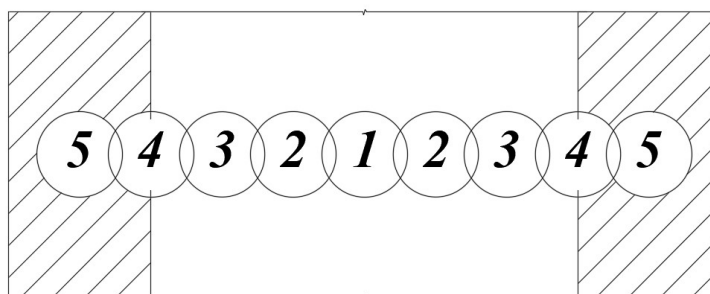
Tato kapitola se zabývá rozbohem problematiky lepeného lamelového dřeva. Součástí teoretického rozboru je pojednání o dřevinách použitých v experimentální části disertační práce, dále lepidlech, faktorech, které ovlivňují pevnost lepeného spoje, o teplotním a mechanickém zatěžování dřeva a hoření dřeva.

#### 3.1. Lepení dřeva

Lepením lze označit proces, při kterém vzniká nerozebíratelný spoj dvou přiléhajících povrchů (adherentů) pomocí lepidla (adhesiva). Lepení je komplexní proces, při kterém probíhá množství fyzikálně chemických dějů, na které neexistuje jedna univerzální definice. Všechna lepidla však mají společné vlastnosti, které charakterizují lepený spoj. Mezi základní dvě patří adheze a koheze (Mittal, 2015).

Za adhezi se všeobecně považuje přilnavost lepidla k lepenému povrchu. Ani zde však neexistuje jedna definice, nýbrž všeobecně uznávané modely, které se snaží vysvětlit interakci adhesiva a adherentu (Kumar a Pizzi, 2019). Mezi tyto modely patří mechanický, difúzní a elektrostatický mechanismus, dále acidobazická interakce, kovalentní vazba, vazba přes vodíkové můstky a vazba přes van der Waalovy síly. Interakci prvních dvou je možné charakterizovat jako „zapletení“ (entanglement), či vzájemné mechanické „zaháknutí“ (interlocking). Zbylé teorie pracují s elektrickým nábojem molekul, přičemž rozsah, v jakém tyto teorie pracují, je v řádech nanometrů až mikrometrů (Cognard, 2006).

Druhou vlastností, která charakterizuje lepený spoj, je koheze (soudržnost). Principem koheze je zajištění soudržností jednotlivých částí, molekul či látky vcelku. Toho je dosaženo na základě působení vnitřních kohezních sil, které jsou důsledkem vzájemného propojení molekul polymerů, iontových a kovalentních vazeb v materiálu a jednoduchých nebo dvojných vazeb mezi molekulami (viz obr. 1) (Dunky, 2017). Tyto dvě základní vlastnosti jsou ovlivňovány řadou dalších faktorů, zejména povahou a strukturou adhesiva a adherentu, jejich pórovitostí, vlhkostí, teplotou, drsností povrchu, dobou lepení, lisovacím tlakem, polaritou a s tím spojenou smáčivostí povrchu, objemovými kontrakcemi adhesiva při vytvrzování, čistotou povrchu, viskozitou lepidla a mnoha dalšími (Rudawska, 2016).



Obr. 1 Oblasti adheze a koheze lepeného spoje (Kamke a Lee, 2007)

kde 1 je oblast čistého lepidla, 2 je okrajová oblast lepidla, která nemusí být homogenní, 3 je rozhraní mezi adhesivem a adherentem kde probíhá adheze, 4 je oblast buněk dřeva penetrována adhesivem a 5 je oblast čistého dřeva.

### 3.1.1. Podmínky ovlivňující lepení dřeva

Struktura dřeva je z přirozené podstaty dříve živého organismu velmi různorodá. Do procesu lepení proto vstupují faktory jako hustota, pórovitost, uspořádání pórů ve dřevě a jejich velikost a orientace letokruhů vzhledem k lepené ploše (Muñoz a Lorenzo, 2022). Velikosti těchto faktorů jsou unikátní pro každou dřevinu. Zejména kruhovitě pórovité dřeviny, jako je dub, akát, jasan nebo jilm, mají velké póry, které ovlivňují kvalitu lepené spáry (Petrie, 2007).

Podle teorie zohledňující mechanický model adheze je taková struktura výhodou, jelikož lepidlo má možnost zatéct do těchto pórů a vytvrdnout, čímž vytvoří požadované „zámky“, které zvyšují pevnost lepeného spoje. Na druhou stranu se tím sníží objem lepidla v lepené spáře, což může mít za následek tzv. „chudý spoj“, který vykazuje nižší pevnost (Vaněrek et al., 2017). Roztroušeně pórovité dřeviny mají póry menší a navíc uspořádány homogenněji po celé šířce letokruhu (Kamke a Lee, 2007). Jehličnaté dřeviny postrádají oproti listnatým cévy a librifonní vlákna, což se projevuje v nižší pevnosti dřeva samotného. Do lepeného spoje však vstupují jehličnaté dřeviny z hlediska struktury podobně jako listnaté (Borrega a Kärenlampi, 2011).

Další důležitý faktor, který vstupuje do procesu lepení, je chemické složení dřeva. Dřevo je komplex chemických látek, přičemž největší podíl tvoří celulóza, hemicelulózy a lignin (Čabalová et al., 2021). Pro lepení dřeva má významný vliv polární charakter celulózy a hemicelulóz, který je dán přítomností hydroxylových (–OH) skupin. Tyto skupiny dávají dřevu polární povahu, což je klíčový faktor pro interakci s adhezními silami polárních lepidel (Heinze, 2016).

Důležitý je ale i obsah vedlejších složek (3–10 %) v podobě extraktivních látek typu pryskyřic, tříslovin a vosků, které ovlivňují smáčivost povrchu dřeva lepidlem, čímž mohou snižovat kvalitu lepených spojů (Bockel et al., 2019). Kvalitu lepeného spoje ovlivňuje i chemické složení samotného lepidla. Zejména kyselá lepidla, jako jsou např. fenolická lepidla, mohou narušovat dřevo v okolí lepeného spoje kvůli svým silně kyselým tvrdidlům. Možné související degradační reakce mohou mít opět negativní dopad na pevnost spoje (Zhang et al., 2010). Alkalická lepidla mohou na druhou stranu reagovat s tříslovinami a dalšími látkami ve dřevě, což může způsobit nežádoucí zbarvení dřeva a lepené spáry (Huang et al., 2010). Podobný účinek, jako alkalická lepidla, mohou mít i roztoky solí železa, které i při nízké koncentraci mohou způsobit zbarvení dřeva do tmavě modrých nebo fialových odstínů (Aires, 2020).

Dalším důležitým faktorem je vlhkost dřeva. Dřevo je hygroskopický materiál, který absorbuje vlhkost z okolního prostředí (Shirmohammadi, 2023). Většina lepidel se aplikuje ve formě vodných roztoků, a proto musí být tato voda buď absorbována dřevem nebo odpařena do okolního prostředí, aby mohlo lepidlo dokonale vytvrdnout (Gollob a Wellons, 1990). Příliš vysoká vlhkost ve dřevě může tyto procesy zpomalit nebo je dokonce znemožnit. Zvýšená vlhkost však může být i žádoucí, kdy například lepidla na bázi polyuretanu reagují na zvýšenou vlhkost snížením doby vytvrzování (Wimmer et al., 2013). Změna obsahu vlhkosti také vede k bobtnání a sesychání dřeva (Hassani et al., 2016).

Lepený spoj ve dřevě může působit jako bariéra pro přenos vlhkosti, což vede k vysokému gradientu vlhkosti kolem spoje (Mannes et al., 2014). Toto nerovnoměrné rozložení vlhkosti vytváří další napětí v lepeném spoji a může vést k selhání, např. v podobě delaminace (Afshari a Malek, 2022). Vliv vlhkosti na kvalitu lepené spáry řeší i norma ČSN EN 302-2 (2018) zabývající se delaminací lepené spáry vlivem nárůstu vlhkosti. Při lepení by měla být vlhkost dřeva udržována kolem 8 %, přičemž by neměla klesnout pod 4 % a přesáhnout 12 %, nebo podle doporučení výrobce lepidla.

Pro optimální smáčení povrchu dřeva molekulami lepidla je zásadní i kvalita povrchu, jeho opracování a čistota, kterou ovlivňuje zejména mastnota a prach. Pro vytvoření kvalitního lepeného spoje je důležité zajistit těsný kontakt mezi lepenými plochami, což klade vysoké nároky na jejich povrchovou úpravu (Luedtke et al., 2015). Povrch dřeva musí být pečlivě upraven s minimálními odchylkami v tloušťce, jelikož vysoká drsnost povrchu snižuje pevnost lepeného spoje pro většinu moderních lepidel (Sogutlu, 2017).

Dalším aspektem, který ovlivňuje kvalitu povrchu, resp. lepeného spoje, je stáří povrchu, resp. jeho oxidace (Clerc et al., 2017). Taktéž smáčivost povrchu, a s tím spojená polarita adhesiva a adherentu, vykazuje velký vliv na kvalitu lepeného spoje (Nussbaum a Sterley, 2002). V dnešní době se však nabízí řešení ve formě tzv. primerů, tedy látek, které upravují povrch dřeva a zvyšují adhezi lepidla k materiálu (Böger et al., 2022).

Další faktory, které ovlivňují kvalitu lepeného spoje, lze souhrnně nazvat „Technologické podmínky lepení“. Mezi tyto podmínky patří teplota při lisování, lisovací tlak a čas (Petrie, 2007). Specifické hodnoty těchto faktorů jsou uvedeny v technických pokynech pro každý typ lepidla a je nezbytné je dodržovat, aby byla zajištěna požadovaná kvalita lepeného spoje.

Teplota při lisování má vícero funkcí, zejména však pomáhá prohřívat lepený materiál i lepidlo samotné, čímž urychluje tuhnutí lepidla, čili jeho přechod z kapalné a pevné fáze (Obucina et al., 2015). Lisovací tlak zabezpečuje přiblížení lepených ploch a vznik mezimolekulárních přitažlivých sil. Hodnota lisovacího tlaku závisí na druhu lepidla a teplotě při lepení (Mohd Yusof et al., 2019) a musí být aplikován až do doby, než lepidlo dosáhne tzv. manipulační pevnosti lepeného spoje. Během této doby vznikne množství přitažlivých sil, což umožňuje vyjmutí lepených předmětů z lisu bez rizika poškození spoje (Kumar a Pizzi, 2019). Nicméně v této fázi není lepený spoj ještě dokonale vytvrzený a nedosahuje požadované konečné pevnosti. Proto se lepené spoje následně klimatizují. Navíc, během lepení dřeva se vlhkost v okolí lepené spáry zvyšuje vlivem absorpce vody (či jiného rozpouštědla) z lepidla, což může vést k tvorbě napětí a potenciálně deformaci materiálu (Sterley et al., 2012). Proces klimatizace lepeného spoje zajišťuje, že se přebytečná vlhkost odpaří nebo bude využita pro další polymeraci lepidla, čímž se vyrovnávají napětí. Klimatizace se provádí za normální pokojové teploty, a doba potřebná k tomuto procesu závisí na druhu použitého lepidla (Tran et al., 2020).

### **3.1.2. Výhody a nevýhody lepení**

Lepení je metoda spojování dvou materiálů do jednoho celku. A jako taková s sebou nese řadu výhod, ale i nevýhod. Rozlišení toho, co je přesně výhoda a nevýhoda, je často předmětem diskuzí, jelikož vždy záleží na očekávaném výsledku použití lepidla. Lepidla často nahrazují jiné formy spojů, a to zejména u kovů a plastů, nicméně pro spojování dřeva nabízí lepidlo velmi dobrou náhradu konstrukčních spojů.



Mezi hlavní výhody lepení dřeva patří zejména fakt, že vytváří pevné a trvalé spojení dvou, nebo více dílců v jeden celek (Petrie, 2007). Tento spoj je navíc charakteristický tím, že poskytuje velkou plochu, přes kterou se rozkládá napětí působící na lepený spoj (Ülker, 2016). Vysokou pevnost si lepený spoj zachovává nejen při jednorázovém krátkodobém namáhání, ale také v cyklickém zatížení, kdy si zachovává vysokou únavovou pevnost (Bachtiar et al., 2017). Lepený spoj ze své podstaty „mezivrstvy“ mezi dvěma materiály tvoří vrstvu, která je schopná tlumit vibrace a nárazy.

Lepení také umožňuje spojovat i různorodé materiály o různých rozměrech, jelikož lepený spoj nenarušuje integritu spojovaných dílců (Kumar a Pizzi, 2019). Spoj je možné vyrobit i ve vodovzdorném nebo plynotěsném provedení, což zvyšuje možnosti použití i do oblastí, kterým dříve dominovalo mechanické spojování pomocí konstrukčních spojů (De Almeida et al., 2014). Lepená spára je ve většině případů průhledná či v podobném odstínu jako spojované materiály, čímž nenarušuje estetickou stránku lepeného výrobku (Muthike a Githiomi, 2011).

Lepený spoj je v dnešní době často používán jako levnější varianta klasického mechanického spoje. Aplikace zejména jednosložkových lepidel je snadná a rychlá, což zvyšuje flexibilitu a vyžaduje méně pracovního prostoru ve srovnání s konvenčním mechanickým spojením. Lepidla taktéž mohou ze své chemické podstaty tvořit izolační vrstvu proti korozi, která může negativně ovlivnit životnost materiálu a snížit tak pevnost lepeného spoje (Das et al., 2020). S pevností lepeného spoje je spojena i hmotnost spoje. Lepení dosahuje výborného poměru pevnosti ku hmotnosti spoje, čímž téměř nezvyšuje hmotnost oproti spojovacím prostředkům. Další úpravou složek vícesložkového lepidla je možné docílit dalšího zvýšení pevnosti lepeného spoje bez znatelného zvětšování objemu (Li et al., 2023).

Všechny výše uvedené výhody jsou však vyváženy i nevýhodami, které mají mnohdy dalekosáhlý dopad na charakteristiku a životnost spoje, a proto je často vhodnější použití mechanického spojení prvků pomocí jiného způsobu či spojovacích prostředků (Dhakar, 2020). Mezi tyto hlavní nevýhody lepení patří zejména nároky na kvalitu a rovinnost povrchu. Lepený spoj vyžaduje čistý povrch, bez prachu a mastnoty (Tumirah et al., 2017). To souvisí s tím, že většina lepidel je polárního charakteru a u materiálů, jako jsou kovy nebo nepolární plasty, je třeba upravit povrch před lepením upravit například pasivováním, nebo dalšími metodami, což může prodražovat lepený spoj oproti konvenčním metodám spojování (Herzele et al., 2020; Wu et al., 2021).

S cenou je spojený i čas, který průmyslová lepidla mohou vyžadovat delší, přičemž nejvíce času se spotřebuje na vyzrání a klimatizování lepeného spoje, aby dosáhl maximální pevnosti. Tyto časy lze snížit, nicméně za cenu přivedení zvýšené teploty a tlaku do lisů, což opět prodražuje výrobu (Bardak et al., 2016). Proces lepení může být náročný i na strojní vybavení a přípravky, zejména u dvousložkových lepidel, které často vyžadují nanášení v oddělených nanášečkách, aby nedocházelo k předčasnému vytvrzování. S obsluhou těchto zařízení se váže i nutná kvalifikace pracovníků, jelikož je obvykle vyžadována přísná kontrola celého procesu (Pizzi a Mittal, 2011).

Lepidla sama o sobě přináší řadu výzev, zejména vliv na životní prostředí a uvolňování VOC látek do ovzduší, především pak formaldehydu, který je prokázaným karcinogenem (WHO, 2006; Zhang et al., 2018). Další častou nevýhodou je životnost lepeného spoje. Především u dřeva a materiálů na bázi dřeva je pevnost a trvanlivost lepeného spoje ovlivněna podmínkami, ve kterých se spoj nachází. Časté bobtnání a sesychání může vést k vnitřnímu pnutí, které se prohlubuje s vyšším vlhkostním spádem. Toto pnutí může způsobit vznik vnitřních trhlin (Uzelac Glavinic et al., 2020).

S vlhkostí se pojí i teplota vnějšího prostředí, do kterého je spoj umístěn. Lepené spoje, které využívají termoplastických lepidel, mohou být náchylné k trvalému statickému namáhání, jelikož polymerní složka lepidla může podléhat tečení (Ramachandrareddy et al., 2022). Nicméně lepidla jsou všeobecně známá tím, že nemají příliš vysokou odolnost vůči zvýšeným teplotám, protože mohou způsobovat měknutí molekul lepidla a snižovat tak pevnost lepeného spoje (Tam et al., 2017). Taktéž způsob nechanického namáhání má velký vliv na pevnost lepeného spoje, jelikož při působení zatížení kolmo na plochu dochází k odlupování spoje (Oñate et al., 2023).

Všechny kladné nebo záporné aspekty je vždy třeba zohlednit při navrhování lepeného spoje. Lepený spoj, který je vhodně navržený, může dlouhodobě vykazovat vysokou pevnost, nicméně je-li vystaven faktorům, které spoj oslabují, může docházet k jeho předčasnému porušení.

### **3.1.3. Konstrukční lepidla pro lepení dřeva**

Lepení dřeva je známo již od starověkého Egypta (okolo 3500 př.n.l.), nicméně až po rozmachu chemického průmyslu po roce 1945 se začínají objevovat syntetická lepidla, jak je známe dnes (Eckelman, 1999). Vývoj v oblasti lepidel prošel dlouhým vývojem. Za milník lze považovat počátek 20. století, kdy se začínají objevovat první fenol-formaldehydová (PF) lepidla.

S pokrokem v chemickém průmyslu se s každou další dekádou objevovaly nové druhy lepidel, zejména močovino-formaldehydová (UF), polyvinylacetátová (PVAc), melamin-formaldehydová (MF), polyuretanová (PUR), epoxidová (EP) a mnoho dalších (Petrie, 2007).

Přibližně 95 % všech lepidel na dřevo používaných v dřevěných kompozitech je na bázi formaldehydu. Nejpoužívanějšími lepidly v deskových materiálech na bázi dřeva jsou močovino-formaldehydové (UF) pryskyřice, které celosvětově představují přibližně 85 % celkového objemu, následované melaminem a fenoly (Kumar a Pizzi, 2019). V roce 2020 byla největším spotřebitelem lepidel na bázi formaldehydových pryskyřic kontinentální Čína, na kterou připadala téměř polovina celkové spotřeby pryskyřic (IHS Markit, 2020). Průmyslová dominance UF pryskyřic, jejichž roční spotřeba se celosvětově odhaduje na přibližně 11 milionů tun (Kumar a Pizzi, 2019), je způsobena jejich vysokou reaktivitou, vynikajícími adhezními vlastnostmi, rozpustností ve vodě, poměrně nízkými teplotami vytvrzování, krátkou dobou lisování, snadnou manipulací a relativně nízkými náklady (Zhao et al., 2011). Hlavní nevýhodou těchto termosetických aminopryskyřic je nižší odolnost proti vodě, což omezuje použití desek na bázi dřeva lepených lepidly na bázi UF pryskyřic na interiérové aplikace (Kristak et al., 2023).

Reakcí na zvýšení odolnosti proti vodě bylo využití melamin-formaldehydových (MF) pryskyřic. Tyto látky rovněž spadají do kategorie aminoplastických pryskyřic, což zapříčiňuje jejich vysokou tvrdost a tuhost, vysokou odolnost proti vlhkosti, dobrou tepelnou stabilitu, vysokou odolnost proti oděru, vynikající odolnost proti varu, retardační vlastnosti vzhledem k hoření a hladkost a průhlednost povrchu, což předurčuje MF pryskyřice k širokému průmyslovému využití (Ullah et al., 2014).

Mimo lepidel na dřevo našly MF pryskyřice uplatnění v podlahových a dekorativních laminátech, formovacích hmotách a nátěrech (Merline et al., 2013). MF pryskyřice patří mezi nejpoužívanější lepidla na bázi aminů pro výrobu desek na bázi dřeva, jako jsou překližky, dřevotřískové desky, MDF, desky z orientovaných třísek (OSB) a další, zejména pro exteriérové a semi-exteriérové aplikace (například konstrukce kryté střechou), a to díky jejich lepším adhezním vlastnostem, lepší odolnosti proti vlhkosti a nižším emisím formaldehydu ve srovnání s UF pryskyřicemi (Iswanto et al., 2017). Vzhledem k vysoké ceně MF lepidla byly vyvinuty MUF pryskyřice s přidavkem určitého množství močoviny, aby se snížily výrobní náklady. MUF pryskyřice se vytvrzují pomocí tvrdidel, jako jsou amonné soli nebo kyseliny. Nevýhodou těchto lepidel je však zvýšený únik formaldehydu než v případě UF lepidel (Park et al., 2021).

Mezi další hojně rozšířená lepidla patří polyvinylacetátová lepidla (PVAc), která jsou založena na bázi disperze molekul PVAc ve vodě. Vytvrzují se ztrátou vlhkosti, přičemž se molekuly srážejí a vytvářejí souvislý pevný film. PVAc lepidla mají dobrou přilnavost ke dřevu a k materiálům na bázi dřeva a jejich výhodou je, že se jedná o jednosložkové systémy s dlouhou skladovatelností a životností (Iždinský et al., 2021). Výhodou těchto lepidel je poměrně rychlé vytvrzování při pokojové teplotě, obvykle okolo 15–30 minut při dobrých podmínkách, což ovlivňuje zejména obsah vlhkosti v lepených dílcích a tloušťka lepícího filmu, které lze urychlit teplem. Velkou nevýhodou PVAc lepidel je jejich termoplastický charakter, což znemožňuje jejich použití do konstrukčních prvků, jelikož při zvýšené teplotě, zejména pak požáru, by mohlo dojít k delaminaci lepeného spoje (Rudawska, 2016).

Poslední skupinou běžně používaných lepidel jsou epoxidová lepidla, která byla poprvé komerčně dostupná v roce 1946 pro použití v automobilovém a leteckém průmyslu. Epoxidová lepidla nabízejí širokou škálu použití zejména z důvodu dobré přilnavosti na většinu povrchů a možnosti snadné úpravy složení k docílení požadovaných vlastností (Petrie, 2007). Epoxidová lepidla jsou charakteristická svou vysokou pevností ve smyku, odolností proti mastnotě, vlhkosti a rozpouštědlům. Taktéž vykazují nízké smršťování během vytvrzování a odolnost proti tečení (creepu) při dlouhodobému zatížení. Nevýhodou těchto lepidel je pak relativně vysoká cena oproti ostatním lepidlům, nízká pevnost proti odlupování, tuhost a náchylnost na degradaci vlivem UV záření (Ahmad et al., 2012; Liu et al., 2014). Většina epoxidů je založená na použití Bisfenol A-diglycidyletheru ( $C_{21}H_{24}O_4$ ), který může mít potenciální mutagenní a karcinogenní účinky na živé organismy (Kang et al., 2006; Michałowicz, 2014). Z těchto důvodů probíhají výzkumy za účelem nahrazení této látky jinými, méně škodlivými látkami, které jsou obsaženy například v odpadním ligninu vznikajícím při výrobě buničiny nebo bioethanolu (Van de Velde et al., 2021).

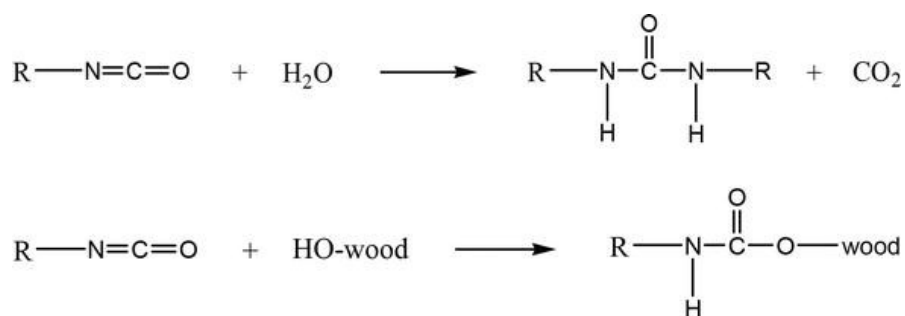
Z těchto lepidel jsou pro konstrukční použití nejčastější lepící systémy založené na melamin-formaldehydu (MF) nebo melamin-močovinně-formaldehydu (MUF) (51 %), následované polyuretanovými (PUR) lepidly (35 %) a lepidly na bázi resorcinolu (RPF) (9 %) (Ohnesorge et al., 2009). Právě poslední dvě zmíněné jsou předmětem této práce a bude jim věnována větší pozornost.

### 3.1.4. Polyuretanová lepidla

Mezi nejvýznamnější lepidla ve dřevozpracujícím průmyslu patří bezesporu polyuretanová lepidla (PUR), která prošla dlouhým vývojem a v dnešní době nalézají své využití i v konstrukčních materiálech ze dřeva.

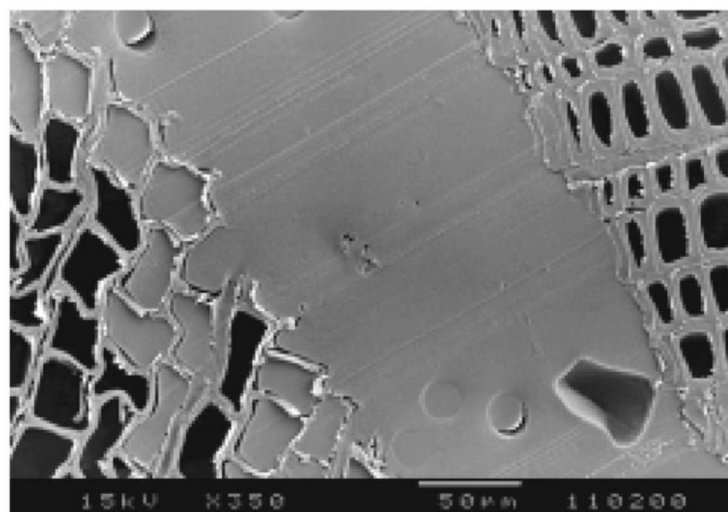
Polyuretany jsou extrémně velké a komplexní molekuly produkované kombinací velkého počtu jednodušších molekul nazývaných monomery. Monomery jsou sloučeniny, jejichž vlastnosti (molekulová hmotnost, teplota varu, teplota tání, krystalinita, atd.) jsou diskrétní. Polyuretany na druhou stranu obvykle nemají diskrétní vlastnosti, ale mají průměrné vlastnosti, které představují řadu molekul s odlišnou molekulovou hmotností a často mírně odlišnou strukturou (Kumar a Pizzi, 2019).

Nejstarší typy jednosložkových PUR lepidel byly založeny na di- nebo triisokyanátech, které vytvrzovaly reakcí s aktivními vodíky na povrchu adherentu nebo vlhkostí (Petrie, 2007). Voda reaguje s isokyanátovými skupinami za vzniku močovinové a biuretové vazby (viz obr. 2), čímž dochází k nárůstu molekulové hmotnosti a adhezních vlastnosti (Beaud et al., 2006). Prepolymery se také používají buď jako 100% pevné látky nebo jako jednosložková lepidla na bázi roztoků (Szycher, 2012).



Obr. 2 Reakce isokyanátu (-NCO) s vodou a dřevem obsahujícím vodu za vzniku uretanových vazeb a oxidu uhličitého (Nuryawan et al., 2017)

Polyuretanová lepidla existují ve dvou systémech, a to jako jednosložková polyuretanová (1C PUR) (viz obr. 3) nebo dvousložková polyuretanová (2C PUR) lepidla (Zheng et al., 2007). 1C PUR vyžaduje určitý minimální obsah vlhkosti dostupný v adherentu a před lepením se často používá v kombinaci s promotorem adheze (základním nátěrem - primerem) (Rudawska et al., 2017). Výhodou 2C PUR je reakce prostřednictvím obou složek, polyolu a isokyanátu. Dále může být polyolová složka do značné míry modifikována, protože před míšením nereaguje. 2C PUR proto představuje zajímavou alternativu k lepidlovým systémům bez obsahu formaldehydu v konstrukcích (Ren a Frazier, 2012).



Obr. 3 Snímek lepené spáry smrkového dřeva vyplněného PUR lepidlem ze skenovacího elektronového mikroskopu (Wang et al., 2015)

Jelikož Světová zdravotnická organizace (WHO) uvedla formaldehyd jako látku způsobující rakovinu (WHO, 2006), je použití adhezivních systémů obsahujících formaldehyd pod tlakem. Proto průmysl aktivně hledá bezformaldehydové lepicí systémy nebo systémy se sníženým obsahem formaldehydu, jako jsou moderní melamin-močovino-formaldehydové systémy (MUF) (Bockel et al., 2019).

Pro jednosložková polyuretanová lepidla (1C PUR) stanovuje evropská norma ČSN EN 15425 (2017) limitní hodnoty pro tahovou pevnost ve smyku (tensile shear strength - TSS) v suchém a mokřém stavu. Dosavadní spoje s 1C PUR prošly všemi požadavky pro testování v suchém stavu, avšak mají problémy s překonáním normovaných hodnot ve vlhké fázi (Brandmair et al., 2012).

Zlepšení adhezivních podmínek pro polyuretanová lepidla prošla dlouhým vývojem. Mezi nejvýznamnější lze zařadit zejména úpravu samotného povrchu lepeného materiálu pomocí vody, nebo různých chemických činidel. Voda může být jedním z nejjednodušších primerů. Podle Beauda et al. (2006) je postřik vodou užitečný zejména pokud je okolní relativní vlhkost vzduchu nízká, což vede k rychlému vysušení povrchových vrstev dřevěných materiálů. Další látkou používanou pro zlepšení adheze je nátěr polární látkou, která je schopna zvýšit míru bobtnání dřeva více než voda. Touto látkou může být např. N,N-dimethylformamid (DMF), který způsobuje zpřístupnění –OH skupin v adherentu, což ve smyslu teorie adheze pomocí vodíkových můstků zvyšuje konečnou adhezi lepidla k povrchu (Kläusler et al., 2014). DMF sice značně zvyšuje smáčivost lepeného povrchu, nicméně je toxický (Kläusler et al., 2014a).

Z tohoto důvodu se hledala náhrada, která by byla méně toxická. Možný kandidát byl objeven v hydroxymethylovaném resorcinolu (HMR). Nátěr tímto vazebným činidlem byl vynalezen v 90. letech 20. století (Vick a Okkonen, 2000). Výhodou tohoto nátěru je výrazné zlepšení pevnosti lepených spojů pomocí 1C PUR a MUF adhesiv ve vlhkém stavu a rovněž pomáhá snižovat velikost případné delaminace (Aicher a Ohnesorge, 2011; Böger et al., 2022). Zavádí však formaldehyd do procesu lepení a vyžaduje určité pracovní kroky v rámci procesu lepení (Frihart et al., 2023).

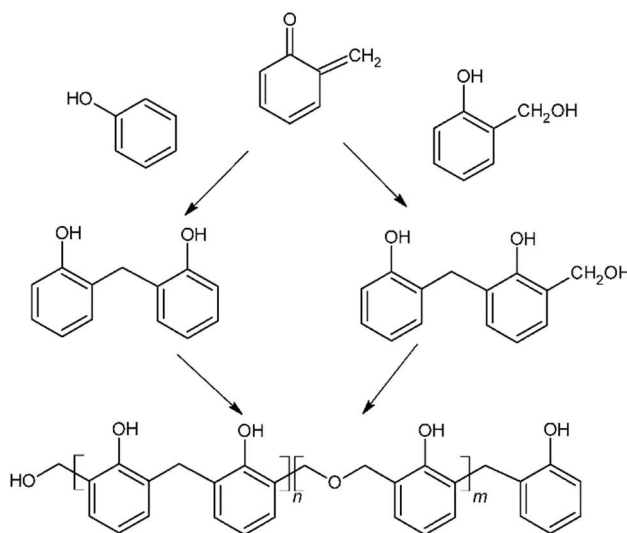
Jelikož panuje všeobecná snaha o odstranění formaldehydu z lepidel, obrátila se pozornost na další látku, kterou je polymerizovaný 4,4-methylen-difenyl diisokyanát (pMDI) (Kamke a Nairn, 2023), který polymerizuje do sítě polymočoviny/polybiuretu rychlou reakcí s adsorbovanou vlhkostí dřeva. Lepidlo je rovněž schopno vytvářet se dřevem kovalentní uretanové vazby. pMDI pryskyřice jsou obvykle dražší, ale snadno vytvrzují a snášejí vyšší obsah vlhkosti ve zdroji dřeva (Chrobak et al., 2022). V současné době nalézá časté použití ve směsích s jinými lepidly, od lepidel na přírodní bázi až po UF lepidla (Younesi-Kordkheili and Pizzi, 2018; Maulana et al., 2022).

### **3.1.5. Fenol-formaldehydová lepidla**

Fenolické pryskyřice jsou polykondenzační produkty reakce fenolu s formaldehydem. Fenolické pryskyřice byly prvními skutečnými syntetickými polymery, které byly komerčně vyvinuty. Fenol-formaldehydovou pryskyřici vytvořil Leo Baekeland v roce 1907, která je častěji známá také pod názvem "bakelit" a byla prvním syntetickým plastem, který byl vyroben (Kumar a Pizzi, 2019).

Fenol-formaldehydové pryskyřice, jak už název napovídá, se skládají ze dvou základních složek, a to fenolu a formaldehydu v přibližném poměru 1:1 až 1:2. Tyto dvě látky spolu reagují za přítomnosti buď kyselých, anebo zásaditých katalyzátorů, za vzniku methylolfenolu v případě kyselého, resp. dimethylolfenolu v případě zásaditého procesu. Dvě možné cesty výroby se projevují na jejich výsledných vlastnostech. Pokud reagují kyselou cestou, nazývají se novolaky, pokud zásaditou, tak resoly (Petrie, 2007). Novolakové pryskyřice nemají reaktivní methylové ( $-CH_3$ ) skupiny ve svých molekulách, což způsobuje, že bez tvrdidel nejsou schopny samy vytvrdnout. Jako tvrdidlo se zpravidla používá další formaldehyd, který zesiluje novolakovou pryskyřici (Lee et al., 2023).

Pryskyřice získaná jako výsledek alkalické katalýzy při přebytku formaldehydu se nazývá resol a obsahuje reaktivní methylové ( $-CH_3$ ) skupiny. Zahříváním pryskyřice dochází ke kondenzaci reaktivních resolových molekul za vzniku zesíťovaných molekul (viz obr. 4), a to bez přidavku tužidla (Pizzi a Mittal, 2011).



Obr. 4 Reakce vzniku fenol-formaldehydového lepidla (Chrobak et al., 2022)

Obsah netěkavých pevných látek, doba gelace, viskozita a obsah volného formaldehydu jsou základní vlastnosti lepidel na bázi formaldehydu, které je důležité charakterizovat před jejich použitím. Vlastnosti pryskyřic jsou obecně ovlivněny molárním poměrem monomerů. Vyšší molární poměr Fenol: Formaldehyd (P:F) vede k větší reaktivitě pryskyřic, což se projevuje kratší dobou gelace a vyšší viskozitou, ale pryskyřice mají vyšší obsah volného formaldehydu. Naopak nižší molární poměr P:F vede k nižšímu obsahu volného formaldehydu, ale vyvolává nižší reaktivitu s delší dobou gelace a nižší viskozitou (Abdelwahab a Nassar, 2011).

Fenol-formaldehydová (PF) lepidla se vyznačují vysokou pevností lepeného spoje, vynikající odolností proti vodě, tepelnou odolností, vynikající odolností proti rozpouštědlům a povětrnostním vlivům, nehořlavostí, odolností proti korozi, silnou strukturální integritou, nízkou cenou a vynikající kompatibilitu s různými podklady (Kumar a Pizzi, 2019). Používají se v mnoha odvětvích dřevozpracujícího průmyslu, zejména pro materiály na bázi dřeva jako dřevotřískové desky, dřevovláknité desky a překližky. Taktéž nalézají uplatnění i v konstrukčních materiálech na bázi dřeva, zejména v lepeném lamelovém dřevě a vrstveném dřevě (LVL) (Lu et al., 2017).

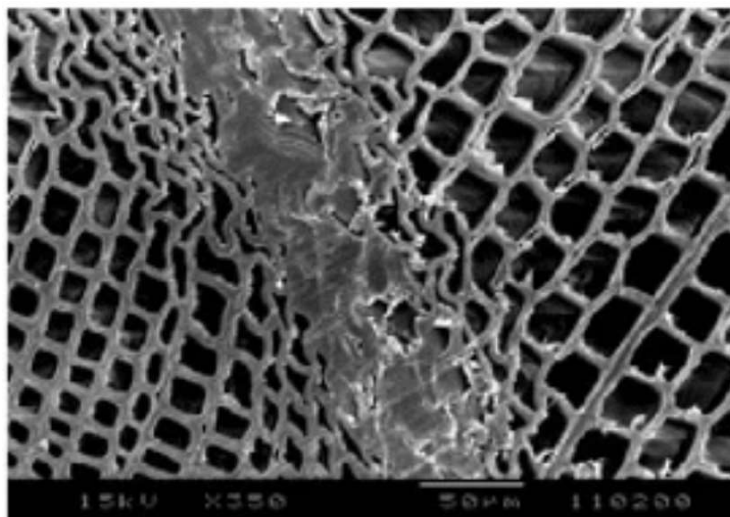


Nicméně, jako každé lepidlo, mají i fenol-formaldehydová lepidla své nevýhody. Mezi ty hlavní patří náchylnost k oxidaci, která je způsobena obsahem fenolických vazeb a methylenových skupin v PF pryskyřici (Christjanson et al., 2010). Právě methylenové skupiny, pokud jsou použity jako jediný síťovací prostředek, způsobují vysokou hustotu tuhých vazeb (přes benzenová jádra), které zvyšují sterické efekty molekul a snižují množství stupňů volnosti, zejména v rotaci molekuly, což má za následek zvýšení křehkosti vytvrzené pryskyřice (Dorieh et al., 2022).

Tato křehkost je charakteristická pro PF lepidla, ovšem pomocí různých nanoplndel na bázi elastomerů lze tuto křehkost omezit, avšak velmi záleží na velikosti částic a jejich poměru stran či interakci plnidla s PF pryskyřicí (Faris, 2021). Další známou nevýhodou PF pryskyřic je jejich pomalejší doba vytvrzení oproti UF a MF lepidlům. Proto se tato doba často zkracuje použitím vysokých teplot na přijatelnou míru, nicméně za cenu dodání další energie do procesu lepení, která může výsledný produkt prodražit (Singh et al., 2023).

Další nevýhodou fenol-formaldehydových pryskyřic a lepidel je uvolňování různých chemických látek, tzv. VOC látek (volatile organic compounds). Mezi tyto látky patří i jedna z hlavních složek PF lepidel, fenol. Obsah volného fenolu v PF pryskyřicích je mezi 5–15 % a lze ho snížit zvětšením poměru formaldehydu, což ovšem vede k větší křehkosti PF pryskyřice (Fink, 2017). Aby se omezil únik těchto VOC látek, přidávají se do PF pryskyřic další látky, které pomáhají únik omezit. Mezi ně patří tzv. „zachytávače“ volného formaldehydu (scavengers), přičemž mezi nejběžnější patří močovina ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ). Pro zvýšení odolnosti proti ohni se do pryskyřice může přidávat i bór, a to až do 10 % objemu směsi (Kristak et al., 2023).

Pro další zlepšení vlastností fenol-formaldehydových lepidel se přidává do lepicí směsi navíc resorcinol (viz obr. 5). Resorcinolová a fenol-resorcinolová (RPF) lepidla vytvrzují po přidání formaldehydu. Komerčně jsou k dispozici jako dvousložkové systémy. Resorcinolová část je v kapalné formě (obvykle pryskyřice ve směsi alkoholu a vody) a před aplikací se smíchá s tvrdidlem (paraformaldehyd s plnivou) (Petrie, 2007). Po smíchání je otevřený čas lepidla poměrně krátký a namíchaná pryskyřice vytváří exotermní reakci. Tyto druhy lepidel vlivem přídavku resorcinolu tuhnou i za studena (při pokojové teplotě), ale k urychlení lze využít i zvýšenou teplotu. Vytvrzování při pokojové teplotě obvykle trvá 8–12 hodin (Pizzi a Mittal, 2011). Pro PRF je typická tvorba tmavě hnědé lepené spáry a vysoká pevnost lepeného spoje, a to i za vlhka a při zvýšené teplotě (Bockel a kol. 2019).



Obr. 5 Snímek lepené spáry smrkového dřeva vyplněného PF lepidlem ze skenovacího elektronového mikroskopu (Wang et al., 2015)

Resorcinol, neboli benzen-1,3-diol ( $C_6H_6O_2$ ), je však velmi drahá chemická látka, která se vyrábí jen na několika místech na světě, a její vysoká cena je určujícím faktorem nákladů v RPF lepidle (Pizzi a Mittal, 2011). Z tohoto důvodu se postupem času snižoval obsah resorcinolu, od čistých RF pryskyřic přes RPF pryskyřice, v nichž se fenol a resorcinol používaly ve stejném nebo srovnatelném množství, až po současné komerční pryskyřice pro výrobu lepeného lamelového dřeva, v nichž se hmotnostní podíl resorcinolu pohybuje v okolo 15–18 %. Další možností snížení obsahu resorcinolu v pryskyřicích se jeví použití tříslovin, které zajistí stejné pevnostní charakteristiky i při snížení resorcinolu na 8–9 % objemu (Pizzi, 2019).

Dalším směrem, kterým se vývoj PF lepidel ubírá, je náhrada petrochemických látek v lepidle za přírodní složky. Tento vývoj je dán ve většině případů zpřísněním norem o úniku VOC látek (Čapka, 2023), zejména formaldehydu z lepidel a rovněž větším tlakem ze strany ochrany životního prostředí a tlakem na cenu lepidla (Chen et al., 2023). Jako možnou náhradou se jeví použití odpadního ligninu z celulózo-papírenského průmyslu. Lignin totiž obsahuje fenyl propanové jednotky, které po modifikaci mohou nahradit fenol v pryskyřici, a to až v 50 % objemu (Peng et al., 2023). Navíc možností modifikace ligninu je velká řada. Jedná se zejména o chemickou cestu, fyzikální cestou a biologickými modifikacemi. Výhodou přidání ligninu do PF adhesiv je jeho dostupnost ve velkém množství, velmi nízká toxicita, nízká cena a biodegradabilita (Gong et al., 2022).

### 3.1.6. Únavové chování lepeného dřeva

Únavové chování dřeva způsobené střídavými mechanickými a fyzikálními dopady byly předmětem mnoha výzkumů v průběhu první poloviny dvacátého století (Kollmann et al., 2012). Poté se začal zmenšovat zájem o studium dynamických vlastností dřeva, protože dřevo bylo nahrazováno kovovými a kompozitními materiály. V dnešní době získávají dřevěné konstrukce opět svou pozornost a navrhují se ambicióznější velké stavební projekty, jako například několikapatrové dřevěné budovy (Wimmers, 2017). U takových projektů jsou zásadní znalosti o chování konstrukčních prvků vystavených cyklickému zatížení a zejména u lepeného programu je kladen velký důraz na vlastnosti a chování lepené spáry (Clerc et al., 2019).

Cyklické zatížení lze rozdělit na náhodné (stochastické) a deterministické, u kterého je známá velikost zatížení pro každý okamžik působení zatížení. Obě mohou navíc být periodické nebo neperiodické, přičemž specifickým případem periodického zatížení je harmonické zatížení (Halama et al., 2011). Každý cyklus zatížení kumuluje poškození a po určitém počtu cyklů dochází k únavovému selhání. Množství takových cyklů se označuje jako Woehlerovy křivky,  $S-N$  nebo  $\sigma-N$  diagramy, popisující vztah mezi úrovní napětí  $\sigma$  a souvisejícím počtem cyklů do porušení  $N$ . Jsou odvozeny z velkého množství empirických zkoušek s konstantní amplitudou s různými amplitudami napětí (Myslicki et al., 2016). Tyto cykly lze dále dělit podle toho, jak velké zatížení a jak rychle působí na tzv. LCF cykly (low cycle fatigue), které jsou charakteristické vysokou intenzitou zatížení při nízkém počtu opakování a tzv. HCF cykly (high cycle fatigue), které se vyznačují nízkým zatížením, avšak po velké množství opakování (Künniger et al., 2019).

Křehká lepidla s nízkou tuhostí a vysokým modulem pružnosti (MOE) fungují lépe při LCF cyklu, zatímco tvárná lepidla s nízkým MOE jsou vhodnější pro nízkou intenzitu a vysoké hodnoty únavového cyklu (HCF) (Frihart, 2009). Z toho důvodu lze lepidla rozdělit nejen podle chemického původu jejich báze, ale také podle toho, jak lepidla reagují na cyklické zatížení na tzv. in-situ polymery, které se vyznačují vznikem tuhých vysoce zesíťovaných polymerů během vytvrzování, mezi které patří zejména UF, MF, MUF, PF a PRF adhesiva. Druhou skupinu pak tvoří tzv. předpolymerovaná lepidla, která obsahují předem připravené pružné polymery, které obsahují například PUR, nebo PVAc lepidla. Obvykle bývají hodnoty MOE u lepidel na bázi aminopryskyřic vyšší než hodnoty pro fenolická lepidla, zatímco PUR lepidla vykazují nejnižší rozsah hodnot MOE (Stoeckel et al., 2013).

Většina lepidel je ze své podstaty viskoelastický materiál, který během cyklického zatížení generuje hysterezní energii. Hysterezní energie se vlivem tření molekul namáhaného materiálu mění na tepelnou energii, která se z části uvolňuje do okolí, nicméně většina se absorbuje do materiálu (Alhawamdeh a Shao, 2021). Při nízkých frekvencích cyklů (LFC) je tato energie zanedbatelná, ovšem při vyšších jednotkách cyklů je již znatelná a může překročit tzv. teplotu skelného přechodu. Tato teplota mění chování molekul materiálu ze „sklovitého“, který je tuhý a křehký na „kaučukovitý“ stav, který se vyznačuje měkkou, ohebnou strukturou (Sandberg et al., 2013). Jednosložková polyuretanová (1C-PUR) lepidla se vyznačují nižší tuhostí a tvrdostí ve srovnání s amino- a fenoplastickými pryskyřicemi, jako jsou melamin-formaldehydová (MF) a resorcinol-fenol-formaldehydová (RPF) lepidla, zato absorbují více deformační energie a vykazují pružnější chování při poškození vedoucí k nižšímu procentu selhání lepeného dřeva (Clauß et al., 2011a).

Další možností cyklického zatížení, se kterým je třeba v dřevěných konstrukcích počítat, je hydro-termické namáhání. Tím, že je dřevo hygroskopický materiál, reaguje na vnější podmínky, zejména teplotu a vlhkost okolí, na základě kterých se ve dřevě vyvine tzv. stav vlhkostní rovnováhy (Ermakov a Stepanova, 2020). Se změnou vlhkosti jsou spojené i změny rozměrů, které snadno přesáhnou 10 %, přičemž tyto změny rozměrů vyvíjejí velké napětí v lepených spojích (Rindler et al., 2019). Největší napětí pak vzniká v lepených spojích, které nemají oproti dřevu tak velké koeficienty bobtnání a sesychání, což může vést až k delaminaci lepeného spoje. Navíc, lepidla ze své podstaty roznášejí deformace v lepené spáře jiným způsobem než dřevo, zejména vlivem jejich chemického složení a struktury a charakteristické tuhosti (Frihart, 2023). Vlhkost má bezesporu velký vliv na lepení konstrukčních spojů, ostatně na ni pamatují i normy pro konstrukční použití dřeva, kdy je třeba charakterizovat, v jakém prostředí se bude lepené dřevo nacházet (ČSN EN 205, 2003). Cyklická změna vlhkosti je sice zpomalována hysterezním chováním dřeva, nicméně má stále velký vliv. Zároveň je známo, že efekty vlhkosti spolu s teplotou vykazují synergický efekt, který má velký vliv na životnost celé konstrukce (Libralato et al., 2021).

Druhý faktor ovlivňující vlastnosti dřeva a lepidla je teplotní roztažnost, která je rozdílná pro dřevo i pro lepidla. Tyto změny v teplotě, kterým je vystavené lepené dřevo lze rozdělit na změny teplot způsobené přirozeným prostředím, tedy teploty průměrně dosahující od  $-18^{\circ}\text{C}$  do  $+65^{\circ}\text{C}$ . Druhou skupinou jsou pak extrémní vysoké teploty, kterým je dřevo vystaveno během působení požáru (Custódio et al., 2009).

### 3.1.7. Tepelné zatížení lepeného dřeva

Teploto je veličina, která popisuje míru změny vnitřní energie v látce bez toho, aniž by samotná látka vykonala práci. Výměna tepla mezi dvěma systémy může nastat třemi způsoby, a to vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) nebo sáláním (radiací). Vlastnostmi, které ovlivňují tepelnou výměnu mezi dřevem a okolím (zdrojem) jsou zejména tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita a teplotní roztažnost. Tyto tři veličiny, spolu s Fourierovými zákony o vedení tepla vycházejí ze zákonů termodynamiky (Požgaj et al., 1997).

Dřevo všeobecně je považováno za špatný vodič tepla. Pro většinu dřevin se pohybuje tepelná vodivost v rozmezí od 0,084 do 0,37 W/mK (Qiu, 2023), což je znatelný rozdíl například oproti oceli (cca 57 W/mK), nebo grafitu (cca 110 W/mK) (Woo et al., 2021). U dřeva má velký význam orientace vláken. Dřevní buňky tvoří svým podlouhlým tvarem vodivé cesty nejen pro prostup vlhkosti ve dřevě, ale taktéž i pro prostup tepla. Dřevo jako celek tak vykazuje nejvyšší hodnoty tepelné vodivosti podél vláken (přibližně 2,5× vyšší než v radiálním směru). V radiálním směru ovlivňuje tepelnou vodivost zejména obsah dřevných paprsků, které svou orientací kolmo k ose kmene podporují tepelnou vodivost (přibližně o 10 % vyšší než v tangenciálním směru) (Gu a Zink-Sharp, 2005). Tento efekt je zřetelný zejména u listnatých dřevin s velkým obsahem dřevných paprsků, přičemž jehličnaté dřeviny, které nemají tak velké dřevné paprsky jako listnaté dřeviny, vykazují rozdíl tepelné vodivosti mezi radiálním a tangenciálním směrem nižší (Eitelberger a Hofstetter, 2011).

Velký vliv má rovněž hustota. Mezi hustotou dřeva a tepelnou vodivostí existuje lineární korelace. Taktéž obsah vlhkosti a směr tepelného toku patří mezi nejvýznamnější faktory ovlivňující tepelnou vodivost. Mezi tepelnou vodivostí a obsahem vlhkosti pod bodem nasycení vláken existuje rovněž lineární korelace (Vay et al., 2015).

Teplota výrazným způsobem ovlivňuje hlavně mechanické vlastnosti dřeva. Z viskoelastické podstaty dřeva je teplotní zatížení možné rozdělit na reverzibilní účinky, které se týkají zejména přechodných změn mechanických vlastností při teplotách nižších než 100 °C, a ireverzibilní účinky, které jsou způsobeny tepelnou degradací složek dřeva při vysokých teplotách. Pokud je doba působení vysokých teplot krátká, jsou okamžité účinky v podstatě vratné (Tajvidi a Mirzaei, 2009). Vysoké teploty (100 °C a vyšší) způsobují ve dřevě trvalé změny, zejména vlivem chemického složení dřeva. Jak již bylo zmíněno výše, dřevo je komplex látek tvořený převážně celulórou, hemicelulórami a ligninem.

Při teplotách mezi 160 a 250 °C dochází k termické dekompozici hemicelulóz, při 240–350 °C k rozkladu celulózy a při více než 200 °C dochází k rozkladu ligninu (Jiang et al., 2014). Tyto chemické změny se objevují zejména při hoření dřeva, nicméně i při řádově nižších teplotách dochází ve dřevě vlivem teploty k určitým změnám (Poletto et al., 2012). A právě zvýšená teplota, která přesáhne tzv. teplotu skelného přechodu, zapříčiňuje změnu v chování polymerů. Tyto polymery měknou a stávají se více pružnými, což je výhodné například při ohýbání dřeva, nikoliv však pro konstrukční použití. S přihlédnutím k hydroskopické povaze dřeva je pak kombinace zvýšené teploty a vlhkosti velmi nežádoucím faktorem, který silně ovlivňuje pevnostní charakteristiky dřeva (Assor et al., 2009).

Naproti tomu vliv nízkých teplot způsobuje odlišné chování dřeva, přičemž všeobecně platí, že při snižování teploty dochází ke zvyšování mechanických vlastností dřeva, zejména modulu pružnosti (MOE) a pevnosti v tlaku ( $\sigma_c$ ) a ohybové pevnosti (MOR). Při nízkých teplotách má velkou roli i vlhkost ve dřevě. Ta, na rozdíl od vysokých teplot, zůstává obsažena ve dřevě i při kryogenních okolních podmínkách a podporuje zvyšování mechanických vlastností formováním ledu uvnitř buněk a na povrchu fibril, což má za následek celkové zvýšení těchto vlastností (Jiang et al., 2014; Niemz et al., 2014). Velikost výsledného efektu zmrazení je ovlivněna také rychlostí zmrazení. Při pomalém zmrazování dochází k tvorbě velkých krystalů ledu, které mohou svým růstem narušit buněčnou strukturu, což může mít za následek i snížení pevnosti / tuhosti dřeva. Naproti tomu rychlé zmrazení je charakteristické tvorbou menších krystalů ledu, který nepoškozuje buněčnou strukturu dřeva a podporuje zvyšování mechanických charakteristik dřeva (Szmotku et al., 2013).

Změna teploty se projevuje i v materiálových charakteristikách materiálů na bázi dřeva, zejména modulu pružnosti a ohybové pevnosti. U překližek, OSB a MDF desek dochází podobně jako u masivního dřeva k poklesu pevnosti při zvýšené teplotě a k nárůstu MOE a MOR při snižování teploty. Zvýšení / snížení mechanických vlastností materiálů na bázi dřeva je dáno jednak materiálovými charakteristikami hlavní složky kompozitu, tedy dřeva, ale taktéž i lepidla (Ayrimis et al., 2010).

U lepeného dřeva nezáleží jen na samotném chování dřeva pod vlivem nízkých/vysokých teplot, ale i na chování samotné lepené spáry a vztahu lepené spáry a dřeva vystavenému změně teplot. Za skleněnými fasádami budov lze dosáhnout teploty až 60 °C při přímém vystavení slunci, což může vést až k porušení nosné konstrukce (Falkner a Teutsch, 2006).

Pro lepidla vystavená změně teplot jsou charakteristické tři aspekty, které ovlivňují pevnost lepeného spoje. Jedná se o smršťování adhesiva vlivem vytvrzování, odlišné koeficienty teplotní roztažnosti vztažené k adherentu a změna vlastností samotného adhesiva (Dillard, 2010).

Při vytvrzování lepidla dochází ke změně stavu lepidla z tekutého do tuhého stavu, a t prostřednictvím množství různých procesů v závislosti na použité skupině lepidel. Tyto procesy jsou charakteristické zmenšováním objemu lepidla, které zůstane v lepené spáře po vytvrzení a může dosahovat až 5 % objemu lepidla (Marques et al., 2015). Takovýto velký úbytek objemu je častý u lepidel vytvrzovaných za pomoci zvýšené teploty (UF, PF, EP), zatímco lepidla vytvrzující odstraněním rozpouštědla, zpravidla ve formě vody, vykazují téměř nulové smršťování (PVAc). Zmenšení objemu lepidla v lepené spáře vyvolává smyková napětí, která jsou však relativně malá a statisticky nevýznamná v porovnání s dalšími dvěma aspekty (Adolf a Chambers, 2007).

Dalším důležitým aspektem jsou různé koeficienty teplotní roztažnosti. Vlivem změny teploty dochází u všech materiálů ke zvětšení objemu při kladném tepelném zisku a ke zmenšení rozměrů při negativním tepelném toku. Při lepení dvou materiálů o rozdílných koeficientech teplotní roztažnosti je třeba uvažovat o tzv. „beznapěťové teplotě“ (stress-free temperature  $T_{sf}$ ) (Dillard, 2010), která je charakterizována teplotou při vzniku lepeného spoje, kde nepůsobí rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti a teoreticky by při stálé teplotě a jiných faktorech ovlivňující vznik napětí nevznikala žádná další napětí (Tserpes et al., 2022). Při změně teploty nebo okolních podmínek ovlivňujících lepenou spáru, dochází k expanzi nebo kontrakci lepených materiálů. Navíc lepená spára fungující jako prostředník mezi těmito různě se chovajícími materiály je vystavena největším napětím, zejména pokud se molekuly lepidla nacházejí v tuhé, sklovité formě, tedy pod teplotou skelného přechodu ( $T_g$ ) (Wirries a Ruetters, 2022).

Zejména teplota skelného přechodu a vliv teploty na napěťově deformační charakteristiku lepidla tvoří třetí aspekt materiálové charakteristiky. U adhesiv, která vytvrzují pomocí zvýšené teploty nad teplotou skelného přechodu se zpočátku tato napětí, resp. deformace, nevyskytují, a to zejména z důvodu měkké poddajné struktury lepidla, která se snadno přizpůsobí tvarovým změnám (da Silva a Adams, 2008). Nicméně v průběhu ochlazování lepeného spoje dojde ke zpětnému překročení teploty skelného přechodu, což způsobí rekrystalizaci molekul lepidla do sklovité, tuhé a zároveň křehké formy, která se nadále nemůže přizpůsobovat tvarovým změnám adherentu (Viana et al., 2017; Cabral et al., 2022).

Z výše zmíněného tedy vyplývá, že změna teploty má vliv na pevnost lepeného spoje. S rostoucí teplotou proto dochází ke snižování modulu pružnosti a pevnosti ve smyku lepeného spoje, což je dáno zejména snižováním adheze lepidla k podkladu a snižováním vnitřní koheze lepidla (Richter et al., 2006; Clauß et al., 2011a).

Tímto chováním jsou ovlivněna hlavně lepidla na bázi jednosložkových polyuretanů, u kterých dochází k poklesu smykové pevnosti v širokém rozmezí teplot (od 70 do 170 °C). Naproti tomu resorcinol-fenol-formaldehydové (RPF) pryskyřice vykazují počáteční pokles pevnosti kolem 180–190 °C (Frangi et al., 2004). Zvýšené a vysoké teploty napomáhají tečení lepených spojů, tzv. creep. U PUR adhesiv se začíná objevovat mezi 40 až 80 °C, nicméně ho lze zvýšit až na 50 °C a to přidáním vyššího obsahu izokyanátu, což zvýší počáteční pevnost lepeného spoje a sníží velikost creepového chování (Richter et al., 2006).

Zvyšováním teploty dochází k růstu vnitřní energie, což ve výsledku způsobí rozkmitání molekul látky. Naproti tomu odebrání tepla způsobí snížení vnitřní energie a vibrace molekul, což má vliv na pevnost lepeného spoje, jelikož se mění způsob deformací (Yang et al., 2023). Se snižující se teplotou navíc dochází častěji k selhání tahových vrstev lepeného lamelového dřeva oproti běžným teplotám, kdy dochází častěji k selhání ve smyku. Zároveň je možné pozorovat zvýšení tuhosti a pevnosti ohýbaného nosníku (Drake et al., 2015).

Tento nárůst si lze vysvětlit tzv. „sesycháním za studena“, kdy dochází k migraci vlhkosti z buněčné stěny do vody volné, obsažené v lumenu buňky. Zároveň dochází u této vody ke změně skupenství, kdy se mění z vody na led, což vede k expanzi rozměrů. Tlak vyvíjený zvětšováním objemu mrznoucí vody na buněčnou stěnu vyvíjí tlakové napětí, které spolu se ztrátou vlhkosti způsobuje větší tuhost buněk (Awoyemi et al., 2010).

Při mrazení je podstatný faktor i rychlost zmrazování, jelikož pomalé zmrazování má vliv na mechanické vlastnosti (Szmotku et al., 2013), avšak cyklické zatěžování mrazem neovlivňuje změnu rozměrů. Velký vliv má však cyklické zatěžování na ohybové vlastnosti lepeného lamelového dřeva, a to především při použití dřevin s menší hustotou. Zatímco u dřeva s vyšší hustotou je více ovlivněna pevnost při smykovém namáhání (Yang et al., 2021).



### 3.2. Dřevo a použité dřeviny

Mezi průmyslově nejpoužívanější dřeviny pro lepení se řadí zejména jehličnaté dřeviny, které jsou vývojově starší než listnaté dřeviny, a proto mají homogennější a jednodušší strukturu než listnaté dřeviny (Hietz et al., 2023). Jehličnaté dřeviny se skládají zejména z cévic (tracheid), které mají ve dřevě jak vodivou, tak i mechanickou funkci (Sivenkov et al., 2023). Rozložení jarního a letního dřeva je navíc poměrně jasně definovatelné vzhledem k tomu, že jarní přírůsty se v letokruhu nacházejí blíže ke dřeni, mají větší průměr lumenu, a tedy spíše vodivou funkci, zatímco letní přírůsty vykazují tlustší buněčnou stěnu a menší plochu lumenu buňky, což přispívá k lepším mechanickým vlastnostem (Sperry et al., 2006). Listnaté dřeviny mají kompozici složitější, zejména z důvodu výskytu dalších druhů buněk (cévy a libriformní vlákna), jejichž uspořádání v letokruhu dává vzniknout rozdělení na kruhovitě pórovité dřeviny a roztroušeně pórovité dřeviny (Schweingruber, 2007).

Velikost cév a jejich množství se projevuje především ve zvýšené pórovitosti, která je jedním z důležitých aspektů lepení. Dřevní póry, v závislosti na dřevině, podporují vznik vyvrátého dřeva a jádra, což je další aspekt, který je třeba brát v potaz při lepení, zejména vzhledem k jejich možnému odlišnému chemickému složení a struktuře (Aicher a Reinhardt, 2007). Mezi další dřevní elementy ovlivňující lepení dřeva lze zařadit i dřeňové paprsky a pryskyřičné kanálky. Dřeňové paprsky, zejména v radiálním řezu, mohou ovlivnit nejen tepelné vlastnosti dřeva, ale rovněž vztah dřeva k vodě, což má vliv i na pevnost lepené spáry (de Oliveira et al., 2020). Pryskyřičné kanálky jsou buňky tvořící u jehličnatých dřevin pryskyřici, která ze své chemické podstaty ovlivňuje zejména adhezi lepidel, jelikož se skládá z velkého množství chemických látek na bázi terpenů (Leggate et al., 2020).

Dřevo je po chemické stránce složeno z velkého množství látek, nicméně v něm převládají tři hlavní látky, celulóza (43-52%), hemicelulózy (20-35%) a lignin (20-30%) (Hossain et al., 2023). Mezi další látky zastoupené v menší míře pak lze zařadit tzv. extraktivní látky, které se ve dřevě objevují z 3-10 %. Právě extraktivní látky, jako jsou pryskyřice, třísloviny, taniny, nebo vosky exotických dřevin mohou způsobovat problémy s adhezí lepidel (Bockel et al., 2019).

Další vlastností, která souvisí s lepením, je hustota dřeviny. Ta ovlivňuje prakticky všechny další vlastnosti dřeva, od již zmíněné pórovitosti, přes teplotní vodivost až po mechanickou pevnost (Kuka et al., 2022).

Pevnost dřeva, resp. jeho moduly pružnosti, jsou v kladné lineární závislosti na hustotě dřeva. Ty ovlivňuje i vlhkost ve dřevě a teplota dřeva, nicméně v záporné lineární závislosti (Watt et al., 2010). Vliv vlhkosti rovněž hraje důležitou roli nejen u rostlého dřeva, ale rovněž u lepeného lamelového dřeva. Lepené lamelové dřevo je nejvíce namáháno v povrchových vrstvách, kde dochází k největší změně vlhkostí (Stolze et al., 2021). Jednotlivé dřevní části, pak mohou být navíc silně ovlivněny hygroscopicitou dřeva. Změny v obsahu vlhkosti způsobují ve dřevě bobtnání a sesychání, vlivem čehož dochází k napětí vzniklým změnou vlhkostrního pole (Angst-Nicollier, 2012). Tato napětí mohou být dokonce větší než je pevnost dřeva napříč vláken. Velikost vlhkostrního spádu je dána především okolní teplotou, ve které se hygroscopické dřevo nachází. S rostoucí relativní vlhkostí vzduchu a teplotou roste i vlhkost ve dřevě (Angst a Malo, 2012).

Listnatou dřevinou, která je známá svou „živostí“, tedy velkými tvarovými změnami vlivem změny vlhkosti ve dřevě, je ve střední Evropě zejména buk (Klement et al., 2019). Nicméně z běžných komerčních listnatých dřevin má velmi homogenní strukturu, díky čemuž se využívá zejména jako referenční dřevina pro zkoušky mechanické pevnosti. Avšak přirozená odolnost buku proti biotickým škůdcům je poměrně nízká (Reinprecht, 2016). Další hojně rozšířenou dřevinou je pak dub, který je používán zejména na nábytkové dílce, či na exteriérové konstrukce, které vynikají přirozenou trvanlivostí. Dubové dřevo je však známo svým kyselým charakterem a kruhovitě pórovitou strukturou, která je problematická pro většinu běžně používaných adhesiv (Uzelac Glavinić et al., 2020).

Velkým problémem listnatých dřevin, který brzdí jejich širší použití je fakt, že využitelná část stromu pro průmysl, tedy zejména kmen, tvoří mnohdy jen 45 % celkového objemu stromu. Zbytek tvoří větve a nevyužitelný sortiment. To v porovnání s jehličnatými dřevinami, kde kmen tvoří až 80 % využitelného objemu a zbytek připadá na větve a průmyslově nevyužitelný sortiment, tvoří ekonomickou bariéru, která znevýhodňuje listnaté dřeviny a to i přes jejich mnohdy lepší vlastnosti (Krackler et al., 2011). Nicméně s postupující změnou klimatu, častějšími suchy a nevhodnými podmínkami zejména pro smrkové monokultury, se stále častěji objevují kůrovcové kalamity (Stříbrská et al., 2022), které ovlivňují trendy dřevozpracujícího průmyslu a pravděpodobně vyvolají poptávku po kompenzaci ve formě dřeva listnatých dřevin.

### 3.2.1. Olše lepkavá (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.)

Olše je jedním z nejslibnějších druhů s krátkou dobou obmýti a hlavním druhem ekosystémů na březích řek v Evropě. Má velký příznivý vliv na pěstování a filtraci vody, stabilizaci nábřeží a také na produkci dřeva (Bibalani et al., 2008; Claessens et al., 2010; Mingeot et al., 2016). Z olšového dřeva lze vyrábět různé tradiční výrobky, včetně vozíků a kolovratů, mís, lžící, dřevěných podpatků, krabiček na doutníky, dřeváků a hudebních nástrojů. Barvíři, koželuzi a kožedělníci využívají její kůru komerčně. Z kůry, výhonků a jehněd lze extrahovat různé přírodní pigmenty (Salca, 2019). Kromě těchto tradičních použití má olše také moderní průmyslové využití. Olšové dřevo (viz obr. 6) nachází své využití ve výrobě nábytku, saun, obkladů, vnitřních dveří, dých a překližek. Poskytuje materiál užitečný také pro dřevotřískové desky, vlákna pro výrobu buničiny a následně papíru a výrobu biomasy (Demirbas, 2016). V současné době dochází v celém nábytkářském průmyslu k rychlé změně a modernímu trendu po celém světě. Kromě cenných druhů používaných v dřevařském průmyslu lze olši považovat také za vhodný materiál pro výrobu nábytku.



Obr. 6 Podélný řez (vlevo) a příčný řez (vpravo) olšovým dřevem  
(The Wood Database, 2023)

Olše není dlouhověká dřevina a její maximální životnost se pohybuje od 100 do 160 let. Typicky může dosáhnout výšky 10 až 25 m a zřídka 35–40 m v dospělosti. Její růst je velmi aktivní v mládí, ve věku 30 až 40 let, kdy má strom produktivní potenciál srovnatelný s potenciálem jiných druhů širokolistých, jako je bříza a jasan. Její produktivita biomasy je však nižší ve srovnání s topolem nebo vrbou (Claessens et al., 2010; San-Miguel-Ayanz et al., 2016). Po 50 až 60 letech, kdy kvalita dřeva klesá z důvodu výskytu hniloby jádra, dochází k pomalému poklesu růstu. U lokalit, kde strom dobře roste, lze dosáhnout dobrého výnosu s dobou obmýti 40–65 let. Ve věku 60 let lze dosáhnout průměru stromu asi 50 až 60 cm (Claessens et al., 2010).

Při pěstování v širokých rozestupech mohou stromy dosáhnout velikosti, která je cenná pro dýhárenské výřezy. Této velikosti dosáhnou stromy ve věku 61–80 let. (Karaszewski et al., 2015). Pro růst stromu by měly být vytvořeny dobré podmínky, zejména dostatek prostoru. To zajistí, že stromy, které dosahují výšky přibližně 10 m, budou dosahovat adekvátní produkci (Claessens et al., 2010).

Olšové dřevo je měkké a díky své nízké hustotě se snadno zpracovává a vyžaduje malé množství energie pro obrábění (Knaggs a Xenopoulou, 2004). Její využití je však v lepených vaznicích možné, a to především pro její velkou pevnost v ohybu a dobré vlastnosti při kontaktu s vodou (Savill, 2019). V její prospěch také svědčí i fakt, že se uplatňuje jako adekvátní náhrada běžných průmyslových dřevin při výrobě překližek a nábytku (Öncel et al., 2019; Salca, 2019).

### **3.2.2. Buk lesní (*Fagus silvatica* L.)**

Buk je jedním z nejpoužívanějších komerčních druhů tvrdých dřev ve střední Evropě. Jeho těžba je snadná a jeho zpracovatelnost a impregnovatelnost je dobrá (Kúdela a Čunderlík, 2012). Bukové dřevo má však také některé nevýhody, mezi něž patří především velké objemové bobtnání nebo sesychání (Klement et al., 2019) a nižší odolnost vůči houbám a hmyzu (Reinprecht, 2016). Další nevýhodou buku je pak jeho relativně nízký podíl rovného, oddenkového dřeva, který je pouze přibližně 50 % kmene ve srovnání s 90 % v případě smrku. Navíc asi 75 % veškerého dřeva je poměrně nízké kvality, zejména kvůli vysokému podílu nepravého jádra u starších stromů (Huss a Butler Manning, 2003).

Tvorba nepravého jádra v živém stromu, stejně jako změna barvy během skladování nebo sušení v sušárně, způsobují významnou ztrátu finanční hodnoty buku (Albert et al., 2003). Barva dřeva je důležitým faktorem, který musí koncový uživatel vzít v úvahu, a cena dřeva často závisí na jeho barevném parametru. Naopak výhodou buku jsou jeho vyšší pevnostní a tuhostní vlastnosti, které jsou dobře známy (Požgaj et al., 1997). Relativně snadná lepitelnost bukového dřeva je zvýrazněna množstvím předmětů z bukového dřeva vyráběných v nábytkářském průmyslu z masivního dřeva, kde buk představuje převážně používaný materiál v Evropě.

Možnost použití bukového dřeva (viz obr. 7) pro konstrukční lepené nosníky byla poprvé úspěšně prokázána v polovině šedesátých let. Později Gehri (1985) poukázal na vysokou pevnost a tuhost potenciálu bukového glulamu.



Obr. 7 Podélný řez (vlevo) a příčný řez (vpravo) bukovým dřevem  
(The Wood Database, 2023)

Glulam z bukového dřeva se však dodnes používal jen výjimečně, nicméně situace by se měla v nadcházejících desetiletích výrazně změnit z několika důvodů, mimo jiné díky změně politiky v oblasti pěstování lesů a potřeby dřevařských výrobků se zlepšenými vlastnostmi. Během posledních deseti let se značný počet výzkumů zaměřil na několik aspektů konstrukčního využití bukového dřeva, jako je třídění, pevnost spojů, pevnost nosníků, či vliv nepravého jádra nebo chování při požáru (Borůvka et al., 2020; Ehrhart et al., 2020; Uzelac Glavinić et al., 2020; Sikora et al., 2021; Stolze et al., 2021; Repič et al., 2023).

### 3.2.3. Smrk ztepilý (*Picea abies* (L.) H. Karst.)

Smrk je celosvětově, ale i lokálně, důležitou surovinou pro papírenské výrobky, řezivo a desky na bázi dřeva (Kollmann et al., 2012). Evropský dřevozpracující průmysl využívá hlavně jehličnaté dřevo (asi 80 % celkové spotřeby dřeva v roce 2000), přičemž se upřednostňuje smrk ve formě řeziva a v deskách na bázi dřeva (Kantola, 2008). Vizuální a pevnostní vlastnosti řeziva určují jeho vhodnost pro dřevěné výrobky (Hanhijarvi et al., 2005). Vlastnosti jsou primárně kvantifikovány podle sukovitosti (počet, velikost, kvalita a distribuce suků) a hustoty dřeva, kontrolované pravidly pro třídění (Burawska-Kupniewska et al., 2021). Vysoce kvalitní řezivo ze smrku se používá hlavně na okenní a dveřní rámy, panely a nosné konstrukce, zatímco nekvalitní desky se používají např. jako obalový materiál (Hasegawa et al., 2020).

Vlastnosti řeziva závisí na vlastnostech kmene: velikost kmene, sbíhavost, rozvětvenost a hustota dřeva. Struktura kmene také závisí na rychlosti růstu stromu, kterou lze ovlivnit pěstebními zásahy (Jäppinen a Beauregard, 2000; Vestøl et al., 2012).

Ve smrkových porostech často dochází k silnému ztenčení, které upřednostňuje dominantní stromy, tedy k dlouhým kmenům s výraznou sbíhavostí, velkým větvím a nízkou hustotou dřeva (Pretzsch and Rais, 2016; Krajnc et al., 2019). Smrkové dřevo (viz obr. 8) bez vad, zejména pak suků, lze zřídka získat z kmene smrku. Ve srovnání s borovicí lesní (*Pinus sylvestris* L.) jsou však suky menší a podíl zdravých suků v kmeni je větší (Johansson et al., 2013; Fredriksson et al., 2017).



Obr. 8 Podélný řez (vlevo) a příčný řez (vpravo) smrkovým dřevem  
(The Wood Database, 2023)

Použití smrkového dřeva je široké. Od stavebního řeziva, přes lepené nosníky, hudební nástroje, materiály na bázi dřeva, až po výrobu buničiny a následně papíru. Je to dřevina poměrně pevná a pružná, avšak špatně impregnovatelná (Moore, 2011; Caudullo et al., 2016; Reinprecht, 2016; Borůvka et al., 2020).

### 3.3. Lepené dřevo

Dřevo je hojně používaným materiálem prakticky na celém světě a jeho využití ve stavebnictví je staré jako civilizace sama. Historicky lidstvo používalo dřevo při stavbě domů, mostů a dalších konstrukcí, a to nepřetržitě i v době, kdy se jako alternativní stavební materiály začaly objevovat beton a ocel, které byly považovány za pevnější, méně hořlavé a univerzálnější. Dřevo zůstává ve stavebnictví konkurenceschopné díky zavedeným znalostem materiálových vlastností dřeva (Pramreiter et al., 2023).

Jedním z významných dřevěných materiálů ve stavebních technologiích je lepené lamelové dřevo, obecně známé jako glulam (GLT), vysoce kvalitní a technicky propracovaný dřevěný výrobek používaný v různých konstrukčních a architektonických aplikacích (Riberholt, 2007).

Historie lepeného lamelového dřeva začala nejstarší zaznamenanou konstrukcí z lepeného lamelového dřeva, kterou byla Hall of King Edward College v anglickém Southamptonu v roce 1860 (Lehringer a Gabriel, 2014). První patent na lepené lamelové dřevo podal Otto Hetzer z německého Weimeru v roce 1906. Mezi první stavby využívající technologii lepeného lamelového dřeva patřila například také posluchárna ve švýcarské Basileji (1893) a čekárna na hlavním nádraží ve Stockholmu (1925) (Ong, 2015).

Pod pojmem lepené dřevo se skrývá velké množství produktů pro konstrukční použití, které jsou založeny na bázi masivních dřevních komponentů slepených do jednoho celku. V závislosti na rozměrech dřevních prvků a jejich orientaci lze lepené dřevo rozdělit na:

- konstrukční dřevo spojované zubovitým spojem (KVH),
- lepené rostlé dřevo,
- křížem vrstvené dřevo (CLT, dříve X-lam),
- lepené lamelové dřevo (GLT, glulam, BSH).

Každá skupina těchto materiálů vykazuje osobité vlastnosti a použití. Konstrukční dřevo spojované zubovitým spojem, nebo častěji délkově napojované lepené dřevo (KVH – Konstruktionsvollholz) je masivní lepený materiál, vyrobený z definovaných bezvadých výřezů obdélníkového, nebo čtvercového průřezu. Ofrézováním čel výřezů do tvaru ozubů s následným délkovým slepením vzniká materiál libovolné délky dle přání zákazníka. KVH hranoly se standardně prodávají v pohledové (frézované) kvalitě se zaoblenými rohy, nebo v surovém provedení (Brunone et al., 2021).

Lepené rostlé dřevo (viz obr. 9) definuje norma ČSN EN 14080 (2013) jako nosný dřevěný prvek s celkovými rozměry průřezu nepřesahujícími 280 mm vytvořený ze dvou až pěti v zásadě rovnoběžných lamel, které mají stejnou třídu pevnosti nebo specifickou třídu pevnosti určenou výrobcem a vykazují konečnou tloušťku lamel větší než 45 mm do 85 mm včetně.

Výroba lepeného rostlého dřeva maximalizuje pilařskou výtěž při zachování vysoké pevnosti zejména vlivem většího objemu masivního dřeva, což se projevuje ve snížených nákladech (Ndong Bidzo et al., 2021). Na druhou stranu lepené rostlé dřevo vykazuje téměř totožné hodnoty pevnosti jako masivní dřevo (Tran et al., 2016).



Obr. 9 Lepené rostlé dřevo (vlevo) a délkově napojované dřevo (KVVH) (vpravo)  
(Hasslacher Norica Timber, 2023; Ráj Dřeva, 2023)

Oproti tomu křížem vrstvené dřevo nabývá na významu. Křížem vrstvené dřevo (Cross laminated timber – CLT) je plošný materiál vyrobený minimálně ze třech vrstev dřeva s kolmou orientací vláken (viz obr. 10) o minimálně tloušťce panelu 60 mm (Pei et al., 2016). Historie CLT sahá do roku 1990, kdy byla technologie a princip CLT patentován. CLT je nosný panel, který snáší osová a mimoosová zatížení a používá se zejména na nosné i nenosné stěnové panely dřevostaveb, na podlahové/stropní panely a střešní panely (Wieruszewski a Mazela, 2017). Výhodou CLT panelu je potlačení základní vlastnosti dřeva, anizotropie, kdy dřevo vykazuje v různých směrech různě velké hodnoty vlastností. Navíc má CLT dobrý tepelný odpor, který zajišťuje dobré izolační vlastnosti, dobrou požární odolnost, odolnost proti seismickým otřesům, výborný poměr pevnosti ku hmotnosti a stabilitu (Jeleč a Rajčić, 2018).



Obr. 10 Křížem vrstvené dřevo (CLT) (Ecohousemart, 2023)



Nejrozšířenější skupinou konstrukčního lepeného dřeva je lepené lamelové dřevo (Glued laminated timber, GLT, glulam, BSH). Lepené lamelové dřevo je technický materiál na bázi dřeva, který je tvořen slepením nejméně ze dvou rovnoběžných lamel o tloušťce 6–45 mm (ČSN EN 14080, 2013). Definice se však v různých částech světa liší a například v americké normě ASTM D3737 (2018) je glulam definován jako materiál slepený z vhodně vybraných a připravených lepených kusů dřeva buď v rovném nebo zakřiveném tvaru, přičemž orientace vláken všech kusů je v podstatě rovnoběžná s podélnou osou nosníku. Z těchto definic tedy vyplývá, že glulam je novodobý materiál na bázi dřeva využívající přednosti rostlého dřeva a potlačující jeho nedostatky. GLT umožňuje výrobu tvarových částí téměř libovolného tvaru a velikosti (Uzelac Glavinić et al., 2020), které nalézají uplatnění v celé řadě konstrukcí, kde se často používá jako alternativa k tradičním stavebním materiálům, jako je ocel nebo beton. Jedná se o udržitelnou variantu, protože je vyroben z obnovitelného zdroje a ve srovnání s těmito jinými materiály má menší uhlíkovou stopu (Kaufmann et al., 2022).

Výroba lepeného lamelového dřeva spočívá v lepení jednotlivých lamel zejména do tloušťky, nicméně praktické aplikace lepeného lamelového dřeva lepeného i do šířky prokazují, že lze vyrobit téměř libovolně velký prvek (viz obr. 11). Lamely použité pro lepení procházejí řadou procesů, které zajistí, že výsledný produkt bude dosahovat nejlepší kvality (Ong, 2015). Prvním procesem je sušení dřeva. Sušení zabezpečuje snížení obsahu vlhkosti mezi 6–18 %, což zajistí tvarovou stabilitu lepeného souboru i po vytvrzení adheziva. Rozdíl v obsahu vlhkosti lamel by neměl přesáhnout 5 % (ČSN EN 14080, 2013).

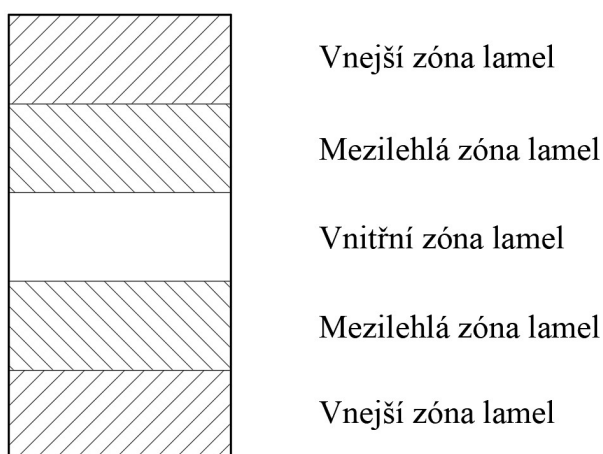


Obr. 11 Lepené lamelové dřevo (Glulam) (Construct, 2020)

Druhým krokem je třídění řeziva, které se provádí buď vizuálně, nebo strojně (ČSN EN 338, 2016). Pravidla vizuálního třídění umožňují třídiči identifikovat charakteristiky, které snižují pevnost dřeva. K přesnějšímu třídění dřeva do různých jakostních tříd v kratším čase se však přednostně používá strojní třídění (Thelandersson a Larsen, 2003; Oscarsson et al., 2011). Všechny tyto problémy vedou výrobce lepeného lamelového dřeva k použití délkově napojovaného dřeva do jednotlivých lamel. Výhodou takové lamely je nižší rozdílnost v pevnostních charakteristikách, což ve výsledku dovoluje zařadit celý lepený produkt do vyšší pevnostní kategorie (Aicher a Stapf, 2014).

Vlastnosti, které musí jednotlivé lamely splňovat definuje norma ČSN EN 14080 (2013), která vychází z tzv. charakteristických vlastností definovaných dle ČSN EN 338 (2016). Charakteristická vlastnost je taková vlastnost, která při normálním rozdělení statistického souboru náhodného výběru splňuje požadovanou hladinu z 95 %, nikoliv z 50 %, jako je běžné u průměrné hodnoty. Proto se stanovuje tzv. 5% kvantil, který dovoluje selhání, či nedosažení požadované úrovně vlastnosti, nebo se dovoluje odhad na základě % poměru mezi charakteristikou a průměrnou hodnotou (ČSN EN 14080, 2013).

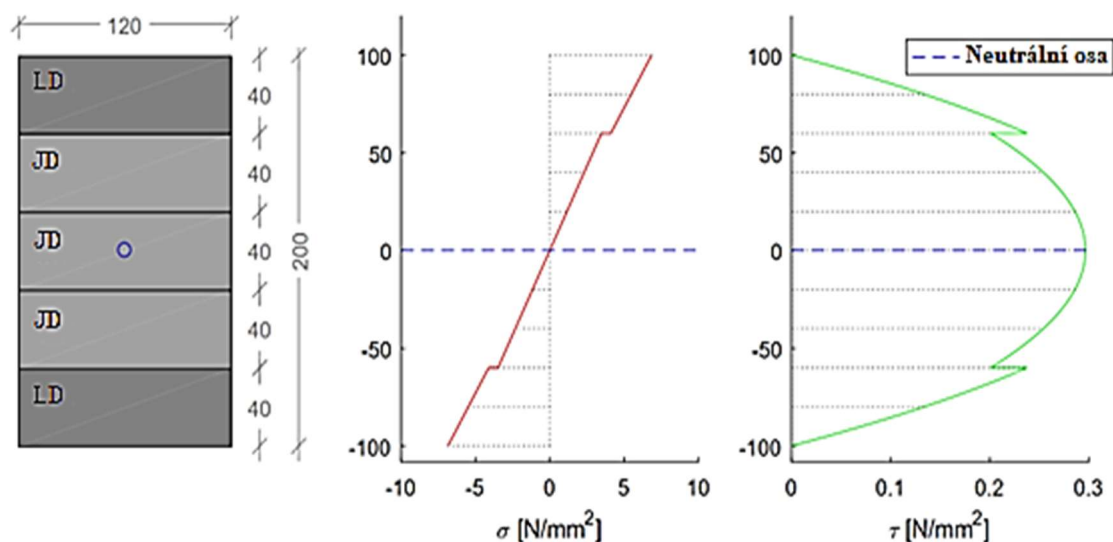
Důležité je rovněž uspořádání lamel v nosníku, přičemž norma ČSN EN 14080 (2013) rozlišuje lepené lamelové dřevo na tzv. homogenní a nehomogenní právě na základě uspořádání lamel spadajících do různých pevnostních tříd. U homogenního lepeného lamelového dřeva platí, že v celém průřezu nosníku jsou použity lamely o stejné pevnostní třídě, zatímco u kombinovaného lepeného lamelového dřeva norma rozlišuje zónu vnějších, vnitřních a mezilehlých lamel, které jsou charakterizovány různými pevnostními třídami a procentuálními poměry jednotlivých zón (viz obr. 12).



Obr. 12 Příklad skladby nosníku z kombinovaného lepeného lamelového dřeva (ČSN EN 205, 2003)

V současné době je většina lepeného lamelového dřeva vyráběná z jehličnatého dřeva, a to zejména ze smrku, jedle, nebo borovice. Tyto druhy mají větší zastoupení zejména v severněji položených krajinách. Naproti tomu listnaté dřeviny, jako je dub nebo buk mají větší zastoupení v jižních krajinách (Aicher a Stapf, 2014). Avšak, s postupující globální změnou klimatu začínají smrkové porosty vykazovat značné zatížení, což se projevuje v zájmu výrobců používat i listnaté dřeviny. Největší podíl ve zkoumaných dřevinách pak zaujímá především buk a dub. Navíc se předpokládá, že tyto dvě dřeviny posílí podíl na skladbě evropských dřevin, a to na úkor jehličnatých dřevin, zejména pak smrku (Hanewinkel et al., 2013). Nemalemu zájmu se rovněž těší měkké listnaté dřeviny, jako např. topol nebo olše (Salca, 2019). Tyto dřeviny jsou v Evropě většinou stranou průmyslového využití pro lepené lamelové dřevo, avšak topol a olše se běžně používají na výrobu překližek, nebo nábytkových dílců (Liu a Guan, 2019).

Na základě nehomogenního uspořádání pevnostních tříd v lepeném lamelovém nosníku se naskytá myšlenka použití nejen lamel vyšší pevnostní třídy, ale rovnou z jiné dřeviny, která tyto požadavky splňuje (Tapia Camú a Aicher, 2018). Výhodou kombinovaného lepeného lamelového dřeva je využití pevnějších druhů dřevin v místech, kde dochází k většímu namáhání (viz obr. 13), zpravidla v povrchových vrstvách nosníku, které jsou způsobeny průběhem normálových sil (Muraleedharan a Reiterer, 2016).



Obr. 13 Průběh normálových a smykových sil v kombinovaném lepeném nosníku (Muraleedharan a Reiterer, 2016)

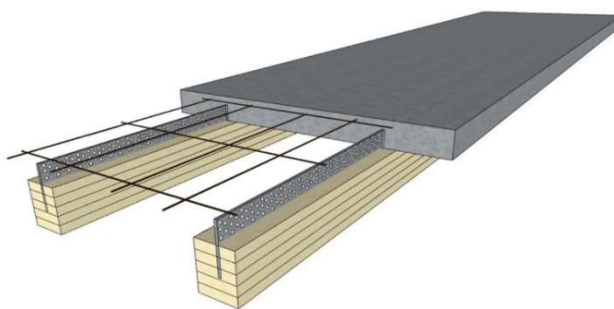
Hybridní (kombinované) nosníky lze zařadit do vyšších pevnostních tříd stejně jako by byly celé lepené ze stejného druhu dřeva zařazeného do vyšších tříd. Toho může být docíleno, pokud jsou středové lamely zařazené do nižších pevnostních tříd, a které tvoří do 60 % celkové plochy příčného průřezu. Vnější lamely jsou pak tvořeny pevnější dřevinou. Výsledný pokles charakteristické pevnosti je o přibližně 3 %, což lze eliminovat zvýšením pevnostních požadavků na okrajové lamely. Pokud středové lamely zabírají 66 %, pak se charakteristická pevnost sníží o 5 %. K podobné situaci dochází i při stanovování modulu pružnosti v ohybu (Frese a Blaß, 2006).

Další možností zvýšení pevnostních charakteristik je vyztužení pomocí přídatných materiálů. Tyto materiály mají zpravidla vyšší pevnostní charakteristiky než dřevo. Přidáním takových materiálů do napětěových zón, které jsou vystaveny největšímu namáhání, přenesou největší napětí právě na výztužné materiály, čímž se docílí nižších napětí a deformací ve dřevě.

Mezi nejstarší metody vyztužení dalším materiálem lze považovat vyztužení pomocí ocelových profilů, které se mechanicky připevňují na dřevěný nosník, případně vlepují do profilu nosníků, nebo nalepují na vnější plochy (Wang et al., 2021). V závislosti na způsobu vyztužení ocelovými prvky dochází ke zvýšení modulu pružnosti o 9–141 %, ohybové tuhosti o 32–158 % a ohybové pevnosti až o 48 %, přičemž tyto úpravy lze provádět i na již zabudovaných prvcích. Nevýhodou je však ztížená recyklace po skončení životního cyklu prvku (Xu et al., 2012; Yang et al., 2016).

Další možností je vyztužování pomocí vlákněných polymerů (Fiber reinforced polymer – FRP). Vlákně vyztužené polymery jsou druhem vysoce zátěžového materiálu, který vzniká smícháním materiálu s vlákny a matricí (pryskyřicí) v určitém poměru. Jeho výhodou je nízká hmotnost, nevodivost, vysoká mechanická pevnost, menší náklady na recyklaci a odolnost proti korozi (Jian et al., 2022). Proto může FRP částečně nahradit ocelové výztužné prvky pro vyztužení dřevěných nosníků. FRP se již desítky let používají pro modernizaci konstrukcí a od 80. let 20. století také pro zvýšení statické odolnosti betonových a ocelových konstrukcí (Jiang et al., 2019). V současné době jsou k dispozici různé typy FRP, jako jsou CFRP (polymer vyztužený uhlíkovými vlákny), atd. pro dodatečné zesílení konstrukcí (Wolter et al., 2020).

Poslední častou, avšak nikoliv poslední možnou, variantou vyztužení je sprážení dřeva a betonu do dřevobetonových nosníků (viz obr. 14). Kompozitní nosník z lepeného lamelového dřeva a betonu (Glulam concrete composite – GCC) je konstrukční prvek, v němž se dřevěný prvek a betonová deska spojí tzv. sprážovacími spoji (Ali, 2018).



Obr. 14 Dřevobetonový nosný prvek (Zhang et al., 2023)

Díky dostatečnému kompozitnímu efektu, který zajišťují spřažovací spoje, se lépe využívají materiálové vlastnosti lepeného lamelového dřeva a betonu, protože tahovým silám odolává především lepené lamelové dřevo a tlakovým silám beton. GCC vykazuje lepší únosnost a ohybovou tuhost než nosník z čistého lepeného lamelového dřeva a vykazuje lepší akustickou izolaci, lepší vibrační komfort a lepší požární odolnost (Du et al., 2022).

### 3.4. Vlastnosti lepeného dřeva

Lepené lamelové dřevo spadá do kategorie konstrukčních materiálů na bázi dřeva. Pro použití ve stavebnictví však existuje množství regulačních parametrů, které každý konstrukční materiál musí splňovat, aby bylo zajištěno, že pokud bude použit v nosné konstrukci, nedojde k předčasnému selhání. Souhrnně tyto parametry zahrnuje tzv. Eurokód 5, který stanovuje dva základní mezní stavy, a to mezní stav únosnosti a mezní stav použitelnosti. Mezní stav únosnosti určuje, jaké zatížení může konstrukce snášet, než dojde k jejímu porušení a mezní stav použitelnosti stanovuje jaké zatížení může konstrukce snášet, než dojde k poškození povrchových úprav materiálu nebo k omezení funkčnosti a použitelnosti konstrukce (ČSN EN 1995-1-1, 2006).

S ohledem na to byly vybrány dvě materiálové charakteristiky, které jsou reprezentativní pro každý z konstrukčních mezních stavů. Pevnost v ohybu udává maximální namáhání, které může materiál přenést při ohybovém zatížení, a je proto vhodným měřítkem, pokud jde o návrh mezního stavu únosnosti stavebního prvku zatíženého v ohybu (Frese a Blaß, 2007). Modul pružnosti naproti tomu vyjadřuje schopnost materiálu odolávat plastickým deformacím při zatížení, a je proto klíčovou vlastností materiálu, pokud jde o návrh mezního stavu použitelnosti stavebního prvku. Kromě toho jsou důležité parametry i pevnost v tlaku a tuhost v tlaku, zejména v případě nosných prvků stěn a sloupů konstrukce. Obě vlastnosti však nejsou tak často k dispozici jako pevnost v ohybu a modul pružnosti (Chen a Lui, 2005).

Každý nosný prvek v konstrukci navíc plní specifickou funkci, která ovlivňuje jeho geometrii a stupeň paraboly momentového diagramu. Na základě funkce prvku v konstrukci je lze rozdělit na jednorozměrné prvky, jako jsou nosníky (zatížené kolmo k ose) a sloupy (zatížené rovnoběžně s osou) a dvourozměrné prvky, jako jsou stěny (zatížené v rovině) a desky (zatížené kolmo k rovině). Kromě toho se obvykle uvádějí materiálové vlastnosti pro hlavní ( $0^\circ$ ) i vedlejší ( $90^\circ$ ) směr zatížení, přičemž na základě toho jsou stanoveny charakteristická pevnost v ohybu ( $\sigma_{B0,char.}$ ) a střední modul pružnosti ( $E_{B0,mean}$ ) v hlavním směru zatížení a průměrná střední hustota ( $\rho_{mean}$ ) zjištěné v dalších normách (ČSN EN 205, 2003; ČSN EN 1995-1-1, 2006).

Skutečné hodnoty těchto vlastností mohou být v jednotlivých konstrukčních prvcích i výrazně vyšší, zejména u dřevěných komponentů, které vykazují vysokou variabilitu v hodnotách vlastností důsledkem přirozené variability dřeva. Vliv opravných koeficientů a používání charakteristických hodnot vlastností se liší zejména v závislosti na výrobku, formě zatížení a příslušných normách (Jakob et al., 2022).

#### **3.4.1. Fyzikální vlastnosti lepeného dřeva**

Fyzikálních vlastností, které ovlivňují chování lepeného lamelového dřeva, je celá řada. Nicméně vzhledem k řešené problematice této práce budou dále uvedeny pouze hustota, tepelné charakteristiky a vlhkostní vlastnosti dřeva.

##### **Hustota**

Pod pojmem hustota dřeva se udává hmotnost dřeva vztažená k jeho objemu, přičemž prakticky se užívají různé typy hustoty. Nejvyšší hodnota hustoty dřeva je tzv. hustota dřevní substance, která vyjadřuje hustotu čisté dřevní substance bez pórů a její hodnoty se pohybují v rozmezí 1490–1560 kg/m<sup>3</sup>. Hustota dřeva je silně ovlivňována několika faktory. Jedním z nich je i vlhkost, na jejímž obsahu ve dřevě jsou založeny i další používané druhy hustot. Hustota v absolutně suchém stavu, redukovaná hustota a hustota při určitém obsahu vlhkosti jsou ty nejčastěji používané (Požgaj et al., 1997).

Další faktor, který ovlivňuje míru hustoty dřeva, je pórovitost. Pórovitost je vyjádřením objemu dřevních pórů ku objemu dřevní substance. Platí, že čím větší pórovitost dřeviny, tím nižší hustota dřeva. Pórovitost dřevin se liší vzhledem k anatomické struktuře dřevin a běžně se pohybuje mezi 50–85 % (Ding et al., 2008).

Hustota je ovlivňována i dalším faktorem, šířkou letokruhů a s tím spojeným poměrem jarního a letního dřeva. Jarní dřevo, které má v živém stromě spíše vodivou funkci obsahuje i více pórů, které celkově snižují hustotu. Naproti tomu letní dřevo, zejména u jehličnatých dřevin, obsahuje buňky s tlustší buněčnou stěnou a menšími lumeny, tudíž vykazuje vyšší hustotu než jarní dřevo. Hustota jarního a letního dřeva se navíc zvyšuje se stářím stromu (Ivković et al., 2013). Důležitý je v tomto vztahu i poměr těchto dvou složek letokruhu, který se pohybuje mezi 30–60 % letního dřeva v letokruhu (Karlman et al., 2005; Knapic et al., 2007).

S šířkou letokruhů je často spojená i hustota dřeva v různých částech kmene, která je ovlivněna zejména vnějšími podmínkami růstu a projevuje se v různorodosti hustoty dřeva v kmeni. Gradient hustoty v kmeni lze rozdělit podle dvou směrů, a to horizontální (od dřeně k lýku) a vertikální (od kořenů k větvím). Zpravidla platí, že s rostoucí šířkou kmene se zvyšuje hustota dřeva, která je zpočátku ovlivněna zejména vlivem juvenilního dřeva v okolí dřeně a postupnou tvorbou stále hustějšího dřeva vlivem růstu (Hietz et al., 2013). Druhým směrem, který diverzifikuje hustotu, je výška kmene. Nicméně, nelze jednoznačně určit, zda se hustota snižuje, či nikoliv, jelikož velmi záleží na druhu dřeviny, stanovišti a dalších podmínkách růstu (Repola, 2006).

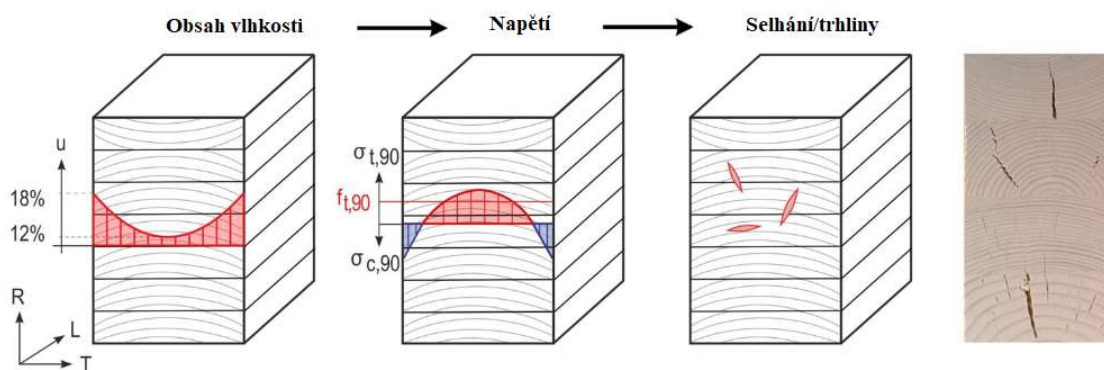
### **Vlhkostní charakteristiky**

Dřevo je ze své přirozené podstaty hygroskopický materiál, který reaguje na změny okolních podmínek (relativní vlhkost vzduchu – RH a teplotu) sorpcí nebo desorpcí vlhkosti ze dřeva popsaných sorpčními izotermami. Množství vody, kterou dřevo přijímá nebo odevzdává, má tendenci sledovat tzv. stav vlhkostní rovnováhy (SVR) (Skaar, 2012). Změny obsahu vlhkosti se ve dřevě projevují dvěma způsoby v závislosti na tom, kde se zvýšená vlhkost ve dřevě „uloží“. V zásadě platí, že do meze hygroskopicity (MH) nebo meze nasycení buněčné stěny (MNBS) se voda navazuje na buněčnou strukturu, čímž ovlivňuje rozměry a vlastnosti dřeva. Nad touto mezí (BNV) se voda vyskytuje v lumenech buňky a dále jen zvyšuje hmotnost dřeva, nicméně do tvarových změn nezasahuje a na pevnost nemá význam (Glass a Zelinka, 2021).

Obsah vody vázané (do MH/MNBS) ve dřevě není rovnoměrný, čímž vzniká gradient vlhkostního pole, který je vyrovnáván potenciálem přenosu vlhkosti. Tento potenciál je zpravidla koncentrace vody ve dřevě, nicméně pohyb vody vázané ve dřevě může vyvolat i parciální tlak páry, teplota, chemický potenciál nebo tlak šíření vlhkosti (Keey a Nijdam, 2002).

Přenos vody vázané ve dřevě je uskutečněn pomocí difuze, přičemž schopnost difundovat vodu vyjadřuje tzv. koeficient difuze, který je ovlivněn teplotou, dynamickou viskozitou kapaliny a velikostí difundujících částic (Ormarsson a Gíslason, 2016). U difuze je třeba rozlišit, zda se jedná o stacionární difuzi, kdy se koncentrace vlhkosti nemění v čase a je vyjádřena I. Fickovým zákonem, a nebo nestacionární difuzi, kdy dochází k proměnám koncentrace vody ve dřevě, která je vyjádřena II. Fickovým zákonem (Niklewski et al., 2016). Ve dřevě existují dvě vodivé cesty, přes které může difuze nastat. Tou první je difuze skrz buněčnou stěnu nebo pohyb vodní páry skrz lumen buňky (Thybring a Fredriksson, 2021).

Vlivem zvýšení obsahu vody vázané ve dřevě dochází ke změně rozměrů vlivem bobtnání a sesychání, které vyvozují vnitřní napětí ve dřevě (viz obr. 15). Vnitřní napětí jsou závislá na druhu dřeviny, anatomických směrech, uspořádání buněčné stěny a poměru jarního a letního dřeva v letokruhu (Chiniforush et al., 2019). Hodnoty těchto napětí mohou být natolik velké (1–5 MPa), že překonají tahovou pevnost dřeva napříč vlákny, čímž mohou způsobit vznik trhlin ve dřevě. Navíc, pokud má dřevo jen omezený prostor k bobtnání, dochází u dřeva k tzv. omezenému bobtnání, kdy teoretická velikost tlaku bobtnání může dosáhnout až 150 MPa (Horáček, 2008).



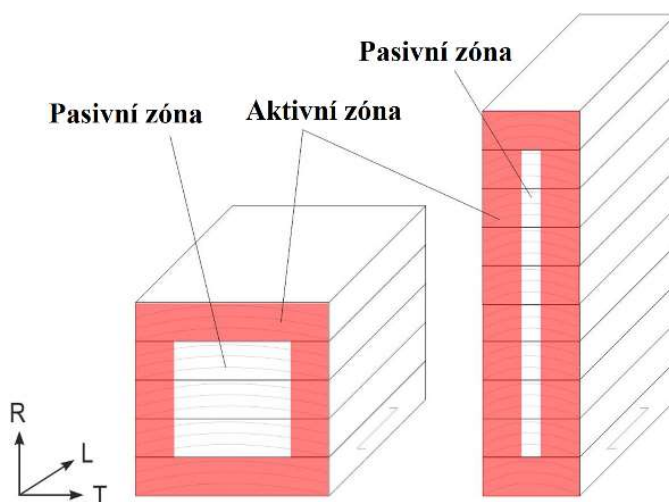
Obr. 15 Napětí v lepeném dřevě vlivem vlhkosti (Franke et al., 2019)

Pro praktické použití lepeného dřeva vzhledem k jeho vlhkostním charakteristikám zohledňuje Eurokód 5 (ČSN EN 1995-1-1, 2006) hygroskopické chování tím, že stanovuje tři servisní třídy použitelnosti (Service class – SC) v závislosti na průměrné roční vlhkosti, ve které se dřevěný prvek nachází. SC 1 je charakterizována okolním klimatem o teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 % (RH) a průměrnou vlhkostí dřeva nižší než 12 %, přičemž po několik týdnů v roce může být relativní vlhkost vyšší než 65 %.



V SC 2 je průměrná vlhkost nižší než 20 %, což odpovídá teplotě 20 °C a relativní vlhkosti okolního vzduchu 85 %, která je vyšší než 85 % pouze několik týdnů v roce. SC 3 zahrnuje případy s obsahem vlhkosti vyšším než 20 % (ČSN EN 1995-1-1, 2006).

Servisní třídy však zohledňují jen vnější podmínky a rozložení vlhkosti v průřezu nosníku neřeší, což se může jevit problematické při navrhování nosníku. Rozložení vlhkosti v nosníku lze rozdělit na tzv. aktivní a pasivní zónu (viz obr. 16), v závislosti na tom, kde dochází k největším změnám vlhkosti. Každá zóna přitom může spadat do vlastní servisní třídy použitelnosti. Hranice pasivní a aktivní zóny záleží na velikosti bobtnání a sesychání použité dřeviny a velikosti napětí vzniklé změnou vlhkosti (Franke et al., 2019).



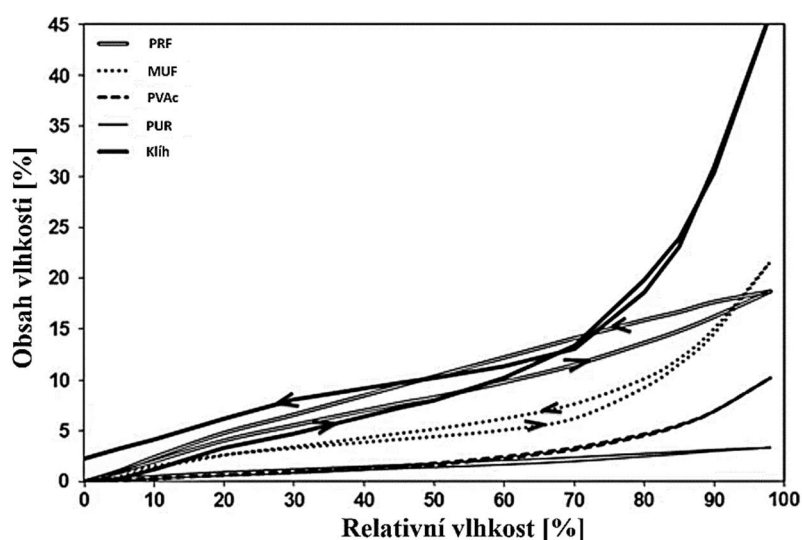
Obr. 16 Rozdělení příčného průřezu nosníku vzhledem k vlhkosti (Franke et al., 2019)

Vnitřní rozložení vlhkosti v lepeném dřevě však ovlivňuje i přítomnost lepené spáry. Lepidla vystavená změně vlhkosti mohou rovněž vykazovat změnu vlastností, zejména ve struktuře, objemové změny, zvýšení hmotnosti, snížení teploty skelného přechodu a změny viskoelastického chování (Shirmohammadi, 2023). Všechny tyto změny zpravidla vedou ke snížení celkové pevnosti lepeného spoje s rizikem ohrožení bezpečnosti lepených dřevěných výrobků nebo konstrukčních prvků na bázi dřeva a k degradaci rozhraní adhesivum/adherent vlivem hydrolyzního štěpení polymerních řetězců (Mittal, 2015).

Vlivem adsorpce vody na molekuly lepidla dochází ke snižování modulu pružnosti a tvrdosti různých lepidel až na polovinu hodnot v suchém stavu (Dietsch et al., 2015). Navíc při difuzi vody skrze lepenou spáru mohou jednotlivé vrstvy lepidla působit jako bariéry snižující průnik vlhkosti dále do materiálu, což může mít za následek lokální zvýšení vlhkosti materiálu nebo bobtnání lepidla samotného (Mannes et al., 2014).

Kromě ztráty mechanických vlastností může případné bobtnání lepidla způsobit další vnitřní pnutí adherentu. U lepidel, která obsahují další látky ve smyslu plniv, tužidel, stabilizátorů a jiných, se může projevit vliv vlhkosti změnou vlastností těchto složek, zejména jejich bobtnáním nebo hydrolyzou (Kaiser, 2021).

Adsorpce a desorpce vlhkosti v lepených spárách se řídí stejnými pravidly jako dřevo, tedy vlivem vnějších podmínek, zejména parciálním tlakem vodních par vyvolaných relativní vlhkostí vzduchu a teplotou. Vodní pára může pronikat mezi polymerní řetězce nebo se shlukovat okolo funkčních skupin polymeru, které jsou schopny tvořit vodíkové interakce. Tyto změny se pak projeví ve tvaru sorpčních izoterm (viz obr. 17) a v dynamice difuze vlhkosti skrz lepenou spáru (Mannes et al., 2012).



Obr. 17 Sorpční izoterm vybraných lepidel (Wimmer et al., 2013)

## Tepelné vlastnosti

Tepelné vlastnosti dřeva vyjadřují charakteristiky, které ovlivňují chování dřeva vystaveného tepelnému toku. Tepelný tok, který působí na dřevo, je dán vektorem hustoty tepelného toku, který charakterizuje, kolik tepla prostoupí plochou za jednotku času. V izotropním prostředí má vektor hustoty tepelného toku stejný směr, ale opačnou orientaci jako vektor gradientu teploty a je kolmý na izotermní plochu (Wcisło et al., 2023). Způsoby, jakým se teplo předává jsou vedení (kondukcce), proudění (konvekce) a záření (radiace). V závislosti na průběhu teplotního spádu ve dřevě se přenos tepla ve dřevě uskutečňuje podle Fourierova zákona o přenosu tepla ve stacionární nebo nestacionární podobě. Tepelné vlastnosti, které ovlivňují chování dřeva, jsou zejména tepelná vodivost, tepelná roztažnost, tepelná difuzivita a měrná tepelná kapacita (Khattabi a Steinhagen, 1993; Salin, 2010).

Tepelná vodivost je mírou rychlosti prostupu tepelného toku materiálem vystavenému jednotkovému rozdílu teplot přes jednotkovou tloušťku materiálu a lze ji vyjádřit jako konstantu mezi tepelným tokem a gradientem teploty (Horáček, 2008). Tepelnou vodivost dřeva ovlivňuje řada faktorů, zejména hustota, vlhkost, obsah extraktivních látek, orientace vláken, orientace celulózových řetězců v buněčné stěně, tvar buněk, tloušťka buněčné stěny, velikost lumenu, poměr jarního a letního dřeva v letokruhu a teplota. Tepelná vodivost se zvyšuje s rostoucí hustotou, vlhkostí, teplotou nebo obsahem extraktivních látek ve dřevě (Aseeva et al., 2016). Nejvyšších hodnot tepelné vodivosti dosahuje dřevo při působení tepelného toku rovnoběžně s vlákny, přičemž v radiálním a tangenciálním směru je přibližně 1,5–2,8× menší. Převrácenou hodnotou tepelné vodivosti je tepelný odpor, který se častěji používá pro určení míry izolačních vlastností materiálů (Hung Anh a Pásztor, 2021).

Druhou teplotní charakteristikou je teplotní roztažnost, která je mírou relativní změny rozměru způsobené změnou teploty. Koeficient tepelné roztažnosti je ovlivněn orientací vláken, což se projevuje v 10–15× větší roztažnosti v radiálním a tangenciálním směru než ve směru rovnoběžném s vlákny (Horáček, 2008).

Další faktor, který ovlivňuje teplotní roztažnost dřeva, je obsah vlhkosti. Při zahřívání dřeva s vyšším obsahem vlhkosti sice dochází ke zvětšení rozměrů vlivem teplotní roztažnosti, nicméně sesychání vlivem úbytku vlhkosti nabývá řádově vyšších hodnot, a to i v podélném směru, kde je obecně sesychání dřeva nejmenší (Adibaskoro et al., 2021).

Další tepelnou charakteristikou dřeva je měrná tepelná kapacita, která udává, kolik tepla je třeba k ohřátí jednotky objemu o 1 K. Měrná tepelná kapacita je závislá na hmotnosti dřevní substance, tudíž není ovlivněna druhem dřeviny ani její hustotou. Velký vliv má však obsah vlhkosti ve dřevě, jelikož voda má přibližně 4× vyšší měrnou tepelnou kapacitu než dřevo (Horáček, 2008).

Poslední důležitý parametr je tepelná difuzivita, která je měřítkem toho, jak rychle dokáže materiál absorbovat teplo ze svého okolí nebo ho naopak odevzdávat. Je definována jako poměr tepelné vodivosti a součinu hustoty a tepelné kapacity. Vzhledem k nízké tepelné vodivosti, střední hustotě a tepelné kapacitě dřeva je tepelná difuzivita dřeva mnohem nižší, než u jiných konstrukčních materiálů jako je kov, cihly nebo kámen. Z tohoto důvodu dřevo nepůsobí na dotek extrémně horkým nebo studeným dojmem jako jiné materiály (Aseeva et al., 2016).

Tepelné vlastnosti jsou důležité zejména v dřevěných konstrukcích budov a jejich obálce. Vznik tepelných mostů je pro dřevěné konstrukce nežádoucí, jelikož v těchto kritických místech může docházet ke snížení teploty až na úroveň, kdy začnou kondenzovat vodní páry (Danielski a Fröling, 2015). Tepelné vlastnosti ovlivňují i proces sušení dřeva, které špatně nastavenými režimy sušení mohou vykazovat snížení mechanických vlastností, což může znemožnit jejich použití pro konstrukční účely. Velký vliv tepelných vlastností je patrný i při hoření dřeva, přičemž pro konstrukční použití dřeva je třeba splnit normované požadavky (ČSN EN 1995-1-2, 2006).

### 3.4.2. Mechanické vlastnosti lepeného dřeva

Mechanické vlastnosti lepeného dřeva vycházejí z materiálových charakteristik dřeva a lepidla, zejména z hustoty, modulu pružnosti a struktury. Mezi základní mechanické vlastnosti lepeného dřeva patří především moduly pružnosti, ohybová a smyková pevnost.

#### Modul pružnosti

Pružnost je materiálová charakteristika vyjadřující schopnost materiálu dosáhnout původního tvaru a rozměrů po ukončení působení vnějších sil. Tento vnitřní odpor lze charakterizovat jako modul pružnosti. Oblast, v níž je modul pružnosti charakteristickou veličinou se nazývá lineární oblast pracovního diagramu, která je ohraničena mezi úměrnosti, kdy dochází ke vzniku plastických deformací (Požgaj et al., 1997).

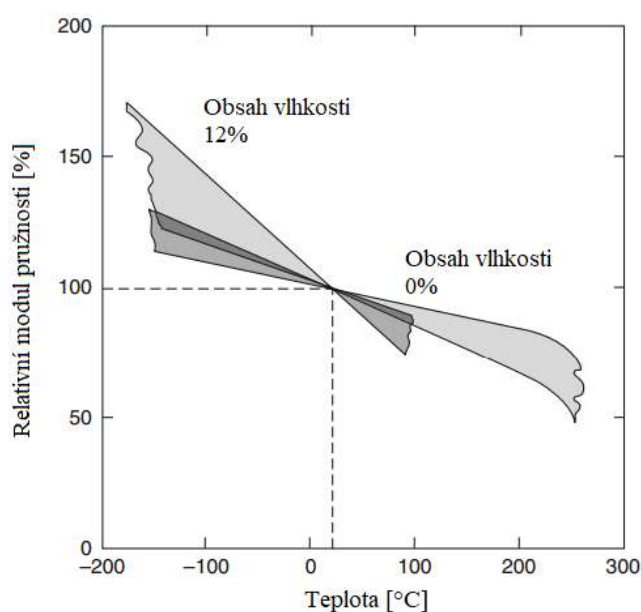
Modul pružnosti lze rozdělit na dvě základní kategorie podle směru působení zatížení. Při normálovém zatížení (tah, tlak, ohyb), kdy vnější síly působí rovnoběžně s osou materiálu, se moduly pružnosti nazývají Youngovy moduly pružnosti ( $E$  – *anglicky* „*Modulus of elasticity* – *MOE*), které lze ve dřevě navíc rozdělit podle anatomických směrů na  $E_L$  (ve směru vláken),  $E_R$  (v radiálním směru),  $E_T$  (v tangenciálním směru). Druhou skupinou jsou smykové moduly pružnosti ( $G$ ), které působí proti působení tečných sil (smyk, krut) a úhlovým deformacím. Smykové moduly pružnosti lze rozdělit stejně jako normálové s přidáním indexu směru působení síly ( $G_{LR}$ ,  $G_{RT}$ ,  $G_{LT}$ ) (Halama et al., 2011).

Hodnoty modulů pružnosti u dřeva jsou ovlivněny zejména tvarem, velikostí buňky a strukturou buněčné stěny, která se skládá z několika vrstev. Tyto vrstvy mají různé tloušťky, orientaci celulózových fibril a obsah ligninu. Kombinace těchto tří faktorů udává výslednou tuhostně-pevnostní charakteristiku každé vrstvy buněčné stěny.

Největší podíl ze všech částí buněčné stěny zabírá vrstva  $S_2$ , která má celulózové fibrily orientovány téměř rovnoběžně (odklon do  $7^\circ$ ) s podélnou osou buňky, což dává samotné buňce, potažmo celému komplexu buněk nazývaným dřevo, nejvyšší hodnoty modulu pružnosti právě ve směru vláken (Gindl a Schöberl, 2004). Průměrné rozdíly mezi jednotlivými směry lze charakterizovat poměrem  $E_L : E_R : E_T = 27 : 2,1 : 1$  a  $G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} = 7,5 : 5,4 : 1$  (Požgaj et al., 1997).

Další faktor, který ovlivňuje velikost modulu pružnosti ve dřevě, je opět vlhkost. Molekuly vody, které se vážou na jednotlivé chemické komponenty dřeva, způsobují oddálení jednotlivých molekul, zejména celulózy, čímž se snižují mechanické vlastnosti dřeva. Navázaná voda je navíc v relativně volné formě, což umožňuje jednotlivým složkám dřeva větší míru volnosti než tuhá struktura rostlého dřeva (Qing a Mishnaevsky, 2009). Zpravidla platí, že se zvýšením vlhkosti ve dřevě o 1 % v oblasti do BNV se modul pružnosti sníží o 1,5 až 2% (Požgaj et al., 1997).

Dalším faktorem, který ovlivňuje modul pružnosti dřeva, je teplota (viz obr. 18). Krátkodobé zvýšení teploty na  $100^\circ\text{C}$  nemá vliv na pevnost a pružnost dřeva. Nicméně, dlouhodobé působení teploty nad  $65^\circ\text{C}$  může způsobit trvalé snížení modulu pružnosti. Velikost tohoto snížení je dána zejména dřevinou, obsahem vlhkosti ve dřevě, dobou vystavení zvýšené teplotě, teplotou a způsobem přenosu tepla (Oltean et al., 2007). Teplota nad  $65^\circ\text{C}$  zapříčiňuje měknutí chemických komponent dřeva, především ligninu, které přechází teplotou skelného přechodu a mění se z tuhé sklovité formy na měkkou, kaučukovitou formu, která odolává méně mechanickému zatížení (Zhou et al., 2012).



Obr. 18 Vliv teploty na modul pružnosti (White, 2016)

Naproti tomu vystavení dřeva nízkým teplotám zvyšuje hodnoty mechanických vlastností a modulu pružnosti, přičemž velmi záleží na obsahu vlhkosti ve dřevě a rychlosti zmrazování (Zhao et al., 2015). Voda obsažená ve dřevě se při snížení teploty mění na krystaly ledu, které vyztužují lumen buňky (nad BNV) nebo buněčnou stěnu (do BNV), čímž zvyšují tuhost buněk. Nicméně, pokud krystaly ledu vznikají pomalu, vznikající tlak od ledových krystalů může poškodit buněčnou stěnu za vzniku mikrotrhlin, které naopak snižují mechanické vlastnosti dřeva (Szmurka et al., 2013). Změny modulu pružnosti se nejvíce projeví ve snížení smykových modulů, zejména při namáhání v krutu. Průměrný pokles modulu pružnosti u dřeva je přibližně 1 % na 2 °C nárůstu teploty, zatímco u dřeva s obsahem vlhkosti nad bodem nasycení vláken (BNV) je pokles rychlejší, přibližně 1 % MOE na 1 °C při zvýšení teploty (Požgaj et al., 1997).

Poslední významný faktor, který ovlivňuje mechanické vlastnosti a modul pružnosti, je čas. Při dlouhodobém vystavení dřeva určitému zatížení dochází vlivem jeho struktury k tzv. viskoelastickému chování, které se projevuje tzv. tečením dřeva (creep) (Bader a Ormarsson, 2023). Tento jev je důležitý při návrhu a hodnocení konstrukcí, zejména těch, které jsou dlouhodobě zatíženy (Bahtiar et al., 2017), jelikož vlivem únavového namáhání dřeva může dojít ke snížení jeho mechanických vlastností až o 40 % (Tsai a Ansell, 1990).

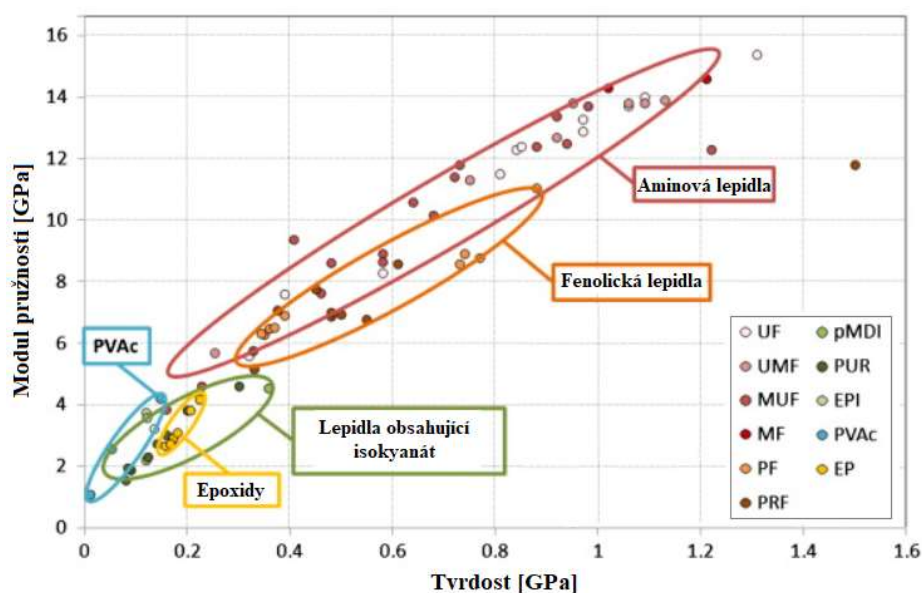
Na velikost creepu má vliv i teplota, neboť při vyšších teplotách může být dřevo náchylnější k tečení a to především při delších dobách expozice (Hsieh a Chang, 2018). Rovněž i vlhkost silně ovlivňuje pevnostní charakteristiky vzhledem k tečení dřeva. Při krátkodobém zvýšení vlhkosti klesá ohybová tuhost dřeva ( $E \cdot I$ ), ale při dlouhodobém se tuhost naopak zvyšuje, což je dáno zejména vlivem zvětšení průřezu prvku (Polocoşer et al., 2017).

Velikost modulu pružnosti je u různých dřevin různá. Samotná buněčná stěna dřevní buňky nabývá vysokých hodnot modulu pružnosti, a to přibližně 20200 MPa. Dřevo ovšem není homogenní struktura tvořená jen buněčnou stěnou, ale komplexem buněk s určitou charakteristickou strukturou ovlivněnou druhem dřeviny, chemickým složením, pórovitostí, stanovištními a růstovými podmínkami, které celkově ovlivňují hodnoty modulu pružnosti (Ammann et al., 2014).

Rozsah hodnot modulu pružnosti dřeva v ohybu je poměrně široký a nachází se v rozmezí od 2000 MPa u balsy (*Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb.) (Kotlarewski et al., 2016) až po rekordní hodnoty u dřeva stromu *Swartzia panacoco* (Aubl.) Cowan, který vykazuje hodnoty až 31150 MPa (The Wood Database, 2023).

Hodnoty modulu pružnosti napříč vlákny jsou vlivem anatomické struktury nižší (100–2000 MPa) (Lang et al., 2003). V oblasti střední Evropy se hodnoty modulů pružnosti dřeva pohybují od 7000 do 17000 MPa (Wagenführ R. a Wagenführ A., 2021).

Naproti tomu modul pružnosti u lepidel není ovlivněn anizotropním charakterem jako u dřeva, nýbrž vykazuje izotropní charakter. Velikost modulů pružnosti u lepidel se značně liší v závislosti na chemické podstatě lepidel a případných aditiv. Rozsah hodnot modulů pružnosti je podobně široký jako u dřeva (viz obr. 19), nicméně minimální hodnoty se pohybují u průmyslově vyráběných syntetických na konstrukční lepení dřeva a PVAc lepidel okolo 100 MPa, zatímco nejvyšší, až 15 000 MPa, u nejnovějších lepidel na aminové bázi (Stoeckel et al., 2013).



Obr. 19 Mechanické vlastnosti lepidel (upraveno dle Stoeckela et al., 2013)

### Ohybová pevnost

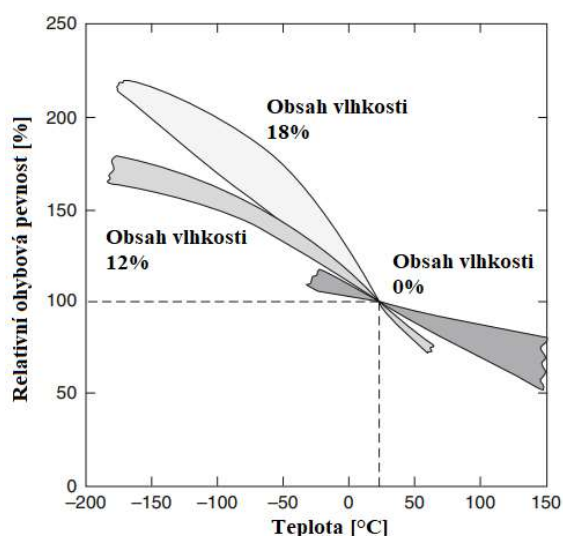
Ohyb je z pohledu mechaniky druh kombinovaného namáhání, který působí ve směru ohybového momentu a leží v rovině kolmé na rovinu řezu. Ohybové namáhání je charakterizováno normálovým napětím  $\sigma_o$ , které není rovnoměrně rozloženo v průřezu. Pokud je střednice tělesa přímka, nabývá napětí lineární rozložení. Při působení ohybového momentu jsou horní vlákna průřezu namáhána tlakem, zatímco spodní jsou namáhána tahem. Neutrální osa prochází těžištěm, kde je napětí nulové. Maximální ohybové napětí se vyskytuje v krajních vláknech průřezu a jeho hodnota je dána podílem ohybového momentu ku modulu průřezu (Halama et al., 2011). Ohybová pevnost (MOR – z angl. Modulus of rupture) udává hodnotu pevnosti dřeva vystavenému ohybovému napětí, při kterém dojde k porušení celistvosti prvku (Dahle et al., 2017).

Při ohýbání dřeva existuje řada faktorů, které ovlivňují velikost ohybové pevnosti. Mezi hlavní faktor patří především orientace vláken, protože záleží, zda je prvek namáhán ohybovým namáháním s orientací vláken rovnoběžně s podélnou osou tělesa nebo napříč vláken v radiálním či tangenciálním směru (Horáček, 2008). Pro glulam je nejčastější ohybové namáhání při rovnoběžné orientaci vláken s osou namáhaného prvku.

Dalším významným faktorem ovlivňujícím ohybovou pevnost je, podobně jako u modulu pružnosti, vlhkost dřeva. Působení vlhkosti se nejvíce projevuje pod bodem nasycení vláken (BNV), kdy se voda váže na jednotlivé elementy dřeva, čímž způsobuje nejen bobtnání dřeva, ale rovněž snížení ohybové pevnosti (Hernández et al., 2014). Velikost snížení mechanických vlastností dřeva odpovídá při 1 % zvýšení vlhkosti ve dřevě pod BNV snížení pevnosti o 2,5–3,5 % (Carll a Wiedenhoeft, 2023).

Snížení ohybové pevnosti je dáno i nerovnoměrnými změnami tuhosti po výšce nosníku vlivem vlhkosti. Tahová a tlaková tuhost vykazují odlišnou reakci na změnu vlhkosti, přičemž tlaková tuhost klesá rychleji než tahová, což má za následek posun neutrální osy blíže k tahové oblasti. Totéž platí i při vlhkosti nad BNV, nicméně zde je již tlaková tuhost natolik nižší než tahová, že při porušení dřeva v tlakové zóně dosahuje napětí v tahové zóně hodnoty přibližně 50 % meze pevnosti (Požgaj et al., 1997).

S vlhkostí velmi souvisí i teplota (viz obr. 20), která ovlivňuje dřevo hned několika způsoby. Dřevo vykazuje jistou míru teplotní roztažnosti, která je navíc ovlivněna anizotropním charakterem, což má za následek nerovnoměrnou roztažnost ve dřevě a vznik lokálních napěťových oblastí. Tato vnitřní napětí mohou dosahovat až takových hodnot, při kterých vznikají ve struktuře buněk mikrotrhliny (Concu, 2017).



Obr. 20 Vliv teploty na ohybovou pevnost (White, 2016)



Se zvyšováním teploty dřeva dochází, podobně jako u lepidel, k měknutí jednotlivých složek vlivem překročení teploty skelného přechodu, zejména ligninu a hemicelulóz (Miki et al., 2012). S postupující teplotou navíc dochází i k termické dekompozici jednotlivých složek dřeva, což je například i důvod proč se nedoporučuje použití termicky upraveného dřeva pro konstrukční účely (Kačíková et al., 2013). Všechny tyto charakteristiky vedou ke snižování ohybové pevnosti, nicméně zvyšování teploty vede často i ke snížení obsahu vlhkosti, a právě tyto dvě veličiny spolu vytváří synergický efekt. Celková velikost snížení pevnosti dřeva se navíc liší v závislosti na druhu dřeviny, např. mez pevnosti bukového dřeva při změně teploty o +80 °C při nulové vlhkosti poklesne o 18,5 %, zatímco při vlhkosti 15 % již o 44 % a při BNV až o 48 % (Požgaj et al., 1997).

Další faktor ovlivňující ohybovou pevnost dřeva lze souhrnně označit za anatomickou strukturu a stavbu dřeva. Pod těmito pojmy lze nalézt zejména strukturu buněčné stěny, orientaci buněk, podíl jarního a letního dřeva v letokruhu, hustotou dřeva, podíl juvenilního dřeva, jádra a běli. Všechny tyto faktory se stejně jako u modulu pružnosti propisují do velikosti mechanické pevnosti dřeva, přičemž listnaté dřeviny v tomto ohledu vykazují vyšší hodnoty ohybové pevnosti než jehličnaté (Alteyrac et al., 2006; Romagnoli et al., 2014). Nejvyšší zaznamenanou ohybovou pevnost dřeva vykazuje jihoamerická *Pouteria eugeniifolia* (Pierre) Baehni která dosahuje až 259 MPa, zatímco hodnoty střeoevropských dřevin se pohybují v rozmezí 60–140 MPa (The Wood Database, 2023).

Dalším faktorem ovlivňujícím ohybovou pevnost je čas, po který působí zatížení na nosník. S rostoucí dobou zatížení úměrně klesá trvalá pevnost dřeva, zejména vlivem viskoelastické povahy dřeva (Moosavi et al., 2016). Trvalá pevnost dřeva záleží na druhu dřeviny a dalších faktorech, nicméně odpovídá přibližně mezi pružnosti materiálu a na této hodnotě se ustálí za přibližně 60 dní (Požgaj et al., 1997).

Poslední významný faktor je způsob zatížení při ohybu. Konstrukční prvky mohou být namáhány různým způsobem, což je dáno především jejich umístěním a designem. Nicméně standardizované testování ohybové pevnosti uvažuje se dvěma způsoby zatížení, a to pomocí trojbodového a čtyřbodového ohybu (ČSN EN 408 + A1, 2012; ČSN EN 13501-2, 2023). Čtyřbodový ohyb má z průběhu momentů zřetelnou oblast, v níž dochází k čistému ohybu bez smykových napětí. Tříbodový ohyb má proto tendenci vykazovat podhodnocení ohybové pevnosti, nicméně čtyřbodový ohyb je citlivější na variabilitu tuhosti dřeva (Hein a Brancheriau, 2018).

## Smyková pevnost

Smykové namáhání je způsobeno dvěma vůči sobě orientovanými silami, které leží na společné ose v rovině řezu tělesa, přičemž takto prostý stříh je pouze teoretický. Vždy totiž spolupůsobí další způsoby namáhání, nicméně nejvíce se mu přibližuje namáhání při stříhu (Halama et al., 2011).

Při ohybu nosníků vznikají v průřezu posouvající síly, které vyvolávají smyková napětí, která mají stejnou velikost ve svislé i vodorovné rovině. Velikost smykového namáhání je závislá na velikosti vnějších posouvajících silách, rozložení hmoty v nosníku a jeho rozměrech. Průběh smykového napětí se však od prostého ohybu liší, jelikož má parabolický průběh s maximem v těžišti tělesa a minimem na vnějších plochách tělesa (Krejsa et al., 2012).

Smyková pevnost dřeva je často rozhodující faktor pevnosti celého nosníku a podléhá anizotropnímu charakteru dřeva, přičemž velmi záleží na orientaci vnějších sil na namáhané těleso. Při smykovém zatížení ve směru vláken vykazuje dřevo nízkou pevnost, nicméně tento způsob namáhání patří k nejčastějším (Crocetti et al., 2010). Průměrné hodnoty smykové pevnosti dřeva se pohybují v rozmezí 10–12 MPa, přičemž listnaté dřeviny vykazují přibližně o polovinu vyšší hodnoty smykové pevnosti než jehličnaté dřeviny. Taktéž záleží na orientaci vláken nosníku. Při smyku v tangenciální rovině vykazují listnaté dřeviny až o 30 % vyšší pevnost než v radiální rovině, nicméně u jehličnatých dřevin je tento rozdíl minimální. Smyková pevnost napříč vláken v radiální nebo tangenciální rovině je v průměru 2× menší (3–6 MPa) než ve směru vláken, zatímco smyková pevnost napříč vláken v příčné rovině (stříh) je přibližně 4× vyšší než pevnost podél vláken (Horáček, 2008).

Pro lepené dřevo je však důležitá i smyková pevnost lepidla samotného. Syntetická adhesiva na dřevo vykazují izotropní chování, což při interakci s anizotropním dřevem přináší řadu problémů (Maćkowiak et al., 2018). Při ohybovém namáhání lepeného dřeva mají jednotlivé vrstvy dřeva tendenci se vůči sobě posouvat, což vyvolává vlivem vzájemnosti smykových napětí smykové namáhání v lepené spáře (Ferrier et al., 2012). Každá jednotlivá lepená spára je proto vystavena smykovému namáhání. Na lepené spáry umístěné v ose ohybu působí největší zatížení, kterému musí lepidlo odolat. Pokud jsou jednotlivé lamely nosníku navzájem spojeny, nemohou se vůči sobě posouvat, což způsobuje vznik horizontálních tahových/tlakových napětí. Pokud tyto tahové/tlakové napětí přesáhnou smykovou pevnost lepidla, dochází k plastickým deformacím lepené spáry vedoucí až k smykové delaminaci (Krejsa et al., 2012).

Velký vliv na smykovou pevnost lepeného dřeva mají zejména použitá lepidla. Pevnost lepidel je ovlivněna řadou faktorů, od chemické struktury a složení lepidla, přes úpravu lepeného povrchu až po tloušťku lepené spáry. V lepených spojích navíc není rozložení smykových napětí konstantní po celé délce lepené spáry. Rozdíl mezi průměrným napětím vypočteným podílem síly ku ploše a lokální akumulací napětí v lepené spáře závisí na mnoha faktorech, zejména na tloušťce vrstvy lepidla a Kirchhoffově modulu  $G_k$ . Lepidla s nižší tuhostí umožňují rovnoměrnější rozložení hodnot smykových napětí. Nerovnoměrná napětí v lepeném spoji lze popsat parametrem  $\beta$ , což je poměr smykových napětí ve spoji ku jmenovitým hodnotám. Parametr  $\beta$  je větší u spojů s tenkou vrstvou lepidla a u lepidel s vyšší tuhostí (Maćkowiak et al., 2018).

Průměrné hodnoty pevností u lepidel se různí, zejména podle chemické podstaty lepidla. Pevnost polymerů používaných pro lepení dřeva se zjišťuje pomocí tahové zkoušky dle ČSN EN ISO 527-1 (2020) a ČSN EN ISO 527-2 (2012). Hodnoty tahové pevnosti se pohybují od 10 do 40 MPa a smyková pevnost od 8 do 20 MPa (de Castro San Román, 2005). Tato pevnost je však charakteristická pro čistý polymer, nikoliv pro lepené dřevo, kde pevnost lepeného spoje ovlivňuje řada dalších faktorů (Knorz, 2015).

Pro zjišťování smykové pevnosti existuje velké množství normovaných zkoušek, nicméně v Evropě stanovuje nejdůležitější podmínky norma ČSN EN 14080 (2013), která vychází z požadavků Eurokódu 5 (ČSN EN 1995-1-1, 2006) a stanovuje minimální smykovou pevnost lepených prvků na 6 MPa, pokud je procento porušení ve dřevě minimálně 90 %, nebo 4 MPa, pokud je porušení ve dřevě 100 % (viz Tab. 1).

Tabulka 1 Procenta porušení dřeva ku smykové pevnosti (ČSN EN 14080, 2013)

	Průměrná hodnota			Jednotlivé hodnoty		
Pevnost ve smyku $f_v$ [MPa]	6	8	$f_v \geq 11$	$4 \geq f_v \geq 6$	6	$f_v \geq 10$
Nejmenší procento porušení ve dřevě [%]	90	72	45	100	74	20

Uspořádání zkoušky smykové pevnosti vychází z normy ČSN EN 408 (2012), která stanovuje rozměry, způsoby úpravy a prostředí pro zkoušení. Alternativou k této normě je i postup stanovený v ČSN EN 302-1 (2013), která upravuje rozměry zkušebních těles a další podmínky nutné pro vykonání zkoušky.

### 3.4.3. Kompozitní materiál – Laminátová teorie

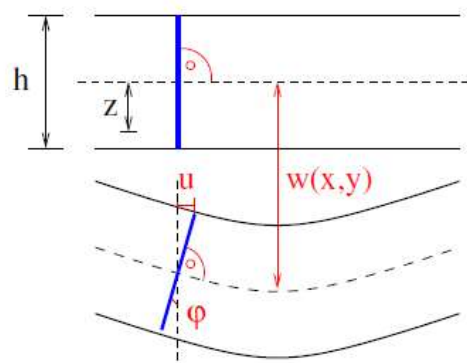
Kompozitní materiál je označení pro materiál sestávající minimálně ze dvou odlišných složek, jejichž vlastnosti se výrazně liší. Existuje celá řada kompozitních materiálů, od vláknitých, přes částicové kompozity, kde je matrice (vlákna, nebo částice) rozptýlená v matrici (zpravidla pryskyřice), až po vrstvené kompozity – lamináty (Menčík, 2019). Kompozitní a sendvičové materiály jsou hojně využívány díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem, zejména vysoké tuhosti a pevnosti. Při navrhování kompozitních konstrukcí je nutná znalost posunutí a napětí vznikajících v materiálu a zároveň je třeba zohlednit účinky smykové deformace v důsledku nízkého poměru příčného modulu pružnosti ve smyku k osovému modulu nebo porušení v důsledku delaminace. Tyto parametry totiž mohou mít významný vliv na chování konstrukcí v provozu, což vede k vyhodnocení jejich vlivu na lokální pole napětí v jednotlivých vrstvách, zejména pak na rozhraní mezi vrstvami (Vidal et al., 2012).

Pro zjišťování vnitřních napětí a přetvoření laminátu existuje celá řada teoretických postupů. Nejběžnější je tzv. Klasická laminátová teorie, která bude popsána dále.

#### Klasická laminátová teorie

Vznik Klasické laminátové teorie je přisuzován Reissnerovi a Stavskému (1961), kteří zároveň formulovali základní předpoklady pro tuto teorii:

- tloušťka laminátu je v porovnání s ostatními rozměry velmi malá,
- každá lamela je vyrobená z makroskopicky homogenního, ortotropního, lineárně pružného materiálu,
- lamely (vrstvy) laminátu jsou dokonale spojeny, spoj je nekonečně tenký,
- posunutí jednotlivých bodů ve všech třech směrech jsou malá a mění se lineárně,
- je uplatněna Kirchhoffova hypotéza, tj. rovinné, normálové průřezy celého laminátu před deformací jsou rovinné a zůstávají normálové k vychýlené střední ploše a nemění svou tloušťku povrchu i po deformaci (viz obr. 21),
- uvažuje se rovinný stav napjatosti,
- příčná zkosení jsou nulová,
- napětí a deformace procházející skrz tloušťku jsou zanedbatelné.



Obr. 21 Kirchhoffova teorie předpokladu o normálách (Brožovský a Materna, 2012)

Vlastnosti celého laminátu jsou odvozeny zejména od vlastností jednotlivých lamin (vrstev), které se v laminátu nacházejí. Základní charakteristiky, které definují vlastnosti laminy jsou tuhost ( $Q$ ) a poddajnost ( $S$ ), přičemž ty vycházejí z materiálových charakteristik modulu pružnosti a Poissonových čísel ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{12}$ ,  $G_{12}$ ). Dosazením těchto proměnných do maticového zápisu lze získat matici poddajnosti (1).

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

kde platí:

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}. \quad (2)$$

Inverzí matice poddajnosti je možné získat matici tuhosti laminy (3).

$$[Q] = [S]^{-1} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & -\frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Dosazením rovnice (1) do maticového zápisu Hookova zákona lze získat rovnici (4):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Inverzí matice (4) lze získat maticový zápis napětí jako funkce deformace (5):

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

V případě, kdy hlavní osa  $I$  (resp.  $L$ ) v materiálovém souřadném systému neodpovídá geometrickému souřadnému systému osy  $x$ , je třeba použít transformační matici  $T$  (viz rovnice 6), která je vztažná pro každou jednotlivou vrstvu laminátu, přičemž úhel  $\varphi$  představuje úhel natočení od osy  $x$ .

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & \sin^2 \varphi & 2 \sin \varphi \cdot \cos \varphi \\ \sin^2 \varphi & \cos^2 \varphi & -2 \sin \varphi \cdot \cos \varphi \\ -\sin \varphi \cdot \cos \varphi & \sin \varphi \cdot \cos \varphi & \cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Výsledný zápis pro přepočtení u napětí a deformace vypadá následovně (7):

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Na zatěžovaný laminát mohou působit zpravidla dva typy zatížení, normálové síly a ohybové momenty. Normálové síly ( $N$ ) působí v rovině laminy, zatímco momenty ( $M$ ) mají tendenci laminu ohýbat. V každé vrstvě laminátu jsou navíc napětí a deformace funkcí tloušťky (viz rovnice 8 a 9), které vycházejí z neutrální osy.

$$N_x \equiv \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x dz, \quad N_y \equiv \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y dz, \quad N_{xy} \equiv \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} dz, \quad (8)$$

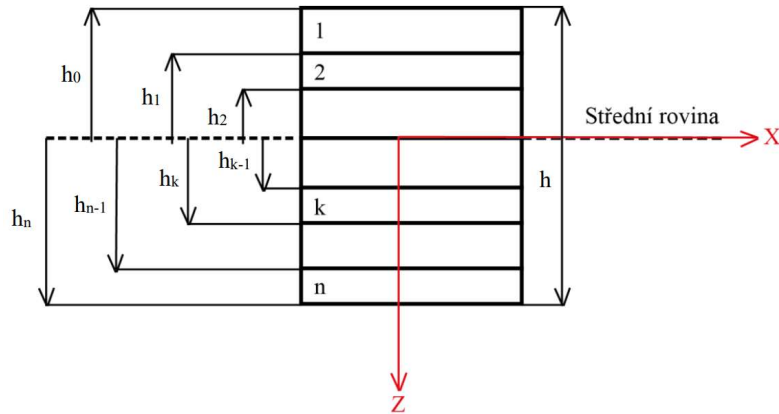
$$M_x \equiv \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x z dz, \quad M_y \equiv \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y z dz, \quad M_{xy} \equiv \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{xy} z dz. \quad (9)$$

Tyto dva typy zatížení působí dva druhy deformací, rovinné ( $\varepsilon$ ) a ohybové ( $\kappa$ ), které udávají míru změny sklonu ohýbané laminy vzhledem k ose  $x$ , nebo  $y$ .  $\kappa_{xy}$  pak vyjadřuje velikost ohybu v ose  $x$  okolo  $y$  roviny. Výpočet neutrální osy udávají rovnice 10 a 11).

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x_0}, \quad \varepsilon_y^0 = \frac{\partial v_0}{\partial y_0}, \quad \gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u_0}{\partial y_0} + \frac{\partial v_0}{\partial x_0} \quad (10)$$

$$\kappa_x = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \kappa_y = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad \kappa_{xy} = -2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (11)$$

Při výpočtu tuhostní matice laminátu se běžně neuvažuje s jednotlivými vrstvami, ale spíše s vyjádřením jejich polohy určitým integrálem, což při dosazení a integraci rovnic 8–11 vyjádří normálové a momentové napětí v rozmezí  $k$ -té laminy ve výšce  $h$  (viz obr. 22 a rovnice 12 a 13).



Obr. 22 Vrstvení laminátu (Aljanabi et al., 2021)

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} (h_k - h_{k-1}) + \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \frac{1}{2} (h_k^2 - h_{k-1}^2) \right\}. \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left\{ \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \frac{1}{2} (h_k^2 - h_{k-1}^2) + \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \frac{1}{3} (h_k^3 - h_{k-1}^3) \right\}. \quad (13)$$

Pro praktické použití je však vhodnější rovnice 12 a 13 substituuovat a rozdělit je na 3 členy, podle jejich působení na laminát, viz rovnice 14.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [Q_{ij}]_k (h_k - h_{k-1}), \quad B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [Q_{ij}]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2), \quad D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [Q_{ij}]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3). \quad (14)$$

kde  $A$  představuje matici tahové (membránové) tuhosti, která dává do souvislosti složky sil vektoru  $N$  s poměrnými deformacemi v rovině  $\varepsilon^0$ ,  $B$  vyjadřuje matici vazebné tuhosti, která popisuje vztah mezi složkou vektoru ohybu  $M$  a deformací ve střední rovině  $\varepsilon^0$  a zároveň složky vektoru vnitřních sil  $N$  se složkami vektoru křivosti  $\kappa$ ,  $D$  vyjadřuje matici ohybové tuhosti, která popisuje složky momentů vektoru  $M$  se složkami křivosti plochy  $\kappa$ , tedy tuhost v ohybu a krutu.

Zápis substitucí je ve zkrácené formě uveden rovnicí 15 a v plné verzi rovnicí 16.

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{bmatrix}. \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} N_y \\ N_x \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} & B_{61} & B_{62} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Rovnice 16 vyjadřuje maticový zápis platný pro většinu laminátů, nicméně záleží na konfiguraci laminátu. V případě symetrických laminátů, kdy je horní část shodná se spodní částí laminátu vzhledem k neutrální rovině, je geometrický střed laminátu shodný s neutrální osou, což způsobí že prvky matice [B] nabydou nulových hodnot. V případě nesymetrických laminátů, vyrovnaných, izotropních, ortotropních, nebo křížem lepených laminátů nabydou jen některé složky matice [B] nulových hodnot (Nettles, 1994; Jones, 1999; Procházka, 2001; Kollar and Springer, 2003; Laš, 2008; Barbero, 2011).

Výše uvedené matice tuhosti a poddajnosti platí jen v případě izotermního prostředí s konstantní vlhkostí. Nicméně lamináty mohou být často vystaveny právě změně vlhkosti a teploty, což se projevuje přidáním dalších členů do rovnice 16. Teplotní namáhání je zahrnuto pod prvky  $N^T$  a  $M^T$ , kdy  $N^T$  reprezentuje normálové složky sil od teplotní roztažnosti, zatímco  $M^T$  vyjadřuje vztah ohybu a teploty. Obdobně tomu je i u vlhkosti, kde platí označení  $N^M$  a  $M^M$ , viz rovnice 17–20.

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N^T \\ M^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N^M \\ M^M \end{bmatrix}. \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} N_1^T \\ N_2^T \\ N_6^T \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} Q_{11}\alpha_1 & Q_{12}\alpha_2 & Q_{16}\alpha_6 \\ Q_{21}\alpha_1 & Q_{22}\alpha_2 & Q_{26}\alpha_6 \\ Q_{16}\alpha_1 & Q_{26}\alpha_2 & Q_{66}\alpha_6 \end{bmatrix} \Delta T dz. \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} M_1^T \\ M_2^T \\ M_6^T \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} z \begin{bmatrix} Q_{11}\alpha_1 & Q_{12}\alpha_2 & Q_{16}\alpha_6 \\ Q_{21}\alpha_1 & Q_{22}\alpha_2 & Q_{26}\alpha_6 \\ Q_{16}\alpha_1 & Q_{26}\alpha_2 & Q_{66}\alpha_6 \end{bmatrix} \Delta T dz. \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} N_1^M M_1^M \\ N_2^M M_2^M \\ N_6^M M_6^M \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} (l, z) \begin{bmatrix} Q_{11}\beta_1 & Q_{12}\beta_2 & Q_{16}\beta_6 \\ Q_{21}\beta_1 & Q_{22}\beta_2 & Q_{26}\beta_6 \\ Q_{16}\beta_1 & Q_{26}\beta_2 & Q_{66}\beta_6 \end{bmatrix} \Delta C dz. \quad (20)$$

kde  $\alpha$  je koeficient teplotní roztažnosti,  $\beta$  je koeficient bobtnání,  $\Delta T$  je rozdíl teplot (od beznapěťové teploty),  $\Delta C$  je rozdíl vlhkostí (od beznapěťové vlhkosti) (Bert, 1989).



### 3.4.4. Modelování vlastností lepeného dřeva

Lepené dřevo má celou řadu vlastností, které lze změřit, kvantifikovat a ověřit pomocí různých výpočtů a teoretických přístupů. Mezi první modely, resp. výpočtové metody pro zjištění vlastností nosníku, patří práce Leonarda da Vinci, který správně předpokládal, že při ohybu nosníků vlivem příčného zatížení zůstávají rovinné průřezy před ohybem i po něm rovinné, nicméně k dokončení své teorie mu chyběl Hookův zákon a znalost derivace. Na jeho práci později navázal Galileo Galilei, ale až v 18. století vznikla ucelená teorie ohybu nosníků pod taktovkou Leonharda Eulera a Daniela Bernoulliho, která se stala všeobecně přijímanou teorií pro ohyb nosníků známá jako Euler-Bernoulliho rovnice (viz rovnice 21) (Rao, 2011).

$$\frac{d^2}{dx^2} = \left( EI \frac{d^2 w}{dx^2} \right) = q, \quad (21)$$

kde křivka  $w(x)$  popisuje průhyb nosníku v ose  $z$  v určité poloze  $x$ ,  $q$  je spojité zatížení,  $E$  je modul pružnosti, a  $I$  je moment setrvačnosti nosníku.

Na práci Eulera a Bernoulliho navázal v roce 1921 Stephen Timoshenko a Paul Ehrenfes teorií ohybu nosníku, která bere v potaz i smykové deformace a rotační charakteristiky ohybu, což z ní činí univerzální metodu pro popis nosníků s konstantním průřezem nebo kompozitních nosníků a to jak pro statické, tak i dynamické zatížení (viz rovnice 22) (Labuschagne et al., 2009).

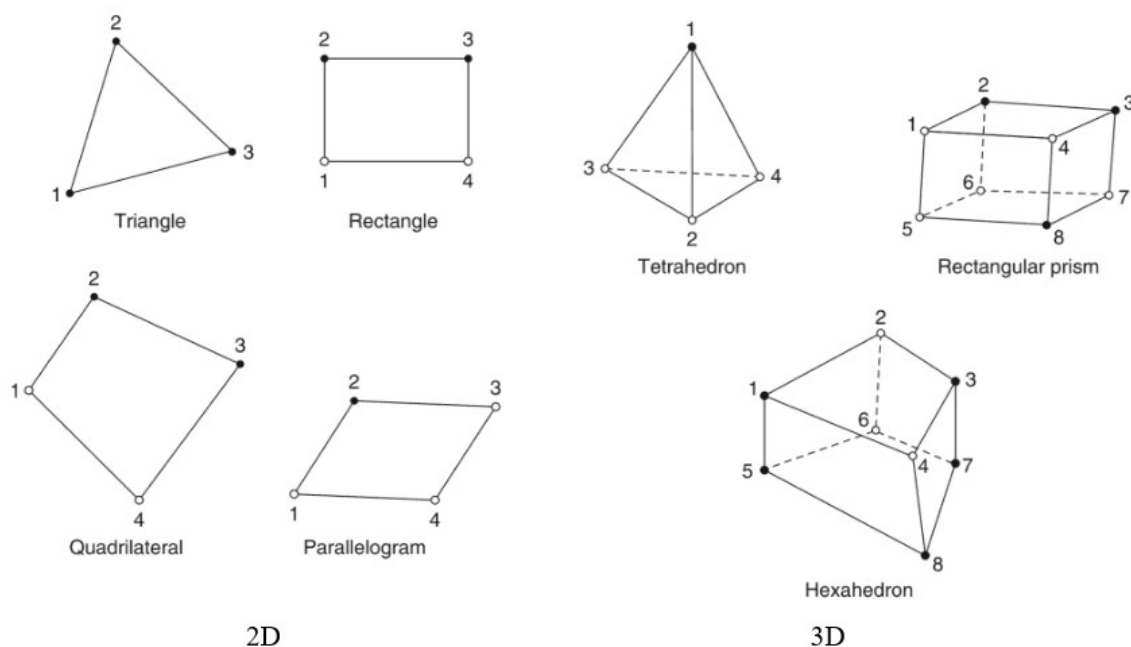
$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = q(x) - \frac{EI}{\kappa AG} \cdot \frac{d^2 q}{dx^2}, \quad (22)$$

kde  $\kappa$  je tzv. Timoshenkův smykový koeficient, vztahovaný vzhledem ke geometrii nosníku (pro obdélníkový průřez odpovídá hodnotě  $\frac{5}{6}$ ),  $A$  je plocha příčného průřezu a  $G$  je smykový modul pružnosti.

V praxi však existuje celá řada různých teorií pro výpočty vlastností nosníků, nejen ohybu, ale i krutu, klopení a řady dalších vlastností. Mezi nejznámější proto patří de Saint Venantovo řešení, variační asymptotické řešení (VABS), zevšeobecněná teorie nosníků (GBT), klasická teorie nosníků (CBT), modely vyšších řádů (parabolická, kubická, kvartická a teorie  $n$ -řádu), úplný případ lineárního rozšíření (CLEC) a mnoho dalších. Jejich použití, výhody a nevýhody však vždy záleží na okrajových podmínkách, jistě míře zjednodušení, tvaru ohýbaného prvku a v neposlední řadě zejména na druhu namáhání (Carrera et al., 2011).

Problém analytických metod řešení je jejich časová náročnost, která kdysi představovala překážku, nicméně s nástupem moderní výpočetní techniky lze tyto výpočty provést v řádově kratších časových intervalech. Hlavním nástrojem se proto staly softwarové programy využívající matematické modelování, které v dnešní době využívají i neuronové sítě a různé metody strojového učení pro zlepšování kvality výpočtu (Ramuhalli et al., 2005).

Mezi nejběžnější nástroje matematického modelování patří tzv. metoda konečných prvků (MKP, FEM z ang. Finite element method), která rozdělí modelovaný objekt na diskrétní počet menších prvků (viz obr. 23), u kterých vypočítává pomocí parciálních diferenciálních rovnic (PDE) působení funkcí na každý jednotlivý uzel prvku, přičemž aproximuje výsledek mezi jednotlivými uzly (Bhavikatti, 2005).

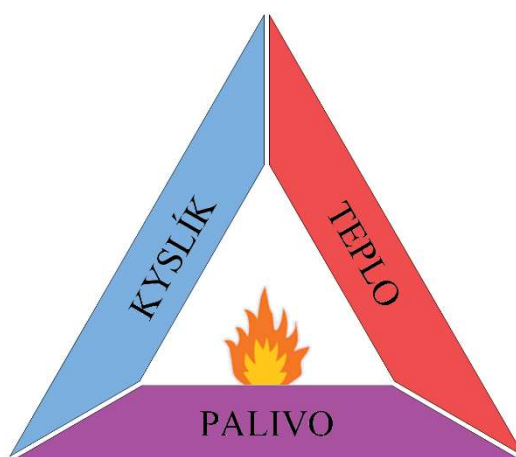


Obr. 23 Základní prvky metody konečných prvků (Rao, 2017)

Výhodou použití metody konečných prvků v analýze (FEA) je zejména rychlost výpočtu a možnost nadefinovat různé parametry ještě před výrobou fyzických prototypů a tedy zjištění vhodných kombinací, které odpovídají požadovanému výsledku bez nutnosti vynakládat zdroje na materiál (Vodiannikov a Kashevarova, 2019). Nevýhodou FEA je pak nutnost jisté míry zjednodušení výpočtu, což snižuje přesnost, ale šetří výpočetní výkon a čas. Při modelování pomocí MKP je proto vždy třeba výsledek ověřit pomocí standardních analytických metod (Shakimon et al., 2016).

### 3.5. Hoření

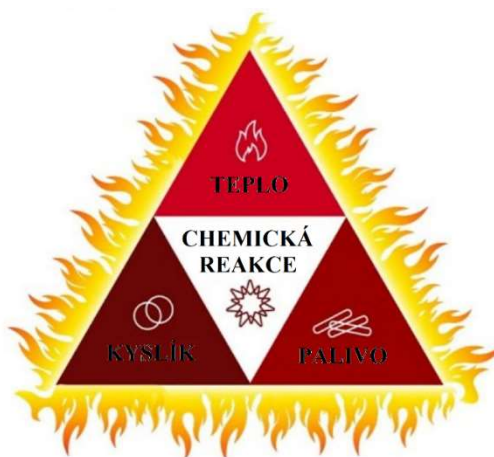
Lepené lamelové dřevo je v dnešní době již běžným stavebním materiálem. Ze své biologické podstaty je však dřevo hořlavé (Barber, 2015). Při hoření dřeva dochází k pyrolýze látek ve dřevě, jenž se přeměňují na hořlavé plyny a zuhelnatěnou vrstvu. Teplotní tok, který dřevo přijímá od zdroje, je primární složkou tepla potřebného k pyrolýze (Drysdale, 2011). Třetí látkou, která je třeba pro proces hoření je oxidační činidlo. Pro hoření dřeva je to zpravidla vzdušný kyslík, nicméně u hoření jiných látek funguje jako oxidační činidlo i chlór nebo některé kyseliny. Tyto tři základní aspekty, tedy palivo, zdroj tepla a oxidační činidlo jsou podmínkou pro vznik tzv. trojúhelníku hoření (viz obr. 24) (Pédrot a Tabareau, 2020).



Obr. 24 Trojúhelník hoření (Gamble a Schopf, 2010)

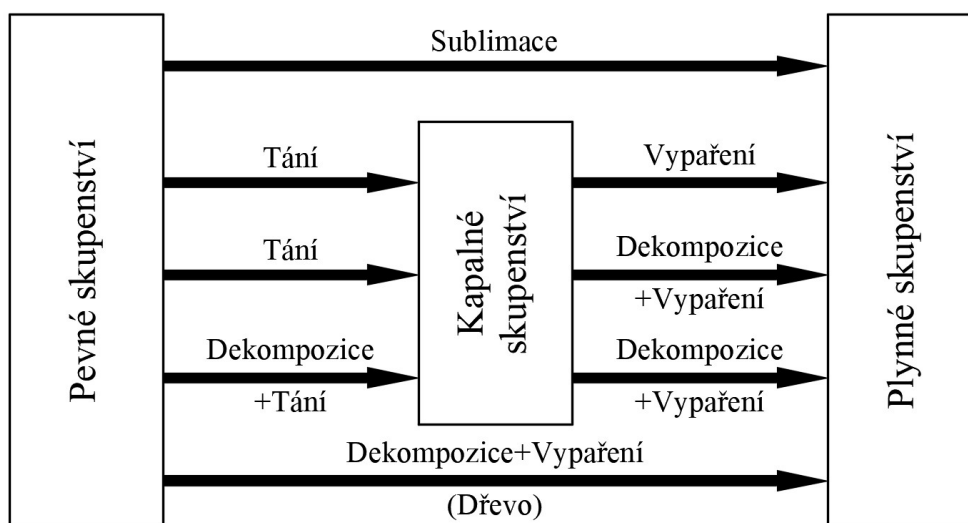
Jsou-li tyto tři složky ve správném poměru a v dostatečných koncentracích, může následovat proces hoření. Je-li naopak alespoň jedna z těchto složek nepřítomna nebo omezena, nemůže dojít k hoření, případně ani k výbuchu. Oxidační činidlo (především vzduch) a hořlavé látky nelze téměř nikdy z trojúhelníku vyloučit, proto je potřeba pro zamezení hoření provést zejména odstranění iniciačního zdroje z prostoru, kde se nachází hořlavá látka nebo odstranění hořlavé látky z prostoru, kde se nachází iniciační zdroj (Wang et al., 2005).

Pro trojúhelník hoření je důležitý ještě jeden faktor, a to faktor chemické kinetiky, který způsobuje pokračování reakce spalování. Jednotlivé složky trojúhelníku hoření spolu samy o sobě nereagují, ale až díky chemickým změnám a energii radikálových řetězových reakcí lze dosáhnout dostatečné energie pro vznik hoření. V důsledku toho byl zaveden tetraedr hoření (ang. fire tetrahedron) (viz obr. 25) (Gorbett a Kozhumal, 2023).



Obr. 25 Tetraedr hoření (Calams, 2020)

Hoření však ovlivňují i další procesy a faktory, které mají vliv na výsledek. Mezi fyzikální procesy, které doprovázejí proces hoření, lze zařadit změnu skupenství. Skupenství hraje důležitou roli v tom, jak se bude požár rozšiřovat, jak a čím jej hasit a v neposlední řadě, jaké reakce se dějí uvnitř hořícího materiálu (Drysdale, 2011). Procesy změny skupenství znázorňuje obr. 26.



Obr. 26 Přehled druhů změny skupenství u polymerních látek (Drysdale, 2011)

Druhým faktorem je koncentrace a promíchání jednotlivých složek hoření. Existují dva odlišné způsoby, ve kterých mohou paliva hořet. Prvním způsobem je tzv. difúzní hoření, které nastává v případě důkladného smíchání paliva s kyslíkem (nebo vzduchem) před spalováním. Druhým způsobem je případ, kdy jsou palivo a kyslík (nebo vzduch) zpočátku oddělené, ale spalují se v oblasti, kde se míchají, což je označováno za smíšené hoření (George a Constantin, 2013).

Další faktor ovlivňující proces hoření je teplo a jeho přenos. V zásadě lze rozeznat tři způsoby přenosu tepla, vedení (kondukce), proudění (konvekce) a sálání (radiace). Přenos tepla vedením je uskutečňován v pevných látkách, zatímco proudění je prováděno v kapalinách a plynech. Přenos tepla sáláním je pak přenos tepla pomocí elektromagnetického záření. Při hoření je objekt zahříván, přičemž se teplo přeneso částečně konvekcí, pokud je v tekutině jako je vzduch, a částečně zářením. Konvekce převládá při nízkých teplotách (cca <math>150\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}</math>), ale od cca  $400\text{ }^\circ\text{C}</math> se záření stává stále dominantnějším. Při teplotě okolo  $550\text{ }^\circ\text{C}</math> vyzařuje objekt dostatečné záření v optické oblasti, přičemž se stává viditelným (Drysdale, 2011).$$

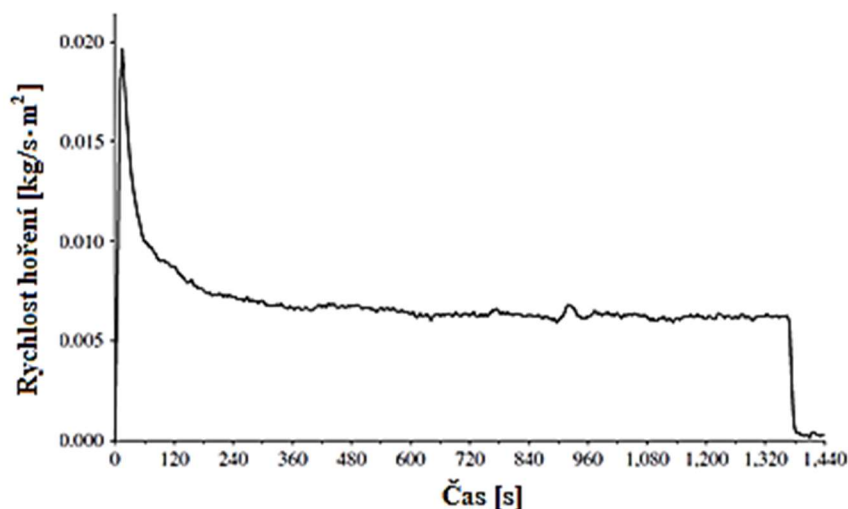
Přenos tepla ve dřevě a jeho velikost je dána zejména fyzikálními vlastnostmi dřeva jako je tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita a teplotní difuzivita. Tyto tepelné parametry jsou silně ovlivněny zejména vlhkostí, teplotou, hustotou dřeva, pórovitostí a orientací tepelného toku vzhledem k orientaci vláken ve dřevě (Pečenko et al., 2015). Vlákňitý charakter dřeva je ve vztahu k pórovitosti výborným činitelem. Vzduch je totiž velmi dobrý tepelný izolant, přičemž lumeny vyplněné vzduchem slouží jako dobrá izolační vrstva (Požgaj et al., 1997). Všechny tyto parametry pak ovlivňují ztráty, které dodávaný tepelný tok musí překonat, aby nastala pyrolýza dřeva a započal proces hoření. Velikost těchto vlastností je navíc pro každou dřevinu unikátní a vzhledem k velké heterogenitě a anizotropii dřeva i důležitý faktor pro navrhování dřevěných konstrukcí, které musí odolávat požáru (Friquin, 2011).

Dalším faktorem ovlivňující hoření je obsah vody ve dřevě a schopnost vázat vodu. Tím, že dřevo obsahuje vodu, dochází při ohřevu nejprve k odstranění vody. Voda má velkou tepelnou kapacitu ( $4,18\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}</math>), a proto je třeba vynaložit velké množství energie, aby se ze dřeva vypařila. V porovnání se dřevem, které má tepelnou kapacitu v intervalu  $1,3\text{--}1,7\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}</math> je proto nutné dodat přibližně trojnásobné množství energie, což z hlediska požárního trojúhelníku odebírá energii potřebnou ke vzniku hoření (Samarasekara a Coorey, 2011).$$

Vliv na hoření dřeva má bezesporu i druh dřeviny, jeho anatomická struktura a chemické složení dřeva. Právě chemické složení má velký vliv na teplotní vlastnosti dřeva a s tím související hoření (Di Blasi, 2008). Dřevo je komplex chemických látek, přičemž největší podíl má celulóza, hemicelulózy a lignin. Tyto tři látky jsou základními stavebními jednotkami všech dřevin a jejich teplotní vlastnosti ovlivňují dřevo nejvíce (Senneca a Cerciello, 2023).

V menším zastoupení se ve dřevě vyskytují i extraktivní látky, mezi něž patří zejména terpeny, trísloviny, tuky a vosky, které ze své podstaty nejsou termicky stabilní jako celulóza a při hoření se rozkládají ze složek dřeva nejdříve (Di Blasi et al., 2001). Při zvýšení teploty (150–275 °C) nastává rozklad labilnějších složek dřeva, jako jsou hemicelulózy, pryskyřice, oleje a tuky. Při dalším zvyšování teploty se začínají rozkládat i celulóza (240–350 °C) a lignin (280 – 500 °C) (Drysedale, 2011).

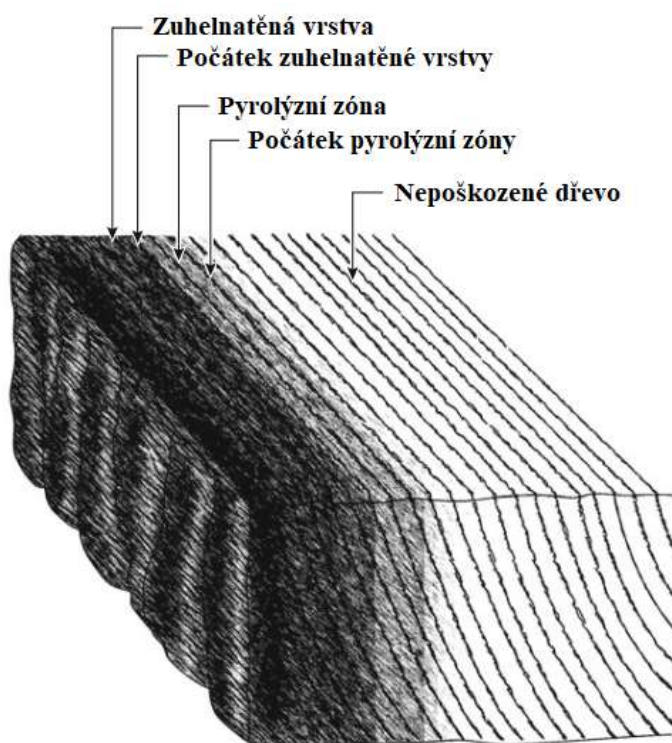
Všechny tyto faktory ovlivňují nejen rychlost hoření a úbytek hmoty, ale i průběh samotného hoření dřeva, které lze rozdělit na dvě fáze se spojitým průběhem (viz obr. 27). První fáze je rychlá termická dekompozice dřeva za vzniku plynných produktů, které hoří nad samotným dřevem a dále podporují termický rozklad, což lze nazvat jako přechodná fáze, která je charakteristická rapidním odstraněním vlhkosti z povrchových vrstev dřeva a s postupující pyrolýzou i velkým úbytkem hmoty dřeva (Veliz a Guzman, 2020).



Obr. 27 Odhořívání dřeva v čase (Drysedale, 2011)

Druhou fází je vznik zuhelnatěné vrstvy, která se označuje za kvazi-stacionární stav, kdy dochází vlivem tvorby zuhelnatěné vrstvy ke snížení rychlosti úbytku hmoty dřeva až do stavu, kdy se rychlost úbytku hmotnosti v průběhu času výrazně nemění. S rostoucí tloušťkou zuhelnatěné vrstvy se snižuje množství energie vstupující do dřeva, zejména vlivem akumulace tepla v povrchové žhnoucí zuhelnatěné vrstvě. Snížení přenosu tepla do dřeva je částečně způsobeno také tím, že zuhelnatěná vrstva dřeva má nižší efektivní tepelnou vodivost (až 6× oproti rostlému dřevu) zejména vlivem nehomogenní struktury a vysoké poréznosti, čímž se snižuje přenos tepla vedením do pyrolýzní vrstvy (Cuevas et al., 2021).

Teplota uprostřed průřezu proto zůstává mnohem nižší než na povrchu, kde téměř nedochází ke změně fyzikálních a mechanických vlastností a úbytek únosnosti těchto prvků je dán pouze redukcí jejich průřezu účinkem požáru. Při hoření dřeva postupuje přední strana pyrolýzy směrem do hloubky a tvoří hranici mezi pyrolyzovaným a neporušeným dřevem (viz obr. 28). Rychlost zuhelnatění, kterou lze považovat za rychlost šíření přední části pyrolýzy je důležitým parametrem pro kvantitativní vyhodnocení požární odolnosti dřevostaveb (Gong a Yang, 2022).



Obr. 28 Pyrolýza dřeva (White, 2016)

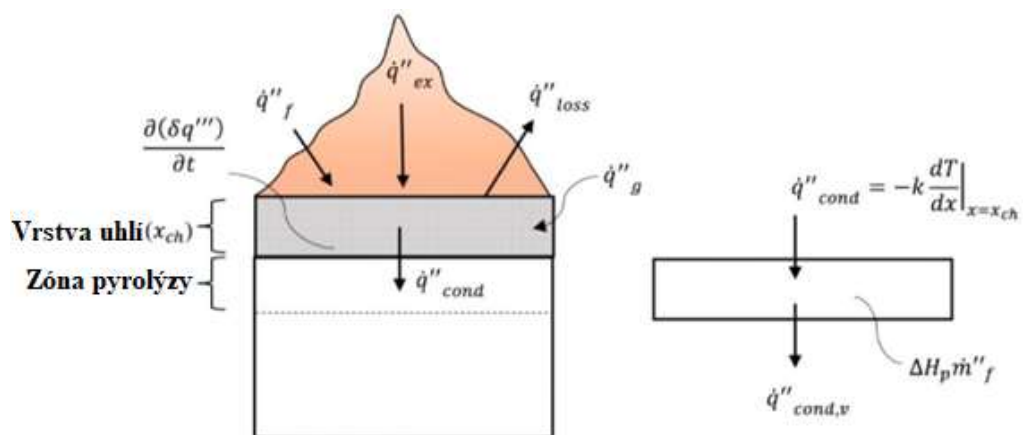
Vznik zuhelnatěné vrstvy má vliv i na tvar plamene, který vzniká v důsledku hoření plynných produktů pyrolýzy. V přechodné fázi má plamen definovatelný jednotný tvar, který je přichycený k hořícímu objektu. Plamen vzniklý od hoření plynů unikajících ze dřeva je sice rovněž zdrojem teplotního toku, nicméně sám o sobě tvoří clonu, která brání původnímu zdroji v dodávce teplotního toku do dřeva (Lin et al., 2023). Jakmile se dřevo dostane do kvazistálého stavu, plamen již nemá dobře definovaný tvar a vlivem snížení rychlosti pyrolýzy zuhelnatěnou vrstvou dochází ke snižování výšky plamene. Na druhou stranu vlivem popraskání zuhelnatěné vrstvy způsobené zejména expanzí pyrolýzních plynů dochází ke vzniku menších lokalizovaných plamenů, jejichž tvar je prudce nestabilní a těžko předvídatelný (Atiku et al., 2017).

Snížování výšky plamene a zpomalování rychlosti pyrolýzy dřeva s sebou nese i další efekt, který ovlivňuje celý proces hoření, zejména terminální fázi kvazistálého stavu. Po překročení kritického množství dodávky pyrolýzních plynů do plamenného hoření dochází u dřeva k tzv. bezplamennému hoření, které je charakteristické nízkou teplotou projevující se žhnutím zuhelnatěné vrstvy (Anca-Couce et al., 2012). Teplota vznikající vlivem oxidačních reakcí už ovšem není natolik velká, aby dostatečně penetrovala zuhelnatěnou vrstvu, což dále snižuje rychlost pyrolýzy dřeva. Pokud v této fázi nenastane poškození zuhelnatěné vrstvy a odhalení dřeva, například vlivem popraskání ohořelých částí, dojde k tzv. samozhášivému efektu (Liang et al., 2023).

Pro pochopení procesu hoření pevných látek je běžně používaná tzv. energetická rovnováha (viz. rovnice 23 a obr. 29).

$$\dot{m}_f'' = \frac{1}{L_v} \left[ \dot{q}_{ex}'' + \dot{q}_f'' + \dot{q}_{ch}'' - \dot{q}_{loss}'' - \left( -k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_{ch}} \right) - \frac{\partial q''}{\partial t} \right]. \quad (23)$$

Příjem energie pro reakci hoření je ovlivněn vnějším zdrojem tepla ( $\dot{q}_{ex}''$ ), radiací tepla z plamene ( $\dot{q}_f''$ ), a teplem generovaným z oxidace zuhelnatěné vrstvy dřeva ( $\dot{q}_{ch}''$ ), (Emberley et al., 2017b). Tento příjem je na druhou stranu vyrovnáván energií potřebnou pro zplyňování složek dřeva v pyrolýzní oblasti ( $L_v \dot{m}_f''$ ), kumulací energie v zuhelnatěné vrstvě ( $\partial q'' / \partial t$ ), která dále ztrácí energii radiací a kondukcí na ohřivaném povrchu ( $\dot{q}_{loss}''$ ) a v neposlední řadě také kondukcí tepla z pyrolýzní oblasti do původního materiálu ( $-k|dT/dx|$ ) (Morrisset et al., 2021). Velký vliv mají rovněž ostatní ztráty, například energie potřebná pro ohřátí a vypaření obsažené vody ze dřeva (Simms a Law, 1967). Vlivem nárůstu tloušťky zuhelnatěné vrstvy pak dochází k posunu této bilance až ke kritické hranici, kdy dřevo začne vykazovat samozhášivý efekt (Bartlett et al., 2019).



Obr. 29 Energetická bilance hoření (Morrisset et al., 2021)



Rychlost šíření plamene, resp. průběh pyrolýzy u dřeva, je ovlivněn několika faktory. V zásadě ale dřevo odhořívá poměrně konstantní rychlostí, a to díky vzniku zuhelnatělé vrstvy, která omezuje další přístup tepla do materiálu a má za následek relativně konstantní úbytek hmoty, který je přibližně 1 mm/min (Drysdale, 2011). Na rychlost šíření plamene má vliv mnoho faktorů, které jsou uvedeny v tabulce č. 2.

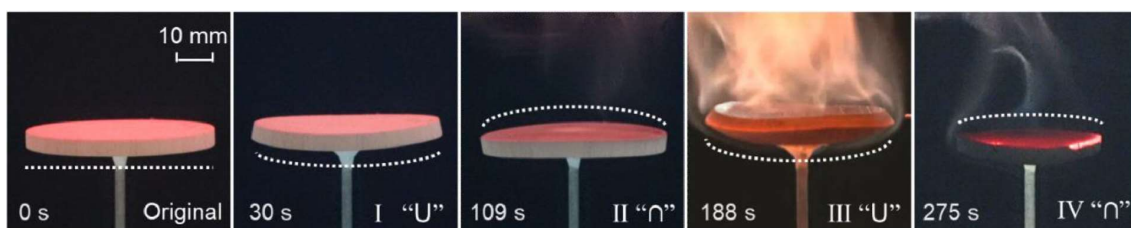
Tabulka 2 Faktory ovlivňující šíření plamene po pevných látkách (Drysdale, 2011).

Materiálové faktory		Environmentální faktory
Chemické	Fyzikální	
Složení paliva	Počáteční teplota	Složení atmosféry
Výskyt retardérů hoření	Orientace povrchu	Atmosférický tlak
	Směr propagace plamene	Teplota
	Tloušťka	Rychlost proudění vzduchu
	Tepelná kapacita	Velikost teplotního toku
	Tepelná vodivost	
	Hustota	
	Geometrie	
	Kontinuita povrchu	

V lepeném dřevě hraje navíc důležitou roli i samotné adhesivum, které reaguje na změny teploty. Jak bylo uvedeno výše, moderní adhesiva jsou polymery založené na různých bázích, od fenolických, přes aminové, isokyanátové, polyvinyl esterové až po epoxidové pryskyřice. Každá z těchto bází navíc reaguje na změny teploty jinak, nicméně, všechny mají společné vlastnosti, tzv. teplotu skelného přechodu a teplotu tání krystalické fáze (teplota tečení amorfního polymeru), při kterých nastávají změny struktury a vlastností adhesiva (Li a Stoliarov, 2014). Tyto změny mohou dosáhnout až meze pevnosti lepidla a způsobit delaminaci lepené spáry a rozpad nosníku. Pro konstrukční materiály je však takové chování nepřípustné a při požáru nesmí dojít k delaminaci, zejména u nosných prvků, jelikož může způsobit druhý tzv. flashover (celkové vzplanutí) (Brandon a Östman, 2016).

Dřevo vystavené požáru vykazuje i změnu rozměrů a geometrie. Změna rozměrů je dána především změnou vlhkosti ve dřevě (sesychání) a taktéž teplotní roztažností dřeva. Změna geometrie je ovlivněna zejména orientací vláken ve dřevě, přičemž radiální a tangenciální dřevo reaguje na tyto změny odlišně (Pečenko et al., 2015).

Deformace geometrie nastává ve 4 fázích (viz obr. 30). První fází je deformace vlivem sesychání, kdy dřevo vystavené shora zdroji tepla vysychá rychleji než odvrácená strana materiálu, tudíž se dřevo prohýbá do tvaru  $\cup$ . Druhou fází je deformace vlivem teplotní roztažnosti. Tento efekt je dán vlivem gradientu teploty mezi plochou vystavenou zdroji tepla a odvrácenou stranou. V této fázi se dřevo prohýbá do tvaru  $\cap$ . Třetí fází je pyrolýzní sesychání, při kterém exponovaná strana materiálu vlivem pyrolýzního rozkladu ztrácí nejvíce hmoty a vzniká zuhelnatěná vrstva, která se vyznačuje  $\cup$  tvarem. Čtvrtá fáze je teplotní roztažnost vlivem oxidace zuhelnatěné vrstvy uvolňující značné množství tepla, které však přes vznikající vrstvu popela obtížně emituje teplo z materiálu pryč (Wang et al., 2021).



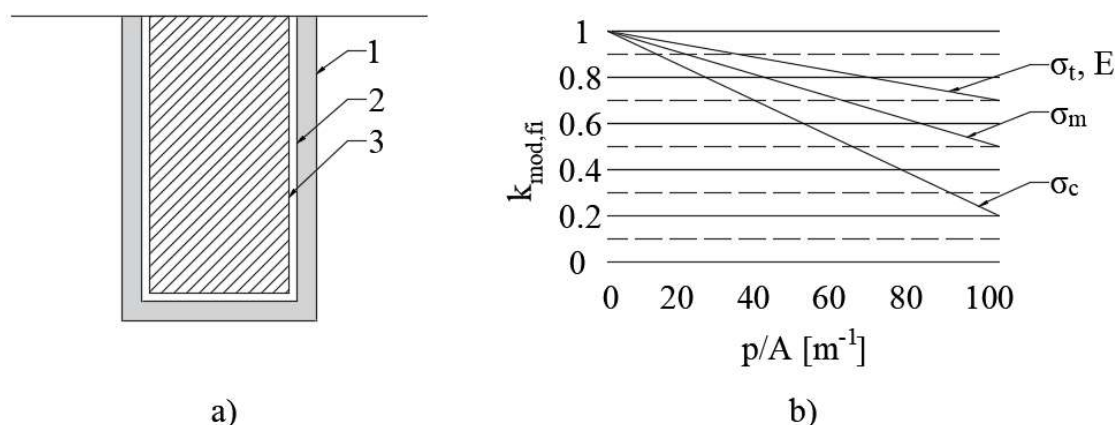
Obr. 30 Deformace geometrie dřeva při hoření (Wang et al., 2021)

### 3.5.1. Požární odolnost dřevěných konstrukčních prvků

V současné době je běžné používání lepeného lamelového dřeva (Glulam, GLT) v konstrukčních aplikacích, které je tvarově stabilnější, obsahuje méně vad a tím pádem je i pevnější než masivní dřevo. Z požárního hlediska dřevo sice hoří, avšak vlivem vzniku izolační zuhelnatělé vrstvy si zachovává svou pevnost i v případě požáru (Schmid et al., 2015), zatímco nechráněná ocel reaguje na zvýšení teploty téměř okamžitě snížením své pevnosti (Bowyer et al., 2016). V případě homogenních lepených nosníků lze zjišťovat teplotní charakteristiky a vlastnosti ovlivňující hoření podobně jako v případě masivního dřeva (Xing et al., 2021). Kombinace dřevin v lepeném programu však může přinášet různá úskalí, zejména vlivem jiné anatomické struktury, fyzikálních vlastností a jiné teplotní roztažnosti každé dřeviny (Uzelac Glavinić et al., 2020; Wang et al., 2021).

Použití dřeva v konstrukcích je v dnešní době svázáno hned několika normativními pravidly. Mezi nejvýznamnější normy patří zejména Eurokód 5 (ČSN EN 1995-1-2, 2006), který blíže charakterizuje limity jeho použití. Každý prvek, část konstrukce, spojovací prostředky i celá konstrukce musí splňovat předem daná kritéria (E – celistvost, R – únosnost, I – izolace).

V případě dřevěných prvků pak záleží na změně vlastností při požáru a taktéž na tom, zda je dřevěný prvek chráněn po celou dobu požáru, při jeho začátku či není chráněn vůbec. Na základě těchto proměnných je posléze stanovena hloubka zuhelnatění a z ní (například pomocí metody redukovaného průřezu, či metodou redukovaných vlastností) je zjištěn zbytkový průřez, který by si měl zachovat pevnostní vlastnosti i po účincích požáru, viz obr. 31 (ČSN EN 1995-1-2, 2006).



Obr. 31 Výpočetní metody podle ČSN EN 1995-1-2 (2006)

a) metoda redukovaného průřezu, b) metoda redukovaných vlastností

$l$  - počáteční povrch prvku,  $2$  - okraj zbytkového povrchu,  $3$  - okraj účinného průřezu,  $\sigma_t$  je pevnost v tahu,  $\sigma_m$  je pevnost v ohybu,  $\sigma_c$  je pevnost v tlaku,  $E$  je modul pružnosti,  $k_{mod,fi}$  je modifikační součinitel pro požár,  $p$  je obvod zbytkového průřezu vystaveného požáru,  $A$  je plocha zbytkového průřezu.

Hloubka zuhelnatění vychází z návrhové rychlosti zuhelnatění daného materiálu a délky trvání požárního zatížení (viz rovnice 24). Návrhová rychlost zuhelnatění je závislá zejména na hustotě dřeva či materiálů na jeho bázi (zpravidla nepřímo úměrně) a je uvedena tabelárně charakteristickou hodnotou v ČSN EN 1995-1-2 (2006). Dřevo je však materiál organického původu s poměrně širokým rozptylem vlastností i hustoty v rámci jedné pevnostní třídy. Doba požární odolnosti (doba trvání požárního zatížení), po kterou musí konstrukce splňovat podmínky únosnosti, je stanovena na základě požárního rizika určeného podle ČSN 73 0802, (2009) Požární bezpečnost staveb.

$$d_{char,0} = \beta_0 \cdot t \quad (24)$$

kde  $d_{char,0}$  je návrhová hloubka pro jednorozměrné zuhelnatění,  $\beta_0$  je jednorozměrná rychlost zuhelnatění při vystavení účinkům normovaného požáru a  $t$  je doba vystavení.

V Eurokódu 5 (ČSN EN 1995-1-2, 2006) jsou k dispozici dva modely pro stanovení míry zuhelnatění, a to jednorozměrný a dvourozměrný model. Jednorozměrný model je zjednodušenou verzí, kde je hloubka zuhelnatění dřeva lineární v čase, zatímco dvourozměrný neboli nominální model je pokročilejší metodou, která zahrnuje účinek zaoblení rohů (viz tabulka č. 3). Tyto dva modely používají normovanou teplotní křivku.

Tabulka 3 Návrhové rychlosti zuhelnatění  $\beta_0$  (ČSN EN 1995-1-2, 2006)

Druhy dřeviny	$\beta_0$ [mm/min]
Dřevo jehličnatých dřevin a buk	
- Lepené lamelové dřevo s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65
- Rostlé dřevo s charakteristickou hustotou $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65
Dřevo listnatých dřevin	
- Rostlé nebo lepené lamelové dřevo listnatých dřevin s charakteristickou hustotou $290 \text{ kg/m}^3$	0,65
- Rostlé nebo lepené lamelové dřevo listnatých dřevin s charakteristickou hustotou $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,5

Tyto hodnoty jsou však platné pro charakteristickou hustotu dřeviny  $\rho_k 450 \text{ kg/m}^3$  a tloušťku desek 20 mm. Hodnoty je však možné přepočítat pomocí rovnice 25 na ostatní hodnoty hustot a tlouštěk.

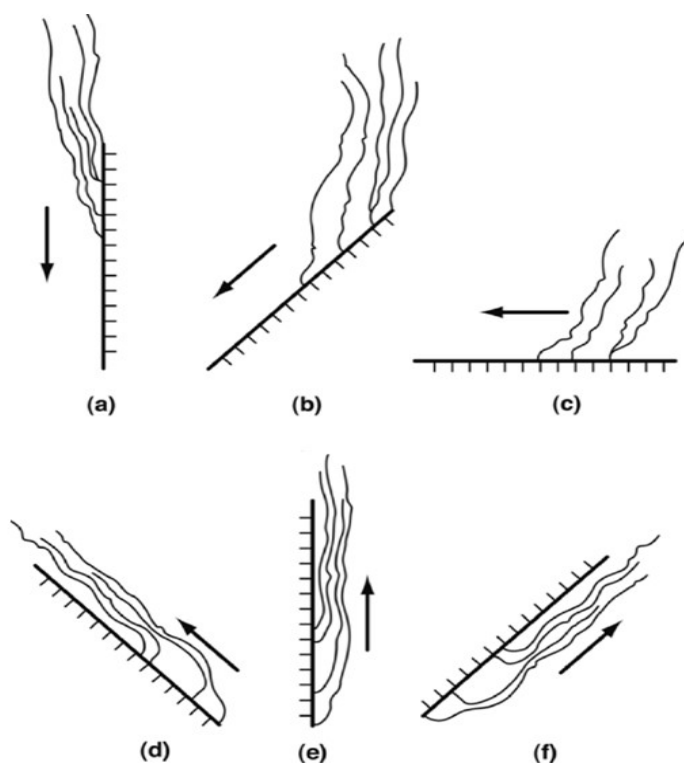
$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 \cdot \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \cdot \sqrt{\frac{20}{h_p}}, \quad (25)$$

kde  $\rho_k$  je charakteristická hustota [ $\text{kg/m}^3$ ] a  $h_p$  je tloušťka desky [mm].

U zuhelnatěné vrstvy se předpokládá nulová pevnost, a tudíž podle stávajících návrhových kódů nepřispívá k únosnosti a tuhosti při hodnocení zbytkové kapacity dřevěného profilu při požáru. Zbytkovou nosnou kapacitu dřevěného prvku lze určit na základě zmenšeného průřezu, aniž by se zohlednila zuhelnatěná vrstva. Z toho důvodu byly charakteristiky zuhelnatění dřeva, včetně hloubky zuhelnatění a rychlosti zuhelnatění při působení ohně prokázány jako základní veličiny pro hodnocení termomechanické degradace a požární odolnosti (Qin et al., 2021). Hořlavost jednotlivých částí konstrukce závisí na poměru povrchu k objemu prvků, přičemž platí, že se plamen šíří rychleji, čím větší je tento poměr. Povrch objektů je zpravidla větší, pokud se jedná o prvky s vysokou drsností povrchu s množstvím ostrých hran.

Z tohoto důvodu se dřevěné prvky opracovávají pomocí rovinných frézek a zaoblují se jejich hrany. Trhliny a praskliny taktéž nepříznivě zvyšují účinky požáru na pevnostní charakteristiky jednotlivých prvků. Požární odolnost lepeného lamelového dřeva proto vykazuje menší míru zuhelnatění a větší míru zbytkového průřezu než masivní dřevo, zejména vlivem absence trhlin a dalších vad dřeva (Janssens, 2005).

Další faktor, který je třeba při navrhování dřevěné konstrukce zvážit, je orientace jednotlivých prvků, které mají odolávat působení požáru. Požár a šíření plamene je nejrychlejší na svislých plochách a v ostrých rozích místnosti (viz obr. 32). Důvodem tohoto chování je způsob, jakým se mění fyzikální interakce mezi plamenem a nespáleným palivem vzhledem k jejich vzájemné orientaci. Při šíření směrem dolů a horizontálním šíření vede vtahování vzduchu do plamene k "protiproudému šíření" (tj. šíření proti indukovanému proudění vzduchu), ale při šíření směrem nahoru na svislém povrchu vytváří přirozený vztlak plamene souběžné šíření. Tím se výrazně zvyšuje rychlost šíření, protože plamen a horké plyny stoupají stejným směrem vyplňují mezní vrstvu a vytvářejí vysokou rychlost přenosu tepla před zónou hoření. Délka plamene je proto rozhodujícím faktorem, protože určuje délku zóny ohřevu (Gollner et al., 2017).



Obr. 32 Šíření plamene pod různými úhly (Drysdale, 2011)

kde pro horizontální rovinu platí úhel a)  $-90^\circ$  b)  $-45^\circ$  c)  $0^\circ$  d)  $+45^\circ$  e)  $+90^\circ$  f)  $-45^\circ$ ,

*a-c* je protiproudé působení, *d-f* je soubředé působení plamene

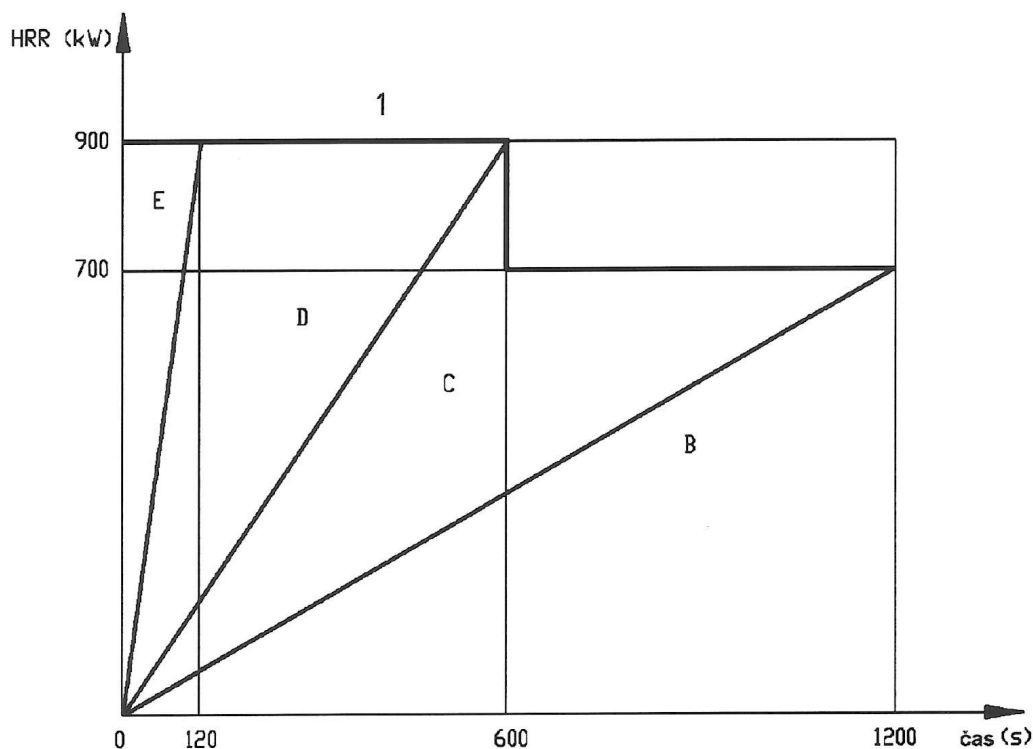
### 3.5.2. Reakce na oheň

Reakce jakéhokoliv materiálu, tedy i dřeva, na oheň se zkouší podle normy ČSN EN 13501-1 (2021), přičemž norma definuje třídy reakce na oheň: *A1*, *A2*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F*. Nehořlavé materiály jsou ve třídách *A1* a *A2*. K třídě reakce na oheň se váže tzv. flashover, neboli celkové vzplanutí. Tabulka 4 uvádí, jak jednotlivé třídy reakce na oheň přispívají k rozvoji požáru a za jaký čas je dosaženo celkového vzplanutí.

Tabulka 4 Třídy reakce na oheň (ČSN EN 13501-2, 2023)

Třída	Reakce na oheň	Příklad materiálů	Celkové vzplanutí
A1	Žádný příspěvek k rozvoji požáru	Cement, vápno, keramika	Bez celkového vzplanutí
A2	Nepodstatný příspěvek k rozvoji požáru	Sádrokartonové desky	Bez celkového vzplanutí
B	Velmi limitovaný příspěvek k rozvoji požáru	Dřevocementové izolační desky	Bez celkového vzplanutí
C	Limitovaný příspěvek k celkovému vzplanutí	SDK desky s papírovou tapetou, celulózová izolace	Celkové vzplanutí po 10 min od začátku požáru
D	Příspěvek k celkovému vzplanutí	Dřevo, OSB desky	Celkové vzplanutí mezi 2 a 10 min od počátku požáru
E	Značný příspěvek k celkovému vzplanutí	Pěnový polystyren zpomalující hoření	Celkové vzplanutí do 2 min od počátku požáru
F	Nezkoušeno, příp. nevyhoví třídě E	PS, Mirelon	nespecifikováno

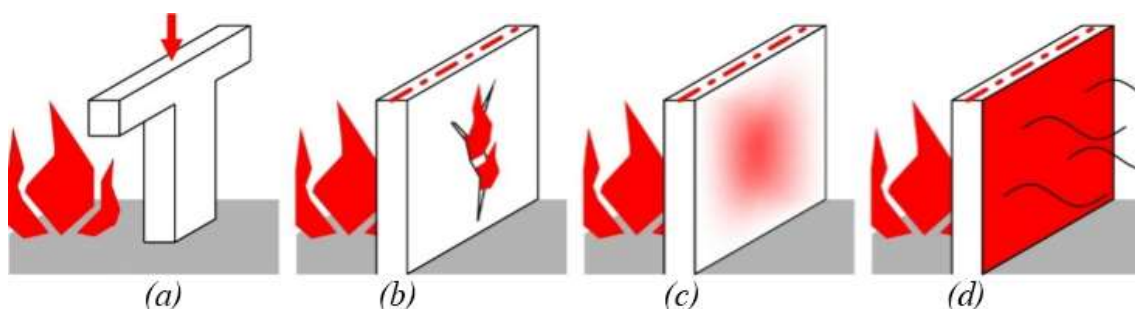
Podle návrhových norem je nutné hodnotit reakci na oheň veškerých stavebních výrobků ve všech situacích jejich konečného použití, kromě výrobků patřících do tříd *A1* a *A2*. Klasifikační systém z hlediska reakce na oheň je založen na kritériích představovaných mezními hodnotami ukazatelů charakteristik pro jednotlivé třídy, přičemž u některých tříd se uvádí doplňková klasifikace (tvorba kouře, plamenně hořící kapky/částice, případně další). Předností tohoto hodnocení je tak především objektivnější a přesnější posuzování stavebních výrobků, mimo jiné i proto, že těsněji souvisí s jejich chováním při reálném požáru. Vztah mezi jednotlivými třídami ukazuje obr. 33 (ČSN EN 13501-2, 2023).



Obr. 33 Vztah mezi třídami reakce na požár (ČSN EN 13501-2, 2023)

kde *B* je třída *B/A2*, *C* je celkové vzplanutí nad 100 kW, *D* je celkové vzplanutí po více než 2 minutách při 100 kW zdroji zapálení, *E* je celkové vzplanutí před 2 minutami při 100 kW zdroji zapálení, *HRR* je míra uvolňování tepla [kW] a *I* je oblast celkového vzplanutí.

Požární odolnost musí splňovat nejen samotné materiály, ale rovněž celé konstrukce. V ČR platí tzv. mezní stavy požární odolnosti, které stanovuje norma ČSN EN 13501-2, (2023). Ta stanovuje hned několik charakteristik, podle kterých se definují požadavky na jednotlivé konstrukce a jejich chování při požáru (viz obr. 34 a tab. 5).



Obr. 34 Mezní stavy požární odolnosti (Hejtmánek et al., 2016)

kde *a* je *R* = únosnost, *b* je *E* = celistvost, *c* je *I* = izolace, *d* je *W* = sálavé teplo a radiace

Tabulka 5 Mezní stavy konstrukcí (ČSN EN 13501-2, 2023)

Označení	Název	Definice
R	Nosnost	Schopnost prvku konstrukce odolávat po určitou dobu působení požáru při mechanickém zatížení bez ztráty konstrukční stability.
E	Celistvost	Schopnost konstrukčního prvku s dělicí funkcí odolávat působení požáru z jedné strany bez přenosu požáru na neohřívanou stranu v důsledku průniku plamenů nebo horkých plynů.
I	Izolace	Schopnost konstrukčního prvku odolávat působení požáru z jedné strany bez přenosu požáru v důsledku významného přestupu tepla z ohřívané strany na neohřívanou.
W	Radiace	Schopnost konstrukčního prvku odolávat vystavení požáru z jedné strany tak, aby se snížila pravděpodobnost přenosu požáru následkem prostupu značného sálavého tepla jak prvkem, tak i z neohřívaného prvku na sousední materiály.
S	Kouřotěsnost	Schopnost prvku snížit nebo vyloučit pronikání plynů nebo kouře z jedné strany prvku na druhou.
C	Samozavírání	Schopnost otevřených dveří nebo okna se úplně zavřít do jejich rámu a aktivovat zavírací zařízení bez lidského zásahu.
M	Mechanická odolnost	Schopnost prvku odolat rázu představujícímu případ kdy konstrukční porušení jiného dílu při požáru způsobí náraz na posuzovaný prvek.

### 3.5.3. Zkušební metody požárních vlastností

Systém zkušebnictví reakce materiálů na oheň prošel v ČR významným vývojem, v rámci kterého proběhla snaha a sjednocení normativních dokumentů v rámci celé EU. Základním dokumentem je norma ČSN EN 13501-2 (2023), která specifikuje reakce třídy na oheň, nicméně, existuje řada normovaných postupů, na jejichž základě se materiály zařazují do jednotlivých tříd. Přehled těchto základních norem je uveden v tabulce 6.



Tabulka 6 Normy pro stanovení reakce výrobků na oheň (Netopilová et al., 2010)

Označení	Název	Stručný popis
ČSN EN ISO 1182 (2023)	Zkoušení reakce výrobků na oheň – Zkouška nehořlavosti	Metoda stanoví výrobky, které nemají podléhat stanovení hořlavosti, bez ohledu na jejich konečné použití. Je vhodná pro třídy A1, A2, A1 <sub>fl</sub> a A2 <sub>fl</sub> . Metoda stanovuje potenciální maximální celkový vývin tepla z výrobků při jejich úplném shoření, bez ohledu na jejich konečné využití. Je vhodná pro třídy A1, A2, A1 <sub>fl</sub> a A2 <sub>fl</sub> .
ČSN EN ISO 1716 (2018)	Zkoušení reakce výrobků na oheň – Stanovení spalného tepla (kalorické hodnoty)	Metoda stanovuje potenciální maximální celkový vývin tepla z výrobků při jejich úplném shoření, bez ohledu na jejich konečné využití. Je vhodná pro třídy A1, A2, A1 <sub>fl</sub> a A2 <sub>fl</sub> .
ČSN EN ISO 11925-2 (2020)	Zkoušení reakce na oheň – Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene – Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene	Metoda stanoví vznětlivost výrobků při vystavení malému plameni. Je vhodná pro stanovení tříd B, C, D, B <sub>fl</sub> , C <sub>fl</sub> , D <sub>fl</sub> a E <sub>fl</sub> .
ČSN EN ISO 9239-1 (2010)	Zkoušení reakce podlahových krytin na oheň – Část 1: Stanovení chování při hoření užitím zdroje sálavého tepla	Metoda stanoví kritický tok záření, kdy už se plamen dále nerozšiřuje. Je vhodná pro stanovení eurotříd A2 <sub>fl</sub> , B <sub>fl</sub> , C <sub>fl</sub> a D <sub>fl</sub> .
ČSN EN 13823 +A1 (2022)	Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stavební výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu.	Metoda stanovuje příspěvek výrobku k rozvoji požáru pro jednotlivě hořící předmět v rohu místnosti. Je vhodná pro stanovení eurotříd A2, B, C, D.

kde index *fl* označuje reakce na oheň pro podlahoviny.

Charakteristiky, které slouží pro posouzení vhodnosti zařazení do jednotlivých skupin, stanovuje norma ČSN EN 13501-1 (2021) a jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7 Charakteristiky reakce stavebních výrobků na oheň (Netopilová et al., 2010)

Značka	Charakteristika
$\Delta T$	Teplotní rozdíl/vzrůst teploty
$\Delta m$	Úbytek hmotnosti
$t_f$	Plamenné období
PCS	Spalné teplo
FIGRA	Index rychlosti rozvoje požáru využívaný pro účely klasifikace
THR <sub>600s</sub>	Celkové uvolňování tepla
LFS	Postranní šíření plamene
SMOGRA	Rychlost vývinu kouře
TSP <sub>600</sub>	Celková tvorba kouře
FS	Šíření plamene

Tyto údaje se používají zejména pro modelování požáru, předpověď chování požáru v reálném měřítku a zkoušky typu vyhověl/nevyhověl (Ali et al., 2019). Pro pochopení a změnu chování dřeva v ohni je však nutné znát proces jeho rozkladu, který je často velmi závislý na různých parametrech, včetně změn složení plynu, teploty, rychlosti zahřívání, tvaru a velikosti vzorku (Lowden a Hull, 2013). Z hlediska velikosti zkoumané vlastnosti a budoucího použití výrobku je vhodné doplňkové testování metodami zjišťování tepelně degradačních vlastností a dle velikosti zkušební vzorku.

Z metod pro zjišťování tepelně degradačních vlastností je nejběžnější metodou používanou ke zkoumání tepelného rozkladu termogravimetrická analýza (TGA). TGA poskytuje kvantitativní informace o rozkladu polymerního materiálu a lze ji použít ke studiu kinetiky rozkladu a tvorby uhlíku. Druhou běžnou metodou je pak diferenční termická analýza (DTA), při které se vzorek a inertní referenční vzorek s přibližně stejnou tepelnou kapacitou podrobí stejnému teplotnímu programu. Výsledkem metody je zjištění, zda je rozklad dané látky endotermní, či exotermní. Diferenciální teplota se pak vykreslí buď v závislosti na čase, nebo na teplotě (Ali et al., 2019).

Další metodou je diferenční termogravimetrie (DTG), která používá stejné měření jako TGA, avšak výstupní výsledky jsou prezentovány jako rozdíl úbytku hmotnosti v čase a udávají rychlost úbytku hmotnosti v závislosti na teplotě. Křivky DTG jsou užitečné pro mechanistické studie, kde dobře ukazují, kdy dochází k různým fázím rozkladu a jaká je posloupnost procesů, což je užitečné pro stanovení počtu probíhajících rozkladných reakcí a teplot, při nichž dochází k vrcholům pyrolýzy. Poslední běžnou používanou metodou je diferenční skenovací kalorimetrie (DSC), která poskytuje řadu termofyzikálních údajů pro širokou škálu materiálů. DSC může poskytnout kvantitativní a kvalitativní údaje o tepelných přechodech materiálů, rychlostí ohřevu, degradačním prostředí a může být použit k odhadu měrné tepelné kapacity, tepelné vodivosti, latentního tepla, a entalpie testovaného vzorku (Pooley et al., 2020).

Druhou skupinou metod zjišťování požárních vlastností jsou málo až středně rozměrové zkoušky, které slouží pro zjišťování materiálových charakteristik a jejich reakcí na oheň. Mezi nejběžnější patří například kónická kalorimetrie pro stanovení požárně-technických charakteristik materiálu. Mezi hlavní sledované veličiny při hoření patří rychlost úbytku hmoty (MLR – mass loss rate), která vypovídá o tom, jak rychle ztrácí materiál hmotu, přičemž nerozlišuje, která část z materiálu odhořívá. U organických látek, a tedy i u dřeva, je pak MLR velmi ovlivňován snižováním obsahu vlhkosti (Morrisset et al., 2022).

Druhou veličinou je pak rychlost uvolňování tepla (HRR – heat release rate), která udává jakou intenzitou přispívá materiál tepelnou energii do procesu hoření (Babrauskas, 2016). Relativně nedávnou novinkou v oblasti kalorimetrie byl vývoj kalorimetru pro hoření v mikroměřítku (MCC) (Xu et al., 2022).

Další zkouškou využívající sálavé teplo zářiče je tzv. LIFT metoda (z angl. Lateral ignition and spread of flame test), která je stanovená v ISO 5658-2 (2006) a využívá sálavý zdroj tepla k měření doby do vzplanutí a bočního šíření požáru po povrchu vertikálně orientovaného materiálu. Zkouška se používá pro ploché vzorky (povrchy stěn nebo nosníků), přičemž se zaznamenává horizontální postup požáru podél vzorku. Výsledky se vyjadřují jako vzdálenost/čas šíření požáru, rychlost čela požáru v závislosti na tepelném toku, kritický tepelný tok při hašení a průměrné teplo pro trvalé hoření (Merryweather a Spearpoint, 2010). Obdobou je pak zkouška reakce podlahovin na tepelný tok ze sálavého panelu. Tato zkouška má oproti ISO 5658-2 (2006) vodorovnou konfiguraci a slouží pro testování podlahových výrobků (ČSN EN ISO 9239-1, 2010).

Další běžnou zkouškou reakce materiálu na požár je Zkouška malým zdrojem plamene, která popisuje zkoušku pro stanovení zapalitelnosti a vznětlivosti výrobku přímým kontaktem plamene za nulového sálání na svisle umístěný vzorek. Určuje se na základě měření šíření plamene po svislém povrchu nebo na hraně vzorku. Při zkoušce se hodnotí, zda došlo k zapálení vzorku a zda špička plamene dosáhla 150 mm nad místem působení plamene a čas, ve kterém k tomu došlo (ČSN EN ISO 11925-2, 2020).

Třetí skupinou jsou metody obsahující středně až velkorozměrové zkoušky, které mají za cíl zjistit chování celé konstrukce nebo jejích prvků vystavených požáru. Nejčastější způsob testování je pomocí vystavení tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu (Single Burning Item – SBI), který je založen na požárním nebezpečí způsobeném hořením jediného předmětu, umístěného v rohu dvou pravoúhlých stěn zkoušeného materiálu. Stěny zkušebního vzorku mají rozměry 1,0 × 1,5 m a zdrojem zapálení jediného hořícího předmětu je hořák, který poskytuje maximální tepelnou expozici přibližně 40 kW/m<sup>2</sup> na ploše 300 cm<sup>2</sup> (ČSN EN 13823, 2022).

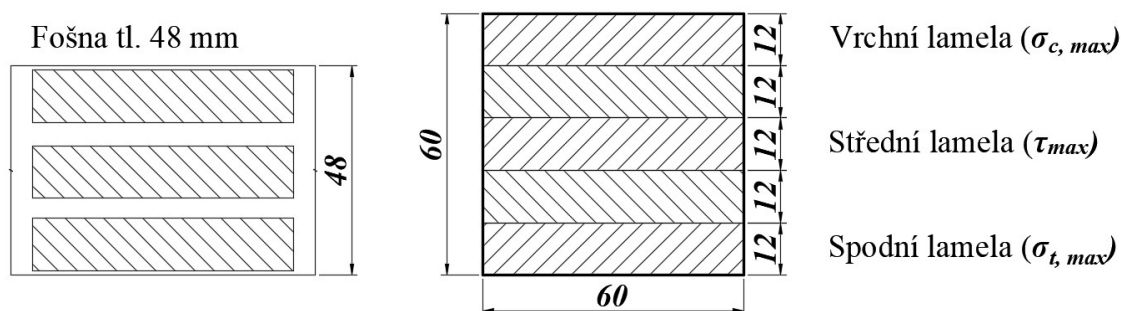
Při zkoušce by mělo být co nejvěrněji znázorněno konečné použití výrobku, např. montáž a upevnění, podklad, přítomnost vzduchové mezery, exponované hrany a spoje. Klasifikační parametry obsažené ve výstupu SBI jsou index rychlosti růstu požáru (FIGRA), boční šíření plamene (LFS) a celkové uvolněné teplo (THR). Další klasifikace je definována pro produkci kouře z hlediska indexu rychlosti vývinu kouře (SMOGRA) a celkové produkce kouře (TSP) (Gravit et al., 2019).

## 4. Metodika

Metodika disertační práce sestává z geometrického modelu, materiálového modelu, popisem výroby zkušebních těles a samotnými testovacími postupy.

První část je návrh geometrického modelu. Lepené lamelové dřevo může nabývat téměř libovolných rozměrů, nicméně, vzhledem k možnostem testování na laboratorních přístrojích na Fakultě lesnické a dřevařské byl zvolen zmenšený model nosníku v měřítku 1:5, přičemž maximální délka testovaného nosníku odpovídá 1200 mm. Na základě normovaného postupu ohybové zkoušky (ČSN EN 408, 2012), kdy délka nosníku odpovídá 20násobku tloušťky byla zvolena výsledná tloušťka 60 mm, stejně jako šířka nosníku.

Další požadavek je počet a velikost lamel. Tloušťka lamel je odvozena od definice lepeného lamelového dřeva normou ČSN EN 14080 (2013), která stanovuje tloušťku lamel 6 – 45 mm. Při využití 6 mm tlustých lamel by odpovídal výsledný počet lamel v nosníku 10 vrstvám, což klade zvýšené nároky na množství použitého lepidla a výsledný lepený hranol by měl neutrální osu ohybu v lepené spáře, kde působí největší smyková napětí. Z těchto důvodů bylo přistoupeno na 12 mm tlusté lamely, které zapříčiní lichý počet vrstev nosníku, tedy umístění neutrální osy a největší smyková napětí do dřeva. Taktéž se sníží množství použitého adhesiva o polovinu a navíc, tři 12 mm lamely je možné vyřezat nad sebou z jedné fošny tl. 48 mm, které dodával lokální dodavatel řeziva, viz obr. 35.



Obr. 35 Výroba, požadavky a vrstvení lamel

Na jednotlivé lamely byly stanoveny následující požadavky. Vrchní lamela musí odolávat největšímu namáhání v tlaku. Střední lamela musí odolávat největšímu smykovému namáhání. Spodní lamela musí odolávat největšímu tahovému namáhání. Všechny lamely musí vykazovat dobrou pevnost v ohybu. Na základě těchto požadavků byly stanoveny kombinace dřevin na základě materiálového modelu a referenční lepený hranol z jednoho druhu dřeviny.

#### 4.1. Materiálový model

Lepené lamelové dřevo se nejčastěji vyrábí z jehličnatých dřevin, zejména smrku a borovice. Nicméně s postupující obměnou složení lesních porostů a změnou klimatu se objevuje potřeba vyrábět lepené nosníky i z listnatých dřevin, resp. jejich kombinací. Na základě toho vznikl požadavek na dvě skupiny listnatých dřevin. První skupinou jsou listnaté dřeviny, jejichž vlastnosti se od smrku příliš neliší, zejména vlastnosti nutné pro navrhování, tedy hustota, modul pružnosti a ohybová pevnost. Druhou skupinou jsou listnaté dřeviny s vyššími hodnotami vlastností, které v kombinovaném lepeném lamelovém dřevě působí jako vyztužovací prvky schopné přenášet největší zatížení. V tabulce 8 jsou uvedeny běžně dostupné listnaté dřeviny, jejichž vlastnosti byly porovnávány se smrskem.

Tabulka 8 Porovnání listnatých dřevin s nízkou hustotou se smrskem (Novák, 2024)

	SM		TP		OS		OL	
	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	%
Hustota	440	100	340	-22,7	460	+4,5	550	+25
	MPa		MPa		MPa		MPa	
Pevnost v tahu ve směru vláken	84	100	84	0	100	+19	92,0	+9,5
Pevnost v tlaku ve směru vláken	30	100	35	+16,7	47	+56,7	54,0	+80
Pevnost v ohybu	60	100	64	+6,7	77	+28,3	83,0	+38,3
Modul pružnosti	9100	100	10700	+17,6	10700	+17,6	11500	+26,4
Pevnost ve smyku	5,3	100	7,6	+43,4	7,7	+45,3	4,4	-17

Z porovnání vyplývá že topol má nižší hustotu než smrk, což se odráží i v ostatních mechanických vlastnostech. Dle tabulky výše se sice mechanickými vlastnosti vyrovná smrku, ale není trvanlivý, což je třeba zohlednit při návrhu životnosti dřevěné konstrukce. Osika má lepší vlastnosti než smrk, velice podobnou hustotu a lepší trvanlivost než topol, ovšem v současné době není průmyslově využívána, tudíž je velký problém získat dostatek materiálu nejen na mechanické zkoušky, ale dlouhodobě i pro konstrukční účely. Olše pak vykazuje z výše uvedených dřevin nejlepší vlastnosti, především pak pevnost v tahu ve směru vláken, pevnost v ohybu a má rovněž vysoký modul pružnosti. Pevnost ve smyku má však z výše uvedených dřevin nejnižší, proto by se neměla používat na střední lamely v lepeném nosníku. Olše je poměrně dobře dostupnou rychle rostoucí dřevinou, která má zajímavou barvu a dobrou odolnost proti vodě. Z této skupiny dřevin proto byla vybrána právě olše.

Druhou skupinou jsou listnaté dřeviny s hustotou vyšší než 25 % smrku a jsou uvedeny v tabulce 9, kde v horní části jsou uvedeny roztroušeně pórovité dřeviny a ve spodní pak kruhovitě pórovité dřeviny.

Tabulka 9 Porovnání listnatých dřevin s vyšší hustotou se smrkem (Novák, 2024)

	SM		JV		BK		BR		HB	
	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	%
Hustota	440	100	630	+43,2	720	+63,6	730,0	+65,9	820	+86,4
	MPa		MPa		MPa		MPa		MPa	
Pevnost v tahu ve směru vláken	84	100	100	+19	130	+54,8	134	+59,5	153	+82,1
Pevnost v tlaku ve směru vláken	30	100	45	+50	46	+53,3	50	+66,7	54	+80
pevnost v ohybu	60	100	97	+61,7	104	+73,3	134	+123	140	+133
modul pružnosti	9100	100	10300	+13,2	13100	+44,0	16100	76,9	14700	+61,5
Pevnost ve smyku	5,3	100	9,8	+84,9	12,3	+132	11,8	+123	16,9	+219
	SM		AK		JL		JS		DB	
	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	%
Hustota	440	100	760	+72,7	670	+52,3	700	+59,1	700	+59,1
	MPa		MPa		MPa		MPa		MPa	
Pevnost v tahu ve směru vláken	84	100	133	+58,3	84	0	142	+69,0	108	+28,6
Pevnost v tlaku ve směru vláken	30	100	70	+133	55	+83,3	51	+70	42	+40
pevnost v ohybu	60	100	102	+70	87	+45	118	+96,7	116	+93,3
modul pružnosti	9100	100	11000	+20,9	10800	+18,7	13100	+44	11600	+27,5
Pevnost ve smyku	5,3	100	12,5	+136	6,9	+30,2	12,5	+136	12,7	+140

Z porovnání vychází, že habr je z roztroušeně pórovitých dřevin jedna z nejlepších alternativ a své uplatnění by mohl nalézt ve spodní, nebo střední lamel nosníku, vzhledem ke svým výborným pevnostem v tahu, ohybu a smyku. Nicméně zastoupení habru v druhové skladbě není příliš velké. Buk a bříza jsou hustotou podobné. Buk je v současnosti průmyslově zpracováván, a tudíž technologie jeho zpracování je zažitá. Rovněž má poměrně homogenní strukturu a používá se jako referenční dřevina pro mechanické zkoušky dřeva. Bříza je sice taktéž průmyslově zpracováváná, ale spíše pro dýhárenské účely. Její nevýhodou je nízká odolnost proti vlhku, avšak se správnou ochranou by mohla být dobrým kandidátem na použití v lepeném lamelovém dřevě. Obě dřeviny dalece předčí svými mechanickými vlastnostmi smrk. Bříza navíc vyniká velmi vysokým modulem pružnosti, což ji činí nadmíru vhodnou dřevinou pro dřevěné konstrukce. Výhoda použití buku je nejen v dobrých mechanických vlastnostech, ale rovněž v dobré dostupnosti po celé ČR. Obě dřeviny jsou navíc zpracovávány i v zahraničí. Jižní země mají více buku, severní pak více břízy.

Z roztroušeně pórovitých dřevin nepřichází v úvahu jilm, byť má stejnou pevnost v tahu jako smrk a ostatní vlastnosti lepší, avšak jilmové porosty dlouhodobě trpí na grafiózu, což se odráží v minimálním zastoupení v druhové skladbě dřevin. Akát vychází v porovnání s ostatními dřevinami velice dobře. Pevností v tahu a v ohybu se vyrovná i buku, v tlaku jej předčí. Proto by byl skvělou dřevinou, co se týče mechanických vlastností i odolnosti, avšak vlivem obsahu toxických látek a snahou o eliminaci introdukovaných dřevin v ČR se řadí na druhou kolej. Jasan a dub však vychází v porovnání velmi dobře. Hustotně velmi podobné, v mechanických vlastnostech jasan předčí dub, hlavně pro svůj vysoký modul pružnosti a pevnost v tahu. Tyto dvě dřeviny se již průmyslově zpracovávají, dub i na lepené vazníky. Zde může být problematické lepení dřeva vlivem tříslovin a dalších látek obsažených ve dřevě a také pro velké póry, do nichž může zatéct lepidlo a vytvořit tak chudý lepený spoj. Současným problémem jasanu je náchylnost na dřevokazné škůdce (nekróza, padlí). Dub je pak velmi odolnou dřevinou, co se týče působení vlhkosti a vody. Obě dřeviny proto stojí za zvážení pro použití v dalších experimentech.

Z výše zmíněných důvodů byl vybrán buk pro optimální poměr vlastností, známou míru lepitelnosti, dobrou dostupnost a pořivací cenu. Přehled vybraných dřevin a jejich vlastností pak udává tabulka 10.

Tabulka 10 Vybrané dřeviny v materiálovém modelu (Novák, 2024)

	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tahu ve směru vláken [MPa]	Pevnost v tlaku ve směru vláken [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Modul pružnosti [MPa]	Pevnost ve smyku [MPa]
SM	440	84	30	60	9100	5,3
BK	720	130	46	104	13100	12,3
OL	550	92	54	83	11500	4,4

#### 4.2. Kombinační klíč

Na základě geometrického a materiálového modelu byl stanoven kombinační klíč pro vytvoření kombinací dřevin v lepeném nosníku. Skladba nosníku však nemůže být ledajaká, ale je svázaná normativními požadavky normy ČSN EN 14080 (2013), která charakterizuje kombinované dřevo na základě pevnostních tříd. Pro stanovení pevnostních tříd je třeba znát hustotu, modul pružnosti a tahovou pevnost každé lamely, z kterých jsou zjištěny charakteristické hodnoty těchto vlastností. Tabulka 11 ukazuje zjištěné charakteristické hodnoty vybraných dřevin a jejich zatřídění do pevnostních tříd.

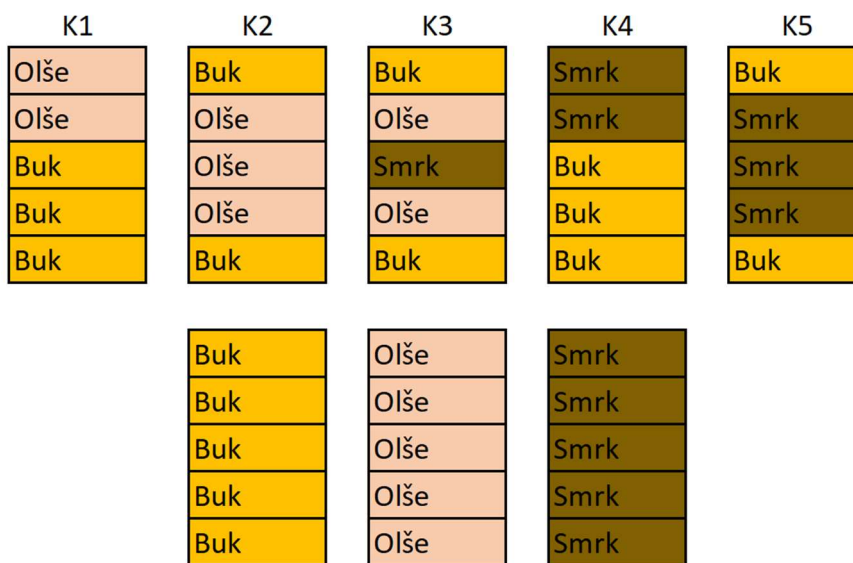
Tabulka 11 Charakteristické hodnoty vlastností

	$E_{mean}$	$E_0$	$\rho_0$	$\rho_{lk}$	$\sigma_t$	$f_{t0lk}$	T-třída
SM	10920	9100	440	340	84	13	T13
OL	13800	11500	720	400	92	24	T24
BK	15720	13100	550	430	130	30	T30

kde  $E_{mean}$  je průměrná hodnota modulu pružnosti [MPa],  $E_0$  je charakteristická hodnota modulu pružnosti [MPa] zjištěná podle ČSN EN 14080 (2013) jako  $E_0/E_{mean} = 5/6$ ,  $\rho_0$  je průměrná hodnota hustoty [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $\rho_{lk}$  je charakteristická hustota [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $\sigma_t$  je tahová pevnost podél vláken [MPa] a  $f_{t0lk}$  je požadovaná charakteristická hodnota pevnosti v tahu podél vláken [MPa].

Na základě zatřídění do pevnostních tříd dle ČSN EN 338 (2016) lze odvodit skladbu nosníku a s tím spojenou kombinaci dřevin. Norma ČSN EN 14080 (2013) specifikuje použití vyšších pevnostních tříd ve vnějších lamelách, což předurčuje umístění buku do vnějších lamel. Norma však dále stanovuje požadavky na poměr jednotlivých zón lamel, viz obr. 13.

Na základě všech výše zmíněných požadavků byl stanoven kombinační klíč pro všechny kombinace. Ty sestávají z homogenních kombinací z jedné dřeviny a jedné pevnostní třídy (SM, BK, OL), dále symetrické nehomogenní s vyšší pevnostní třídou ve vnějších lamelách a nižší ve středových (K2, K3, K5) a asymetrické nehomogenní nosníky s nižší pevnostní třídou v horních lamelách a vyšší pevnostní třídou ve spodních lamelách (K1 a K4). Kombinace K3 má navíc posílenou střední lamelu pro zlepšení odolnosti proti smykovým namáháním, viz obr. 36.



Obr. 36 Kombinační klíč pro lepení kombinací dřevin



### 4.3. Výroba zkušebních těles

Na výrobu zkušebních těles bylo použito dřevo smrku (*Picea abies* (L.) H. Karst.), olše (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) a buku (*Fagus silvatica* L.) od místního prodejce. Z těchto dřev byly vyrobeny bezvadé lamely o tloušťce 12 mm, délce 1300 mm a šířce 75 mm. Orientace vláken v jednotlivých lamelách byla volena tak, aby z žádné lamely nevybočovala vlákna mimo čelo lamely. Tohle opatření má za následek snížení počtu lamel, jejichž porušení nastane vlivem odklonu vláken, a nikoliv průběhem napětí. U každé lamely byly změřeny rozměry a hmotnost, z nichž se posléze vypočítala hustota.

Zařazení jednotlivých lamel do skupin podle jednotlivých nosníků proběhlo pomocí vypočítané hustoty. Tento fakt eliminoval velké rozdíly hustot v použitých lamelách jednotlivých dřevin (mimo chtěné u kombinací). Kombinace dřevin byly určeny na základě jejich mechanicko-fyzikálních vlastností a kombinačního klíče.

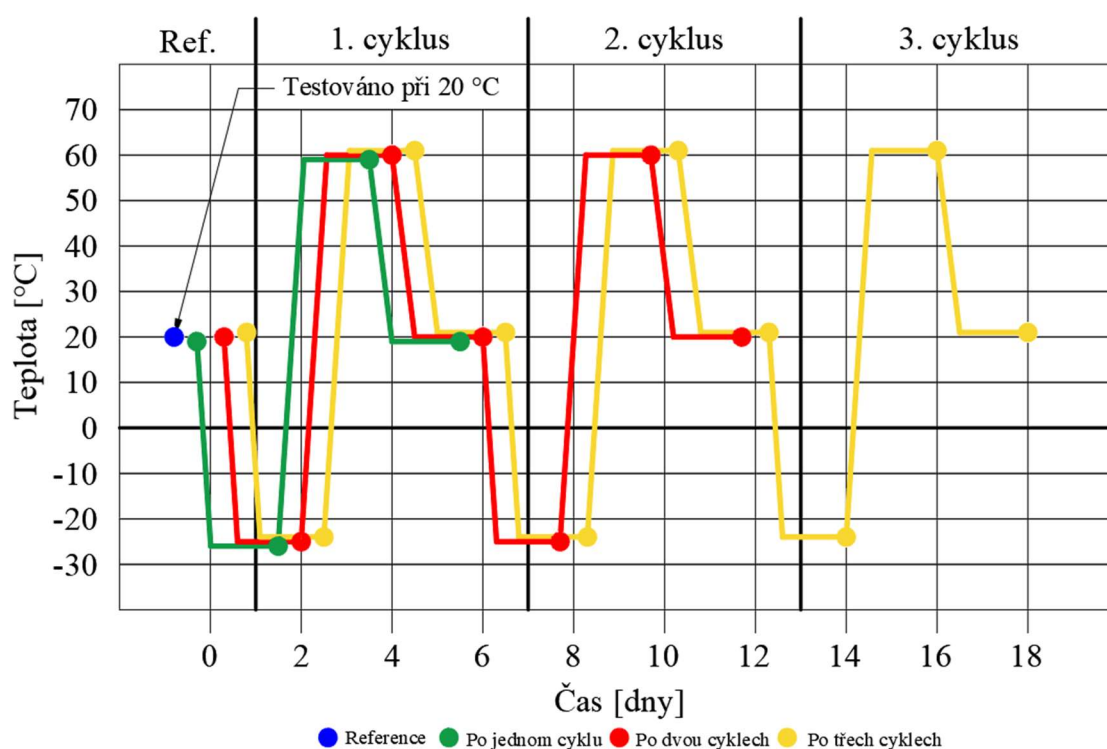
Lamely byly následně slepeny jednosložkovým polyuretanovým lepidlem KESTOPUR 1010 od finského výrobce KIILTO (viz příloha 1) a resorcinol-fenol-formaldehydového lepidla *PRF system 1711/2520* od firmy Akzo Nobel (viz příloha 2). Nános lepidla činil  $250 \text{ g/m}^2$ , lisovací tlak 1 MPa, lisovací čas 1 hodina pro vzorky lepené PUR lepidlem a 8 hodin pro vzorky RPF lepidlem, které po vyjmutí z lisu 1 den vyžrávaly při běžné teplotě. Slepené nosníky byly následně opracovány na konvenčních truhlářských strojích, přičemž horní a spodní strana lepeného nosníku nebyla opracována, jelikož bylo dosaženo finální výšky nosníku lepením. Finální rozměr nosníku pro testování byl  $1200 \times 60 \times 60 \text{ mm}$  (L  $\times$  B  $\times$  H). Takto připravené nosníky byly následně klimatizovány v klimatizační komoře Weiss ClimeEvent 2/2000/40/3 (Weiss Umwelttechnik GmbH, Reiskirchen, Germany) při  $65 \pm 5\%$  relativní vlhkosti vzduchu (RH) a  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , aby dosáhly relativního obsahu vlhkosti 12 % (viz obr. 37). Celkem bylo vyrobeno 320 nosníků (8 kombinací dřevin  $\times$  2 lepidla  $\times$  20 kusů/kombinace).



Obr. 37 Část vyrobených nosníků a jejich klimatizace

#### 4.4. Teplotní cyklování

Po naklimatizování všech nosníků se všechny nosníky změřily a zvažily pro ověření jejich obsahu vlhkosti 12 %. Referenční část nosníků (80 ks) se otestovala ihned po naklimatizování. Zbýlých 240 vzorků se ponechalo v klimatizační komoře Weiss ClimeEvent 2/2000/40/3 a započal cyklus změny teploty. První fází cyklu byla změna teploty na  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nosníky byly vystaveny této teplotě po dobu 48 hodin. Posléze byly nosníky změřeny a zvaženy pro určení hustoty a z ní obsahu vlhkosti. Nosníky byly navráceny do klimatizační komory a započala druhá fáze cyklu. Při té se změnila teplota v komoře na  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 65 % RH. Nosníky byly této teplotě vystaveny 48 hodin a následně opět změřena hmotnost a rozměry. Po změření se nosníky opět vrátily do klimatizační komory a začala třetí fáze cyklu. Ta sestávala z klimatizování nosníků na  $65 \pm 5\text{ } \% \text{ RH}$  a  $20 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu 48 hodin. Po této době byla odebrána další čtvrtina nosníků a cyklus se opakoval (viz obr. 38). Při tomto postupu vznikly nosníky, vystavené 4 úrovním cyklování teplot (žádný cyklus – reference, 1 cyklus ( $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  65 % RH), 2 cykly, 3 cykly).



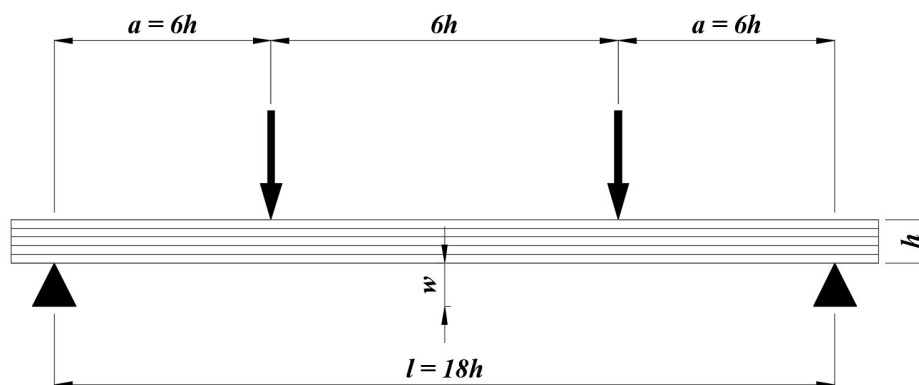
Obr. 38 Cyklické teplotní zatížení nosníků

#### 4.5. Zkušební metody fyzikálních a mechanických vlastností

Pro komplexní zjištění vlastností byla měřena vlhkost dřeva dle ISO 13061-1 (2014). Z rozměrů a vlhkosti lamel byla dle ISO 13061-1 (2014) vypočítána hustota jednotlivých lamel. Po slepení byla zjišťována hustota a vlhkost v lepeném lamelovém dřevě po každé změně teploty cyklu.

#### Modul pružnosti (MOE)

Testování modulu pružnosti při čtyřbodovém zatížení v ohybu (MOE) bylo prováděno dle normy ČSN EN 408 (2012), viz obr. 39 a modul pružnosti byl vypočten pomocí rovnice 26.



Obr. 39 Uspořádání zkoušky pro měření modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu čtyřbodovým ohybem (ČSN EN 408, 2012)

$$E_{m,g} = \frac{3 a l^2 - 4 a^3}{2 b h^3 \left( 2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} \right) - \frac{6 a}{5 G b h}} \quad (26)$$

kde  $E_{m,g}$  je globální modul pružnosti v ohybu [ $\text{N/mm}^2$ ],  $a$  je vzdálenost mezi zatěžovaným místem a nejbližší podporou [mm],  $l$  je délka zkušebního tělesa mezi podpěrami [mm],  $b$  je šířka průřezu tělesa [mm],  $h$  je výška [mm],  $F_2 - F_1$  je přírůstek síly [N] na regresní přímce s korelačním koeficientem 0,99 nebo lepším,  $w_2 - w_1$  je přírůstek průhybu odpovídající  $F_2 - F_1$  v [mm] a  $G$  je modul pružnosti ve smyku [MPa].

Pro výpočet byl zvolen globální modul pružnosti zejména pro větší přesnost měření a snadnější aplikaci extenzometru, který dosedl na spodní stranu testovaných těles. Oproti lokálnímu modulu pružnosti však obsahuje i smykový modul pružnosti (Nocetti et al., 2014). Výhodou tohoto použití je však v případě nesouměrných kombinací fakt, že se jejich neutrální osa nevyskytuje uprostřed výšky zkušebních těles.

## Ohybová pevnost (MOR)

Ohybová pevnost lepených nosníků byla zjišťována stejně jako modul pružnosti v ohybu dle normy ČSN EN 408 (2012). Pro testování byla použita stejná sestava jako pro měření modulu pružnosti v ohybu (obr. 39). Pevnost v ohybu byla vypočtena pomocí rovnice 27.

$$f_m = \frac{3 F a}{b h^2} \quad (27)$$

kde  $f_m$  je pevnost v ohybu [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ],  $F$  je zatížení [ $\text{N}$ ],  $a$  je vzdálenost mezi působištem zatížení a nejbližší podporou při ohybové zkoušce [ $\text{mm}$ ],  $b$  je šířka průřezu tělesa [ $\text{mm}$ ] a  $h$  je výška nosníku [ $\text{mm}$ ].

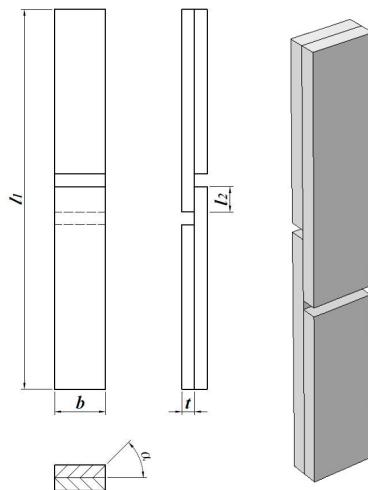
Testování mechanických vlastností probíhalo pomocí univerzálního testovacího stroje TIRAtest 2850 S (TIRA GmbH, Schalkau, Germany), viz obr. 40.



Obr. 40 Průběh ohybové zkoušky

## Podélná pevnost ve smyku při tahovém namáhání

Smyková pevnost kombinací byla zjišťována na základě normy ČSN EN 302-1 (2013), která stanovuje rozměry zkušebního tělesa na  $150 \times 20 \times 10$  mm, viz obr. 41.



Obr. 41 Zkušební tělesa pro zkoušku smykové pevnosti (ČSN EN 302-1, 2013)

kde  $l_1$  je délka zkušebního tělesa ( $150 \pm 2$  mm),  $l_2$  je délka přelepu ( $10 \pm 0,2$  mm),  $t$  je tloušťka lamely ( $5 \pm 0,1$  mm),  $b$  je šířka zkušebního tělesa ( $20 \pm 0,2$  mm),  $\alpha$  je úhel mezi lepenou spárou a letokruhy ( $30\text{--}85^\circ$ ).

Kombinace dřevin byla upravena tak, aby odpovídala lepeným spárám vyskytujících se v lepených nosnících, ale zároveň pro použití jen dvou lamel podle obr. 41. Z toho důvodu byly vytvořeny následující kombinace:

- |      |             |                                 |
|------|-------------|---------------------------------|
| • BB | Buk – Buk   | } Homogenní smykové kombinace   |
| • OO | Olše – Olše |                                 |
| • SS | Smrk – Smrk |                                 |
| • BS | Buk – Smrk  | } Nehomogenní smykové kombinace |
| • BO | Buk – Olše  |                                 |
| • SO | Smrk – Olše |                                 |

Zkušební tělesa pro zkoušku smykové pevnosti byla klimatizována v klimatizační komoře Weiss ClimeEvent při  $65 \pm 5\%$  relativní vlhkosti vzduchu (RH) a  $20 \pm 2$  °C, aby dosáhly relativního obsahu vlhkosti 12 % (Reference). Posléze byly vystaveny stejným teplotním cyklům jako nosníky, viz. kapitola 4.4. s tím rozdílem, že navíc byla tělesa vystavena samostatným teplotním stupňům, odpovídajících extrémům teplotních cyklů, tedy  $+60$  °C, 65 % RH a  $-25$  °C.

Testování smykové pevnosti probíhalo pomocí univerzálního testovacího stroje TIRAtest 2850 S (TIRA GmbH, Schalkau, Germany). Zaznamenána byla nejvyšší vyvinutá síla  $F_{max}$  [N]. Konstantní rychlost posuvu byla nastavena na 50 mm/min. Výsledkem charakterizujícím pevnost lepeného spoje je hodnota pevnosti ve smyku  $\tau$ , která se vypočítá podle rovnice 27:

$$\tau = \frac{F_{max}}{l_2 \cdot b} \quad (27)$$

kde  $\tau$  je pevnost ve smyku [N/mm<sup>2</sup>],  $F_{max}$  je největší vyvíjená síla [N],  $l_2$  je délka spojeného zkušební povrchu [mm],  $b$  je šířka spojeného zkušební povrchu [mm].

### **Statistické vyhodnocení mechanických a fyzikálních vlastností**

Vypočtené hodnoty hustoty, modulu pružnosti a ohybové pevnosti byly zhodnoceny pomocí softwaru Statistica 14 (TIBCO Software Inc., Alto, USA).

Pro ověření normality datového souboru hustot lamel byl nejprve použit Shapiro-Wilkův test, který při potvrzení normality dat umožňuje použití parametrických testů. Z parametrických testů byla provedena analýza rozptylů (ANOVA), která analyzuje rozptyl datových souborů jednotlivých proměnných, případně jejich kombinací. Pro podrobnější zjištění statistické významnosti rozdílů mezi jednotlivými kombinacemi skupin proměnných byl proveden i Tukeyův post-hoc test, který zpravidla z důvodu velikosti výsledné tabulky uveden v přílohách.

Provedena byla i regresní a korelační analýza, kde na základě koeficientu determinace a Pearsonova korelačního koeficientu byla zjišťována míra kvality regresního modelu a síla lineární závislosti mezi dvěma veličinami. Na základě rozdělení síly lineární závislosti podle Evanse (1996) lze rozdělit sílu korelace následovně:

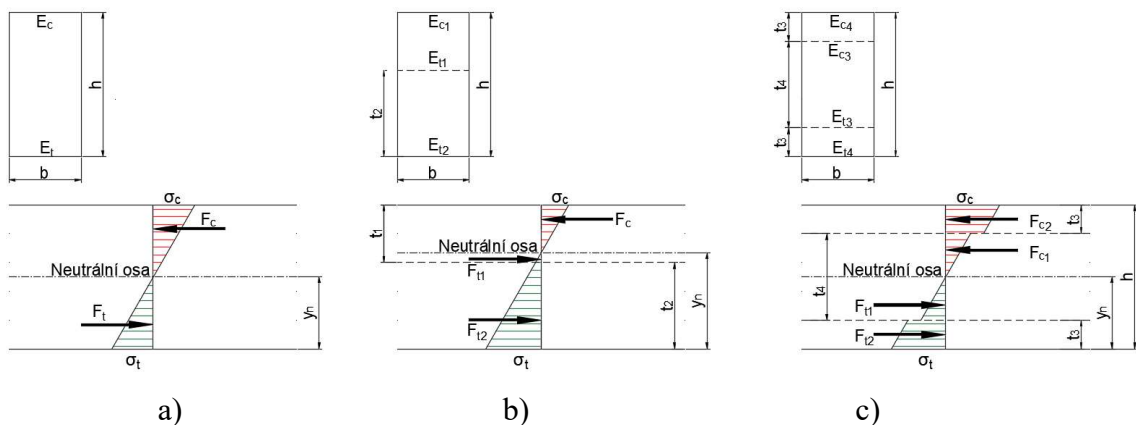
- 0,00 - 0,19 „velmi slabá“
- 0,20 - 0,39 „slabá“
- 0,40 - 0,59 „střední“
- 0,60 - 0,79 „silná“
- 0,80 - 1,00 „velmi silná“.

#### 4.6. Modelování vlastností nosníků

Před samotnou výrobou vzorků a jejich testování je vhodné vytvořit model chování testovaného prvku. V praxi se tím šetří značné množství materiálu na prototypování. V této práci byly vytvořeny dva modely, analytický model založený na výpočtu modulu pružnosti a umístění neutrální osy nosníku a numerický model, založený na vymodelování kombinovaných nosníků v modelovacím programu.

##### Analytický model

Teoretický model, na základě kterého byl vypočten odhadovaný modul pružnosti lepených nosníků vychází z předpokladu výsledného modulu pružnosti na základě znalosti modulu pružnosti v tahu a tlaku jednotlivých lamel (Timbolmas et al., 2022). Úpravou těchto vzorců je možné vypočítat predikovanou hodnotu jak pro homogenní nosníky, tak i pro kombinované symetrické nebo kombinované nesymetrické (viz obr. 42).



Obr. 42 Průběh sil nosníku a) homogenního symetrického nosníku, b) nehomogenního nesymetrického nosníku, c) nehomogenního symetrického nosníku

(upraveno dle Timbolmase et al., 2022)

kde  $y_n$  je poloha neutrální osy měřená od spodní části nosníku [mm],  $t_1$  je tloušťka horních lamel [mm],  $t_2$  je výška spodních lamel měřená od spodní části nosníku [mm],  $E_{c1}$  je modul pružnosti v tlaku horních lamel [MPa],  $E_{c2}$  je modul pružnosti v tlaku spodních lamel [MPa],  $E_{t1}$  je modul pružnosti v tahu horních lamel [MPa],  $E_{t2}$  je modul pružnosti v tahu spodních vrstev [MPa],  $h$  je výška nosníku [mm],  $t_2$  je tloušťka spodních lamel [mm],  $t$  je tloušťka lamely,  $n$  je počet lamel v nosníku,  $n_1$  je počet spodních lamel,  $E_{c3}$  je modul pružnosti v tlaku vnitřních lamel [MPa],  $E_{c4}$  je modul pružnosti v tlaku vnějších lamel [MPa],  $E_{t3}$  je modul pružnosti v tahu vnitřních lamel [MPa],  $E_{t4}$  je modul pružnosti v tahu vnějších lamel [MPa],  $h$  je výška nosníku [mm],  $t_2$  je tloušťka spodních lamel měřená od spodní strany nosníku [mm],  $t_3$  je tloušťka vnějších lamel měřená od spodní strany nosníku [mm],  $t_4$  je tloušťka vnitřních lamel [mm].

Pro výpočet byly použity vstupní hodnoty z tabulky 12.

Tabulka 12 Moduly pružnosti vybraných dřevin

Modul pružnosti	Buk	Olše	Smrk
V tlaku [MPa]	14 500	10 000	13 500
V tahu [MPa]	16 000	12 000	14 500

Z hodnot modulů pružnosti v tahu a tlaku je možné vyvodit funkci pro výpočet umístění neutrální osy. Z této hodnoty je pak možné vypočítat odhadovaný modul pružnosti pro celý nosník. Pro homogenní nosník (tj. z jednoho druhu dřeva) platí rovnice 28 a 29:

$$y_n = \frac{\sqrt{E_c} \cdot h}{\sqrt{E_c} + \sqrt{E_t}} \quad (28)$$

$$MOE_{global} = \left( \frac{4 \cdot E_c \cdot E_t}{(\sqrt{E_c} + \sqrt{E_t})^2} \right) \quad (29)$$

kde  $y_n$  je poloha neutrální osy měřená od spodní části nosníku [mm],  $MOE_{global}$  je globální modul pružnosti celého nosníku [MPa],  $E_c$  je modul pružnosti v tlaku [MPa],  $E_t$  je modul pružnosti v tahu [MPa],  $h$  je tloušťka nosníku [mm].

Pro nehomogenní nosník nesymetrický platí rovnice 30 a 31:

$$y_n = \frac{\left( t_1 \cdot \left( \frac{E_{c1}}{E_{t1}} \right) \right) + \left( n_1 \cdot t_2 \cdot \left( \frac{E_{c2}}{E_{t2}} \right) \right) \cdot ((n-1) \cdot t)}{t_1 \cdot \left( \frac{E_{c1}}{E_{t1}} \right) + n_1 \cdot t_2 \cdot \left( \frac{E_{c2}}{E_{t2}} \right)} \quad (30)$$

$$MOE_{global} = \frac{2 \cdot (E_{t1} \cdot (3t_2 - y_n) \cdot y_n^2 + E_{c1} \cdot (h - y_n)^2 \cdot (2h - 3t_2 + y_n))}{h^3} \quad (31)$$

kde  $y_n$  je poloha neutrální osy měřená od spodní části nosníku [mm],  $t_1$  je tloušťka horních lamel [mm],  $t_2$  je výška spodních lamel měřená od spodní části nosníku [mm],  $E_{c1}$  je modul pružnosti v tlaku horních lamel [MPa],  $E_{c2}$  je modul pružnosti v tlaku spodních lamel [MPa],  $E_{t1}$  je modul pružnosti v tahu horních lamel [MPa],  $E_{t2}$  je modul pružnosti v tahu spodních vrstev [MPa],  $h$  je tloušťka nosníku [mm],  $t_2$  je tloušťka spodních lamel [mm],  $t$  je tloušťka lamely,  $n$  je počet lamel v nosníku,  $n_1$  je počet spodních lamel.



Pro nehomogenní nosník symetrický platí rovnice 32–34:

$$y_n = \frac{E_{c3} \cdot t_4 - \sqrt{E_{c3} \cdot E_{t3} \cdot t_4^2 - 2 \cdot E_{c4} \cdot (E_{c3} - E_{t3}) \cdot (h - 2t_2) \cdot t_2}}{E_{c3} - E_{t3}} \quad (32)$$

$$MOE_{global} = \frac{-2 \cdot ((B) + 6E_{t4} \cdot t_2 \cdot (h - 2y_n) \cdot (t_2 + y_n))}{h^3} \quad (33)$$

Kde proměnná  $B$  představuje:

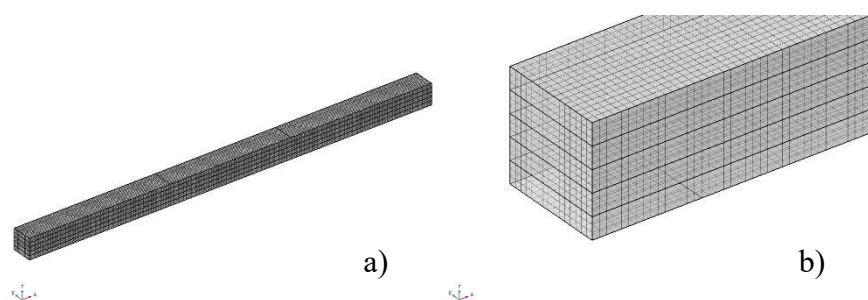
$$B = E_{c3} \cdot (h - y_n)^2 \cdot (h - 3t_2 - y_n) + E_{t3} \cdot y_n^2 \cdot (-3h + 3t_2 + y_n) \quad (34)$$

kde  $y_n$  je poloha neutrální osy měřená od spodní části nosníku [mm],  $E_{c3}$  je modul pružnosti v tlaku vnitřních lamel [MPa],  $E_{c4}$  je modul pružnosti v tlaku vnějších lamel [MPa],  $E_{t3}$  je modul pružnosti v tahu vnitřních lamel [MPa],  $E_{t4}$  je modul pružnosti v tahu vnějších lamel [MPa],  $h$  je výška nosníku [mm],  $t_2$  je tloušťka spodních lamel měřená od spodní strany nosníku [mm],  $t_3$  je tloušťka vnějších lamel měřená od spodní strany nosníku [mm],  $t_4$  je tloušťka vnitřních lamel [mm].

### Numerický model

Numerický model byl vytvořen v programu Comsol Multiphysics 6.0. Tento program umožňuje vymodelovat a popsat chování hypotetického nosníku a vliv charakteristik jednotlivých vrstev. Pro tento model byl zvolen lepený nosník tvořený 5 vrstvami lamel. Model byl rozdělen na tři podsekce, a to lepený nosník homogenní, kdy jednotlivé lamely byly vždy ze stejné dřeviny, dále na podsekcí nehomogenní, ale symetrickou, kdy vždy dvě vnější lamely byly tvořeny bukovými lamelami a středové smrkem, nebo olší (K2, K3 a K5). Poslední skupinu tvoří nehomogenní nesouměrné nosníky, kdy spodní tři spodní lamely tvoří buk a horní dvě smrk, nebo olše (K1 a K4).

Pro ohybovou zkoušku byl vytvořen 3D model (obr. 43). Pro tento model byla délka jednotlivých lamel vždy 1200 mm, šířka 60 mm a výška vždy 12 mm. Tyto jednotlivé lamely byly spojeny pomocí funkce „*form assembly*“ s modelovaným „*contact pair*“. Pro uchycení modelového nosníku bylo použito funkce „*prescribed displacement*“, kdy pro levou podpěru (rotační vazbu) bylo použito  $u = 0$ ,  $v = 0$  a  $z = 0$ . Pro pravou pak  $z = 0$ . Pro síť byla použita „*linear brick node*“.



Obr. 43 Modelová síť, a) celého vzorku, b) detail kubické 3D sítě

Modelu byl zadán specifický materiál, u kterého byly nastaveny elasticko-plastické charakteristiky bez přechodu do plastické oblasti deformací a bez výpočtu selhání jednotlivých vrstev modelu. Taktéž, model nepočítá s žádnými vadami dřeva. Pro modelování elastické oblasti bylo zvoleno několik základních materiálových charakteristik, zejména 3 moduly pružnosti ( $E_1$ ,  $E_2$  a  $E_3$ ), tři Poissonova čísla ( $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ,  $\nu_3$ ) a tři smykové moduly ( $G_1$ ,  $G_2$  a  $G_3$ ). Indexy 1, 2 a 3 ideálně odpovídají anatomickým směrům ( $L$ ,  $R$ ,  $T$ ) a v souřadném systému modelu ideálně odpovídají osám  $x$ ,  $y$  a  $z$ . Avšak reálná tělesa, kterými se validuje model nemají nikdy dokonalou orientaci vláken. Pro co nejpřesnější vymodelování vlastností jednotlivých lamel bylo proto třeba znát i úhel, který letokruhy svírají s globálním souřadným systémem. Pokud nastane případ, že  $x \neq L$ ,  $y \neq R$  a  $z \neq T$ , pak je třeba najít odpovídající složky napětí, deformací a deformační konstanty. Ty lze zjistit na základě znalostí složek pevností v anatomických směrech a jejich přepočtením pomocí směrových kosinů (viz rovnice 35). Stejným způsobem lze přepočítat i deformace (Požgaj et al., 1997).

$$\begin{bmatrix} \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\alpha & \sin^2\alpha & 2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \\ \sin^2\alpha & \cos^2\alpha & -2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \\ -\sin\alpha \cdot \cos\alpha & \sin\alpha \cdot \cos\alpha & \cos^2\alpha - \sin^2\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Zatížení nosníku bylo pomocí dvojice sil zastoupené funkcí „edge load“ symbolizující horní podpěry testovacího zařízení. Vzdálenosti působení těchto sil uspořádání pro statickou ohybovou zkoušku, viz obr. 39. Pro zjištění zatěžovací síly byla zjištěna z literatury ohybová pevnost pro dřevinu s nejnižší ohybovou pevností, což je v tomto případě olše. Zjištěné průměrné hodnoty ohybové pevnosti se pohybují v rozmezí 44 - 110 MPa (Salca, 2019). Z těchto hodnot byl stanoven průměr, ze kterého byl vypočten 5 % kvantil dle ČSN EN 14080 (2013).

Výsledkem je že 5 % kvantil modelové ohybové pevnosti olše byl odhadnut na 64 MPa. Z této hodnoty byla úpravou vzorce (viz rovnice 36) pro ohybovou pevnost z normy ČSN EN 408 (2012) zjištěna maximální zatěžovací síla.

$$f_m = \frac{3 \cdot F \cdot a}{b \cdot h^2} \rightarrow F = \frac{f_m \cdot b \cdot h^2}{3 \cdot a} \quad (36)$$

kde  $f_m$  je pevnost v ohybu [N/mm<sup>2</sup>],  $F$  je zatížení [N],  $a$  je vzdálenost mezi působištěm zatížení a nejbližší podporou při ohybové zkoušce [mm],  $b$  je šířka průřezu tělesa [mm] a  $h$  je výška nosníku [mm].

Dosazením proměnných do výše zmíněné rovnice bylo dosaženo hodnoty maximální zatěžovací síly 12800 N. Při této hodnotě dochází k překročení ohybové pevnosti, avšak pro potřeby tohoto modelu je třeba se nadále pohybovat pouze v lineární oblasti, která je dle rovnice 26 v rozmezí 10–40 % ( $F_1 - F_2$ ). Pro maximální zatěžovací sílu modelu proto byla vybrán 40 % kvantil tohoto maxima, což představuje 5120 N. Touto silou byly zatíženy všechny modelové kombinace a zjištěn průhyb při dané síle, což by mělo reflektovat nejnižší možnou zatěžovací sílu, která je stále v lineární oblasti všech použitých dřevin a kombinací. Taktéž byly modely přepočítány k reálným průměrům zatěžovací síly zjištěné při mechanické zkoušce. Modelování lepené spáry je však ovlivněno zejména vlastnostmi použitého lepidla, její tloušťce a na základě takzvané „penalty“. Ta vyjadřuje penalizaci tuhosti rozhraní a je vyjádřena rovnicí 37:

$$K_i = \frac{\alpha \cdot E_l}{h_1} \quad (37)$$

kde  $K_i$  je tuhost rozhraní [N/mm<sup>3</sup>],  $\alpha$  je parametr mnohem větší než 1 (podle Kaweckého a Podgórského (2018) a Turona et al., (2007), zde 50 [-],  $E_l$  je modul pružnosti dřeva ve směru vláken [MPa] a  $h_1$  je výška jednotlivé lamely [mm].

Pro porovnatelnost výsledků s jinými autory byla rovněž vypočítána tuhost. Tuhost byla vypočítána v lineární oblasti (do 40% maximálního zatížení) na základě rovnice 38 (Rescalvo et al., 2020):

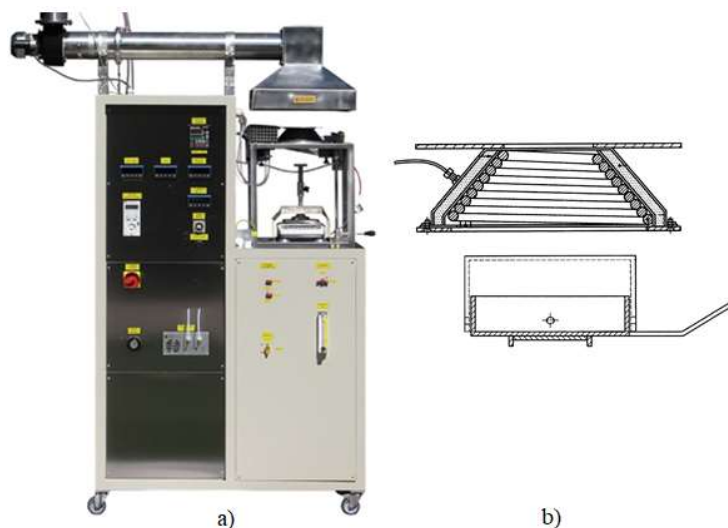
$$K = \frac{\Delta F}{\Delta w} \quad (38)$$

kde  $K$  je tuhost [N/mm],  $\Delta F$  je přírůstek aplikovaného zatížení [N] a  $\Delta w$  je odpovídající posun (průhyb) [mm].

#### 4.7. Hoření – kalorimetrická zkouška

Experiment byl prováděn pomocí Kónického kalorimetru ISO 5660-1 (CLASSIC CZ Spol. s.r.o., Česká republika) v horizontální poloze (viz obr.44), pomocí kterého byly zjištěny následující charakteristiky:

- rychlost uvolňování tepla (HRR – Heat release rate),
- a její maximální hodnota (pHRR – peak value of HRR),
- rychlost úbytku hmoty (MLR – Mass loss rate),
- průměrná rychlost uvolňování tepla (ARHE – Average rate of heat emission),
- a její maximální hodnota (MARHE),
- efektivní spalné teplo (EHC – Effective heat of combustion).



Obr. 44 Testovací zařízení pro kalorimetrickou zkoušku

a) Kónický kalorimetr ISO 5660-1 (Classic, 2021)

b) Kónický zářič a držák vzorku s ochranným krytem (ISO 5660-1, 2015)

Měřené tělesa byla vystavena tepelnému toku  $50 \text{ kW/m}^2$  po dobu 1800 s (30 min). Plocha vystavená tepelnému toku byla upravena na  $50 \times 50 \text{ mm}$  vzhledem k velikosti vzorku pomocí přídatné clony vložené do držáku vzorku (viz obr. 45). Vzorky byly obaleny do hliníkové fólie, vloženy do držáku a umístěny 30 mm od zářiče bez přídatné mřížky. Pro vznik plamene bylo použito umělého zážehu pomocí jiskry od elektrického oblouku. Kalibrace kalorimetru a nastavení dalších parametrů bylo dle ISO 5660-1 (2015) a zahrnovala tři postupné kroky. Nejprve byla stanovena přesnost vážicího zařízení pomocí kalibrovaných závaží poskytnutých výrobcem zařízení. Dále byla ověřena rychlost změny měření hmotnosti.



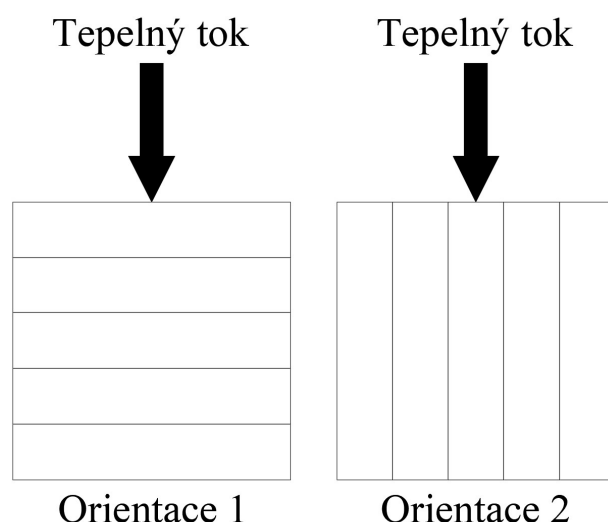
Obr. 45 Zkušební těleso v hliníkové fólii s clonou

Druhý krok zahrnoval kalibraci průtoku vzduchu ( $0,024 \pm 0,002 \text{ m}^3/\text{s}$ ) a stanovení podílu kyslíku v proudu vzduchu ( $20,95 \pm 0,01 \%$ ). Tento krok zahrnoval také zjištění hodnoty  $C$  pomocí plynového hořáku na metan, viz rovnice 39.

$$C = \frac{\dot{q}_b}{(12,54 \times 10^3)(1,10)} \sqrt{\frac{T_e}{\Delta p} \frac{1,105 - 1,5X_{O_2}}{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}} \quad (39)$$

kde  $\dot{q}_b$  odpovídá rychlosti uvolňování tepla dodávaného metanu [kW],  $(12,54 \times 10^3)$  je podíl čistého spalného tepla a stechiometrický hmotnostní poměr pro metan [kJ/kg],  $1,10$  je poměr molekulových hmotností kyslíku a vzduchu,  $T_e$  je absolutní teplota plynu na clonovém měřidle [K],  $X_{O_2}^0$  je počáteční hodnota údaje kyslíkového analyzátoru [-],  $X_{O_2}$  je údaj kyslíkového analyzátoru, molární zlomek kyslíku [-],  $\Delta p$  je rozdíl tlaku clonového měřidla [Pa].

Třetím krokem kalibrace bylo zajištění přesnosti měření tepelného toku pomocí teplotní sondy pro snímání teploty zářiče ( $848 \text{ }^\circ\text{C}$ ), která podle údajů výrobce představuje tepelný tok 50 kW. Vzorky byly vystaveny působení tepelného toku ve dvou směrech. V obou případech byl tepelný tok vodorovný působící shora na vzorek. Měnila se však orientace vzorku vzhledem k působícímu tepelnému toku (viz obr. 46). Tyto orientace mají charakterizovat možné působení tepelného toku od hypotetického požáru, který ohrožuje konstrukci. Vzhledem ke konstrukčnímu řešení kónického kalorimetru nebylo možné provést zkoušku pomocí působení tepelného toku z boku.



Obr. 46 Orientace zkušebních těles pro kalorimetrickou zkoušku

Z výsledků zkoušky byly vypočteny sledované parametry dle následujících rovnic. Pro rychlost uvolňování tepla (HRR) byla použita rovnice 40 (ISO 5660-1, 2015).

$$HRR_A(t) = \frac{(\Delta h_c / r_0) \cdot (1.10) \cdot C \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \cdot \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5X_{O_2}}}{A_s} \quad (40)$$

kde  $HRR_A(t)$  je rychlost uvolňování tepla za časový úsek a jednotku plochy [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ],  $\Delta h_c$  je čistá (netto) hodnota spalného tepla [ $\text{kJ}/\text{g}$ ],  $r_0$  je stechiometrický hmotnostní poměr kyslíku a paliva [-] (podle normy ISO 5660-1, (2015) lze použít poměr  $(\Delta h_c / r_0) = 13,1 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{kg}$ ),  $C$  je kalibrační konstanta clonového průtokoměru [ $\text{m}^{1/2} \text{ g}^{1/2} \text{ K}^{1/2}$ ],  $\Delta p$  je tlaková diference clonového průtokoměru [ $\text{Pa}$ ],  $T_e$  je absolutní teplota plynu na clonovém průtokoměru [ $\text{K}$ ],  $X_{O_2}^0$  je počáteční hodnota údaje kyslíkového analyzátoru [-],  $X_{O_2}$  je molární zlomek kyslíku vyčtený z kyslíkového analyzátoru, [-],  $A_s$  je počáteční exponovaná plocha vzorku [ $\text{m}^2$ ].

Rychlost úbytku hmoty (MLR) byl vypočítán dle rovnic uvedených níže (ISO 5660-1, 2015). Výpočet je však třeba rozdělit do minimálně 5 kroků, přičemž první dva (rovnice 41 a 42) zohledňují počátek úbytku hmoty, poslední dva kroky (rovnice 44 a 45) pak v kvazi-statické části procesu hoření zohledňují terminální stav. Rovnice 43 pak platí pro jakékoliv měření  $1 < i < n-1$ , kde  $n$  je počet měření.

$$-[MLR]_{i=0} = \frac{25m_0 - 48m_1 + 36m_2 - 16m_3 + 3m_4}{12\Delta t} \quad (41)$$

$$-[MLR]_{i=1} = \frac{3m_0 + 10m_1 - 18m_2 + 6m_3 - m_4}{12\Delta t} \quad (42)$$

$$-[MLR]_i = \frac{-m_{i-2} + 8m_{i-1} - 8m_{i+1} + m_{i+2}}{12\Delta t} \quad (43)$$

$$-[MLR]_{i=n-1} = \frac{-3m_n - 10m_{n-1} + 18m_{n-2} - 6m_{n-3} + m_{n-4}}{12\Delta t} \quad (44)$$

$$-[MLR]_{i=n} = \frac{-25m_n + 48m_{n-1} - 36m_{n-2} + 16m_{n-3} - 3m_{n-4}}{12\Delta t} \quad (45)$$

kde  $MLR$  je rychlost úbytku hmotnosti vzorku na jedno měření [g/s] s odezvou vah menší než 4 s,  $m$  je hmotnost vzorku na jedno měření [g],  $n$  je počet měření [-] a  $t$  je čas [s].

Dalším sledovaným parametrem je průměrná rychlost uvolňování tepla (ARHE), což je parametr, který určuje, jak je akumulované teplo záření rozprostřeno v čase, přičemž jeho maximální parametr (MARHE) ukazuje jaký má materiál sklon ke vzniku požáru a jak rychle emituje teplo. Vypočítá se dle rovnice 46 (Jin a Chung, 2020).

$$ARHE(t_n) = \frac{\sum_2^n \left( (t_n - t_{n-1}) \cdot \frac{q_n + q_{n-1}}{2} \right)}{t_n - t_0} \quad (46)$$

kde  $ARHE(t_n)$  je průměrná míra uvolňování tepla [kW/m<sup>2</sup>],  $t_n$  je čas [s],  $q_n$  je míra uvolňování tepla v měřeném čase [kW/m<sup>2</sup>].

Efektivní spalné teplo (EHC) vyjadřuje, kolik energie se uvolní při procesu hoření vzhledem k tomu, kolik hmoty při tom materiál ztratí. Tento parametr ovlivňují zejména způsob degradace a vlhkost obsažená v materiálu. U lignocelulózových materiálů, které mají více způsobů degradace nebývá konstantní. Výpočet EHC je uveden v rovnici 47 (ISO 5660-1, 2015).

$$EHC = \frac{HRR}{MLR} \quad (47)$$

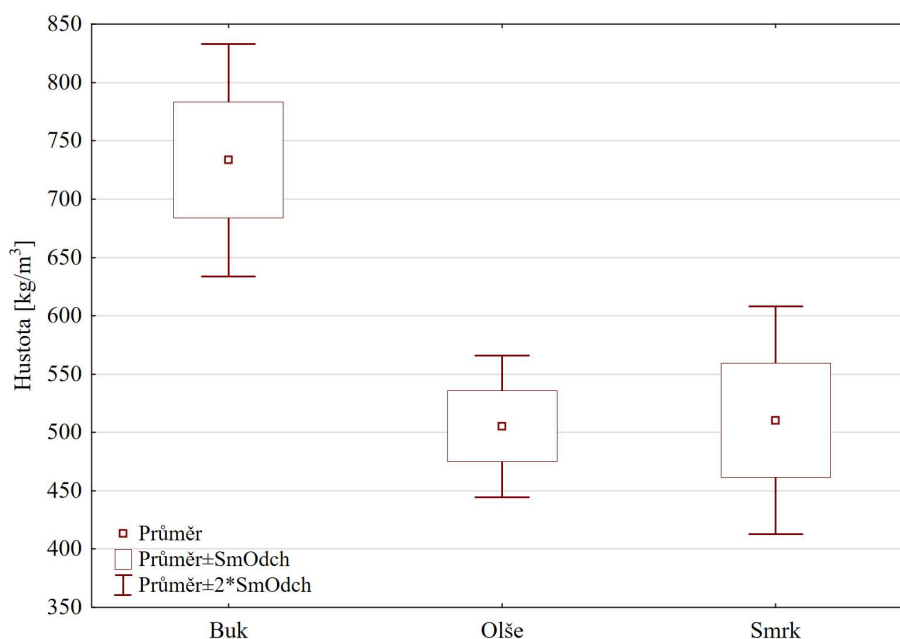
kde  $EHC$  je efektivní spalné teplo [MJ/kg],  $HRR$  je rychlost uvolňování tepla [kW/m<sup>2</sup>] a  $MLR$  je rychlost úbytku hmoty [g].

## 5. Výsledky a diskuze

Tato kapitola shrnuje zjištěné výsledky z měření hustoty, modulu pružnosti, ohybové pevnosti, dále porovnání s modely nosníků a požární vlastnosti zjištěné kalorimetrickou zkouškou. Součástí je rovněž diskuze na dané téma.

### 5.1. Hustota

Prvním měřením bylo zjištění hustoty jednotlivých klimatizovaných lamel, které byly použity pro lepení nosníků. Výsledky jsou znázorněny na obr. 47 a v tabulce 13.



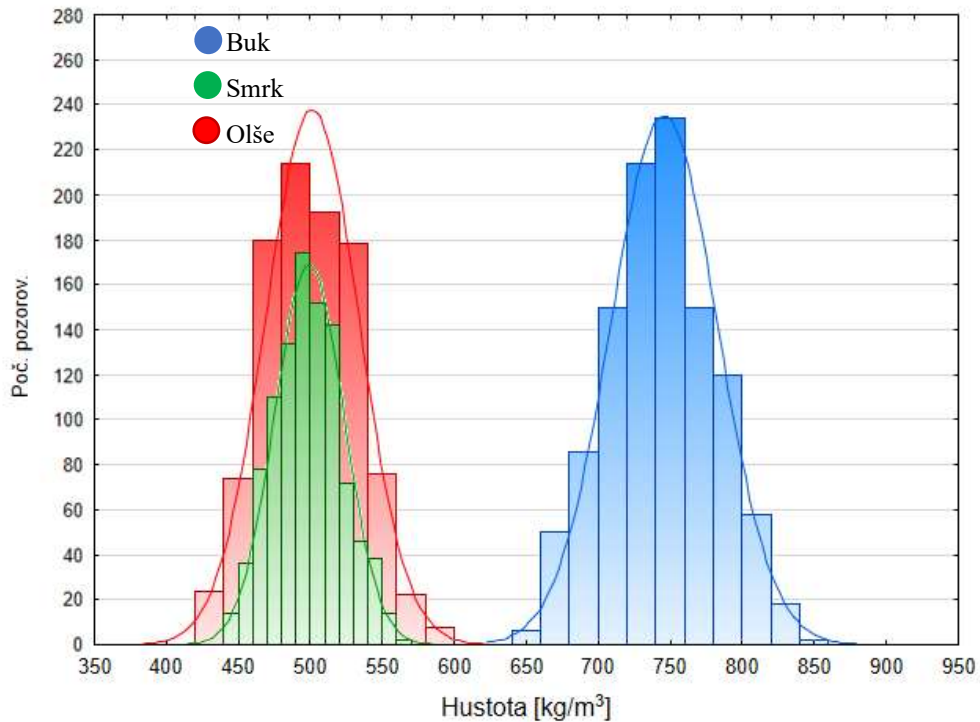
Obr. 47 Hustota lamel pro lepení nosníků při 12% vlhkosti

Tabulka 13 Hustota lamel pro lepení nosníků při 12% vlhkosti

Dřevina	Průměr [kg/m <sup>3</sup> ]	Min [kg/m <sup>3</sup> ]	Max [kg/m <sup>3</sup> ]	Sm. odch. [kg/m <sup>3</sup> ]	Var. Koef. [%]
Buk	733,52	582,88	851,37	49,80	6,79
Olše	505,34	440,31	601,20	30,37	6,01
Smrk	510,35	422,78	648,53	48,83	9,57

Pro zajištění normality dat, a tedy i možnost použití parametrických testů u dalších vlastností, byl proveden test normality dat pomocí Shapiro-Wilkova testu. Výsledek tohoto testu je znázorněn na Obr. 48 a v Tabulce 14.





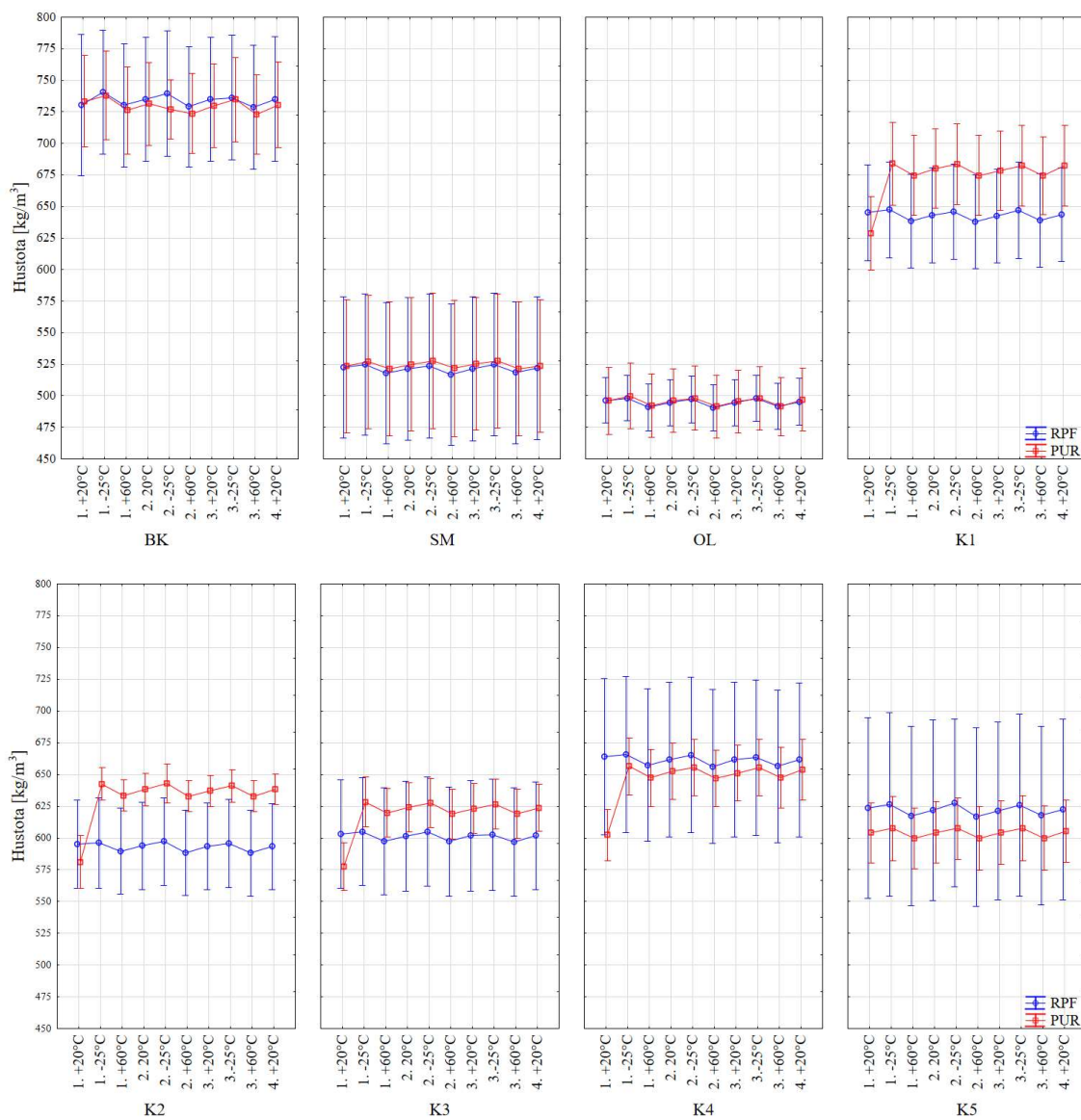
Obr. 48 Histogramy hustot klimatizovaných lamel s normálním rozdělením

Tabulka 14 Ověření normality pomocí Shapiro-Wilkova testu na hladině  $\alpha = 0,05$

Dřevina	Shapiro-Wilk W	p
Buk	0,9953	0,1028
Olše	0,9944	0,0590
Smrk	0,9945	0,0797

Výsledkem Shapiro-Wilkova testu je podobně jako u korelace interval (0,1), přičemž čím blíže k hodnotě 1 se hodnota  $W$  přibližuje, tím více normální rozdělení vybraný soubor dat vykazuje. Na základě výše zmíněného obrázku a tabulky je možné konstatovat, že všechny dřeviny vykazují normální rozdělení, přičemž ideálnímu normálnímu rozdělení se nejvíce blíží buk, zatímco nejméně olše.

Na základě těchto výsledků byly lamely seřazeny vzestupně a podle kombinačního klíče použity pro lepení nosníků, které byly v průběhu teplotního zatěžování průběžně měřeny. Na základě měření rozměrových změn a změny hmotnosti byla zjištěna hustota při každé změně teploty, viz obr. 49.



Obr. 49 Změny hustoty v průběhu teplotního cyklování

Z grafu 49 je patrné kolísání hustoty, způsobené především změnou vlhkosti, viz dále. Všechny kombinace vykazují stejný trend, avšak v případě kombinací K1 – K4 je znatelný nárůst mezi referenční teplotou a prvním krokem cyklu (mrazení na  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), kdy došlo k vyrovnání vlhkosti v nosníku. Taktéž jsou patrné poměrně velké rozptyly hustoty, což je způsobeno roztríděním lamel pro každou kombinaci tak, aby obsahovala nejnižší ale i nejvyšší hodnoty hustoty lamel z výběru, viz kap. 4.3. To potvrzuje i fakt, že hodnoty na hranicích směrodatných odchylek rozptylů vykazují stejný trend jako průměrné hodnoty, a tedy se od průměru neliší. Analýza rozptylů (ANOVA) pak potvrzuje tvrzení, že při působení všech faktorů není mezi jednotlivými stupni teplotního cyklování statisticky významný rozdíl (Viz tab. 15).

Tabulka 15 ANOVA teplotních cyklů nosníků

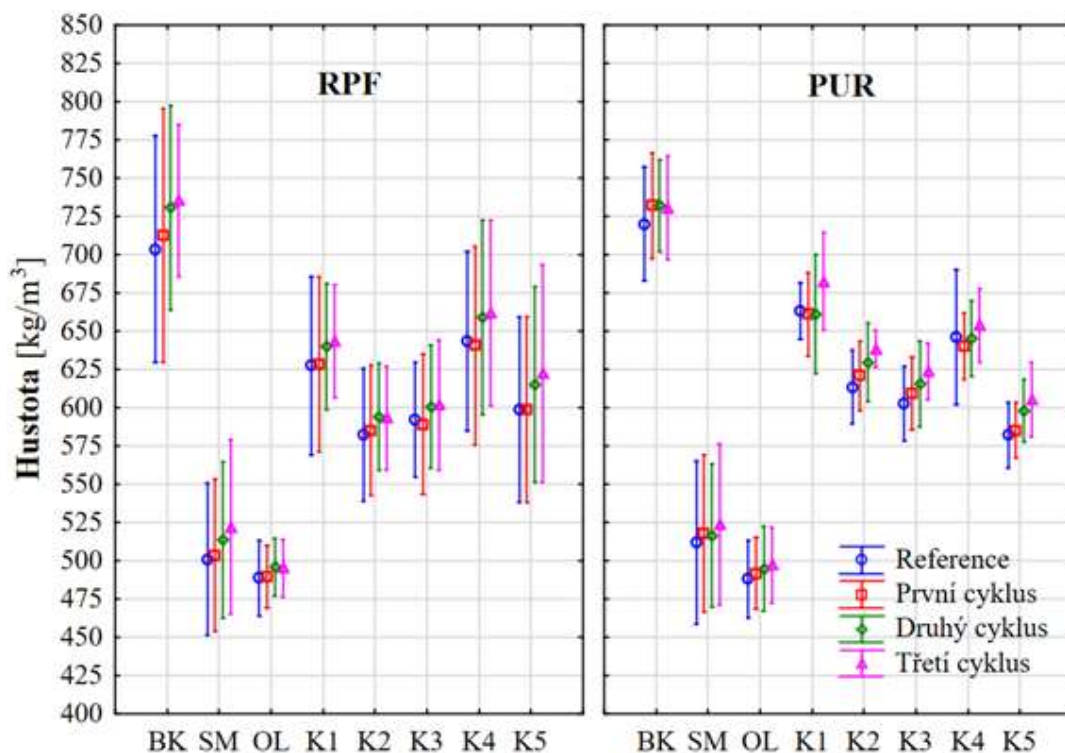
	SS	DF	MS	F	p
Průsečík	299952560	1	299952560	281682,7	0,000
Kombinace	3989823	7	569975	535,3	0,000
Lepidlo	9531	1	9531	9,0	0,003
Cyklus	17840	9	1982	1,9	0,055
Kombinace × Lepidlo	74885	7	10698	10,0	0,000
Kombinace × Cyklus	11517	63	183	0,2	1,000
Lepidlo × Cyklus	12457	9	1384	1,3	0,233
Kombinace × Lepidlo × Cyklus	13615	63	216	0,2	1,000
Chyba	681510	640	1065		

kde DF jsou stupně volnosti, SS, je suma čtverců, MS je průměr čtverců.

Z výše zmíněných výsledků jsou však směrodatné pouze hodnoty na konci každého cyklu, kdy došlo k vyrovnání teploty a vlhkosti tak, aby nosníky vykazovaly 12% vlhkost, viz tab. 16 a obr. 50. Při této vlhkosti byly nosníky testovány pomocí mechanického zatížení, a proto již dále v práci bude brán zřetel pouze na tyto hodnoty.

Tabulka 16 Průměrné hodnoty hustoty lepených nosníků na konci každého cyklu

Kombinace		RPF Cyklus				PUR Cyklus			
		Ref.	První	Druhý	Třetí	Ref.	První	Druhý	Třetí
Buk	Průměr	703,46	712,64	730,63	735,26	719,83	732	732,1	730,45
	Sm. odch.	53,33	59,83	48,07	35,62	26,75	24,81	21,52	24,52
Olše	Průměr	488,51	489,54	495,9	495,3	488	491,54	494,7	497,09
	Sm. odch.	17,61	14,77	13,5	13,46	18,12	16,83	19,99	17,78
Smrk	Průměr	500,85	503,57	513,53	521,99	511,74	517,74	516,46	523,7
	Sm. odch.	35,86	35,87	36,51	40,87	38,39	36,8	33,6	37,99
K1	Průměr	627,45	628,38	640,04	643,4	663,23	660,96	661	682,52
	Sm. odch.	41,99	41,4	29,55	26,68	13,09	19,84	27,87	22,97
K2	Průměr	582,23	585,23	593,91	593,25	613,38	620,76	629,68	638,5
	Sm. odch.	41,99	41,4	29,55	26,68	17,39	16,31	18,44	8,59
K3	Průměr	592,2	589,12	600,85	601,73	602,82	609,04	615,67	623,89
	Sm. odch.	27,12	32,84	28,97	30,71	17,47	17,07	20,23	13,3
K4	Průměr	643,23	640,62	659,09	661,72	646,15	640,26	645,31	653,87
	Sm. odch.	42,21	46,61	45,75	43,66	31,54	15,62	17,72	17,3
K5	Průměr	598,76	598,66	615,32	622,33	581,96	585,17	598,03	605,32
	Sm. odch.	43,54	43,55	45,85	51,3	15,23	12,86	14,69	17,64



Obr. 50 Hustota lepených nosníků na konci každého cyklu při 12% vlhkosti

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že v průběhu teplotních cyklů dochází ke změně hustoty lepených nosníků. Tato změna vykazuje větší rozptyl u nosníků lepených RPF lepidlem než u nosníků lepených pomocí PUR lepidla. Průměrnou změnu hustoty mezi referenčními vzorky klimatizovanými při 20 °C a 65 % RH a jednotlivými cykly ukazuje tabulka 17.

Tabulka 17 Porovnání změny hustot nosníků mezi cykly v procentech

RPF	Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Ref. a 1.c.	1,3	0,2	0,5	0,1	0,5	-0,5	-0,4	0,0
Ref. a 2.c.	3,7	1,5	2,5	2,0	2,0	1,4	2,4	2,7
Ref. a 3.c.	4,3	1,4	4,0	2,5	1,9	1,6	2,8	3,8
PUR	Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Ref. a 1.c.	1,7	0,7	1,2	-0,3	1,2	1,0	-0,9	0,5
Ref. a 2.c.	1,7	1,4	0,9	-0,3	2,6	2,1	-0,1	2,7
Ref. a 3.c.	1,5	1,8	2,3	2,8	3,9	3,4	1,2	3,9

Změny hustoty mezi teplotními cykly a mezi lepidly nejsou velké, nicméně na základě výsledku analýzy rozptylu (viz tab. 18) je patrné, že i tento faktor je statisticky významný. Z toho důvodu byl proveden Tukeyho test významnosti, přičemž z důvodu velikosti tabulky byla tabulka s Tukeyho testem rozdělena na 4 díly, viz přílohy 3–7.

Tabulka 18 Analýza rozptylů (ANOVA) hustot nosníků

Efekt	DF	SS	MS	F	p
Průsečík	1	117258645	117258645	98981,05	0,000
Kombinace	7	1572446	224635	189,62	0,000
Cyklus	3	14204	4735	4,00	0,008
Lepidlo	1	8211	8211	6,93	0,009
Kombinace × Cyklus	21	2098	100	0,08	1,000
Kombinace × Lepidlo	7	22626	3232	2,73	0,010
Cyklus × Lepidlo	3	721	240	0,20	0,894
Kombinace × Cyklus × Lepidlo	21	1970	94	0,08	1,000
Chyba	256	303272	1185		
Celkem	319	1925549			

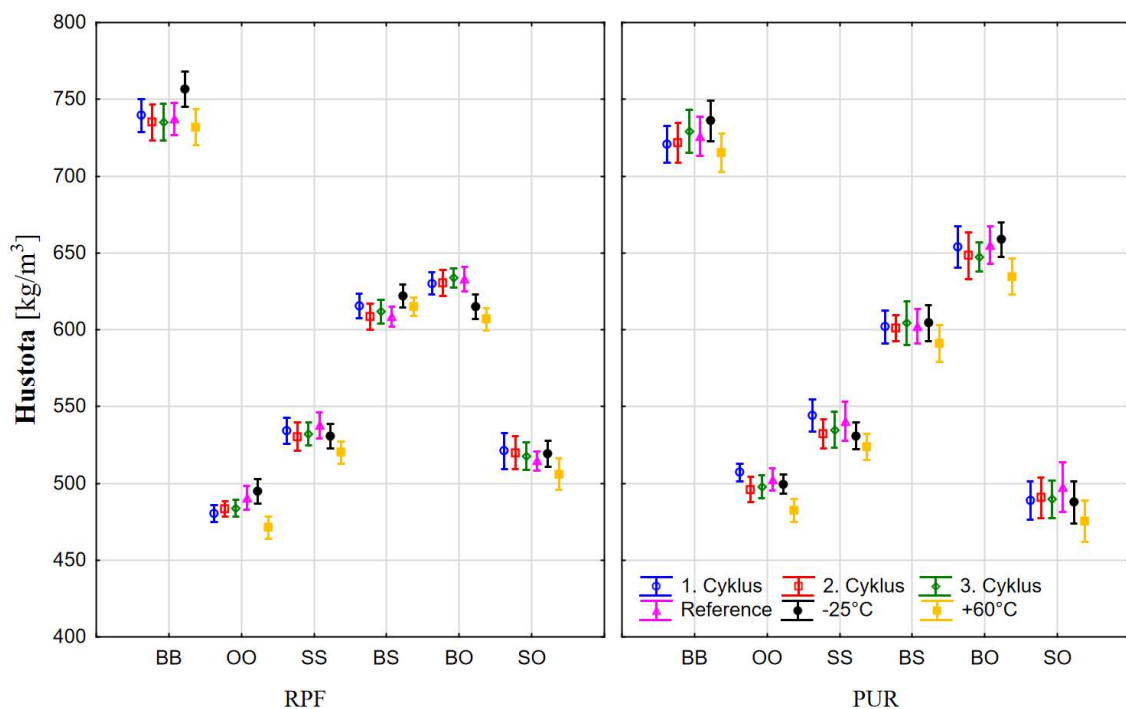
kde DF jsou stupně volnosti, SS, je suma čtverců, MS je průměr čtverců.

Z Tukeyova testu vyplývá, že v rámci každé kombinace nejsou rozdíly hustot mezi lepidly a mezi cykly statisticky významné. Samozřejmě, mezi jednotlivými kombinacemi existují statisticky významné rozdíly v hustotách, ale to je z podstaty kombinace dřevin žádané. Přehled porovnání hustoty vztažené k homogenním kombinacím a jednotlivým cyklům vyjadřuje procentuálně tabulka 19.

Tabulka 19 Porovnání hustot nosníků vztažených k referenční dřevině v procentech

RPF	Ref. ↓	Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Reference	BK	0,0	-44,0	-40,5	-12,1	-20,8	-18,8	-9,4	-17,5
	OL	30,6	0,0	2,5	22,1	16,1	17,5	24,1	18,4
	SM	28,8	-2,5	0,0	20,2	14,0	15,4	22,1	16,4
1. Cyklus	BK	0,0	-45,6	-41,5	-13,4	-21,8	-21,0	-11,2	-19,0
	OL	31,3	0,0	2,8	22,1	16,4	16,9	23,6	18,2
	SM	29,3	-2,9	0,0	19,9	14,0	14,5	21,4	15,9
2. Cyklus	BK	0,0	-47,3	-42,3	-14,2	-23,0	-21,6	-10,9	-18,7
	OL	32,1	0,0	3,4	22,5	16,5	17,5	24,8	19,4
	SM	29,7	-3,6	0,0	19,8	13,5	14,5	22,1	16,5
3. Cyklus	BK	0,0	-48,4	-40,9	-14,3	-23,9	-22,2	-11,1	-18,1
	OL	32,6	0,0	5,1	23,0	16,5	17,7	25,1	20,4
	SM	29,0	-5,4	0,0	18,9	12,0	13,3	21,1	16,1
PUR		Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Reference	BK	0,0	-47,5	-40,7	-8,5	-17,4	-19,4	-11,4	-23,7
	OL	32,2	0,0	4,6	26,4	20,4	19,0	24,5	16,1
	SM	28,9	-4,9	0,0	22,8	16,6	15,1	20,8	12,1
1. Cyklus	BK	0,0	-48,9	-41,4	-10,7	-17,9	-20,2	-14,3	-25,1
	OL	32,8	0,0	5,1	25,6	20,8	19,3	23,2	16,0
	SM	29,3	-5,3	0,0	21,7	16,6	15,0	19,1	11,5
2. Cyklus	BK	0,0	-48,0	-41,8	-10,8	-16,3	-18,9	-13,4	-22,4
	OL	32,4	0,0	4,2	25,2	21,4	19,6	23,3	17,3
	SM	29,5	-4,4	0,0	21,9	18,0	16,1	20,0	13,6
3. Cyklus	BK	0,0	-46,9	-39,5	-7,0	-14,4	-17,1	-11,7	-20,7
	OL	31,9	0,0	5,1	27,2	22,1	20,3	24,0	17,9
	SM	28,3	-5,4	0,0	23,3	18,0	16,1	19,9	13,5

Hustota byla rovněž zjišťována u kombinací dřevin pro smykovou pevnost při podélném zatížení. Hodnoty hustot jsou uvedeny na obr. 51 a v tabulce 20. Z výsledků vyplývá, že v rámci každé kombinace neexistují statisticky významné rozdíly mezi cykly, což potvrzuje i Tukeyho test (viz přílohy 3 a 8-11). Nicméně je patrné, že v každé kombinaci nastává pokles hustoty u zkušebních těles vystavených působení teploty +60 °C oproti referenčním hodnotám (+20 °C, 65 % RH). Pokles hustoty je dán především snížením vlhkosti kombinací dřevin pro smykovou pevnost. Tento trend je navíc možné pozorovat i v rámci kombinace dřevin. Mezi kombinacemi dřevin jsou znatelné rozdíly, nicméně, to je z povahy kombinace dvou dřevin žádaný rozdíl.



Obr. 51 Hustota kombinací dřevin pro smykovou pevnost

Při porovnání hustoty kombinací lepených pomocí PUR a RPF adhesiva se objevují větší rozdíly u kombinací dřevin, kde nejvýraznější rozdíl připadá na kombinaci Buk-Olše (BO), kde vyšších hodnot dosahují vzorky lepené PUR adhesivem a Smrk-Olše (SO), kde vyšších hodnot dosahují vzorky lepené RPF adhesivem. Tento rozdíl je však způsoben spíše variabilitou dřevin než použitým lepidlem. Při vzájemné interakci všech faktorů však rozdíly mezi soubory dat nejsou statisticky významné, viz tab. 21.

Tabulka 20 Hodnoty hustot kombinací dřevin pro smykovou pevnost

RPF		Cyklus					
		1. c.	2. c.	3. c.	Ref.	-25 °C	+60 °C
BB	Průměr	739,43	735,06	735,12	737,23	756,76	731,74
	Sm. odch.	22,92	25,07	25,27	22,00	24,32	24,99
OO	Průměr	480,39	483,34	483,94	490,49	494,99	471,22
	Sm. odch.	12,06	10,37	11,40	16,65	17,08	15,64
SS	Průměr	534,17	530,29	532,22	537,70	530,55	520,16
	Sm. odch.	17,72	19,81	16,34	17,81	16,96	15,50
BS	Průměr	615,56	608,60	611,90	608,55	621,89	615,07
	Sm. odch.	17,26	17,95	16,43	14,13	16,18	12,64
BO	Průměr	630,13	630,39	633,74	632,84	614,99	606,94
	Sm. odch.	15,72	18,24	13,18	16,81	16,90	15,35
SO	Průměr	521,15	519,87	517,78	514,50	519,19	505,93
	Sm. odch.	24,90	22,62	19,28	13,27	17,91	21,59

PUR		Cyklus					
		1. c.	2. c.	3. c.	Ref.	-25 °C	+60 °C
BB	Průměr	720,64	721,57	729,11	725,85	736,11	715,35
	Sm. odch.	25,75	27,84	29,67	27,27	28,29	26,58
OO	Průměr	507,18	495,99	497,79	502,51	499,46	482,34
	Sm. odch.	12,11	17,35	16,19	15,64	13,36	16,14
SS	Průměr	544,26	532,04	534,86	540,44	530,94	523,69
	Sm. odch.	22,37	20,22	24,90	26,89	19,06	17,69
BS	Průměr	601,82	601,13	604,30	602,24	604,30	590,84
	Sm. odch.	23,12	18,16	30,06	24,31	24,87	25,59
BO	Průměr	653,96	648,31	647,26	655,12	658,69	634,67
	Sm. odch.	28,84	32,52	20,36	26,40	24,03	25,25
SO	Průměr	488,59	490,58	489,59	497,52	487,76	475,35
	Sm. odch.	26,58	28,38	26,05	34,44	29,35	28,55

Tabulka 21 Analýza rozptylů (ANOVA) hustot kombinací dřevin pro smykovou pevnost

	DF	SS	MS	F	p
Průsečík	1	490606351	490606351	1044036	0,000
Kombinace	5	10385868	2077174	4420	0,000
Lepidlo	1	1852	1852	4	0,048
Cyklus	5	37942	7588	16	0,000
Kombinace × Lepidlo	5	116810	23362	50	0,000
Kombinace × Cyklus	25	16877	675	1	0,076
Lepidlo × Cyklus	5	1083	217	0	0,806
Kombinace × Lepidlo × Cyklus	25	13208	528	1	0,305
Chyba	1368	642841	470		
Celkem	1439	11216482			

kde DF jsou stupně volnosti, SS je suma čtverců, MS jsou průměry čtverců.

S hustotou velmi úzce souvisí i vlhkost, která navíc silně ovlivňuje i zjišťované mechanické vlastnosti uvedené dále. Proto byla měřena vlhkost nosníků pro ohybovou zkoušku nejen na začátku cyklů („1.+20 °C“ u nosníků a „Reference“ u kombinací dřevin pro smykovou pevnost), ale i v průběhu. Výsledky obsahu vlhkosti u nosníků vystavených všem cyklům souhrnně ukazuje Tabulka 22, která je pro přehlednost jednotlivých teplotních cyklů dělená vertikálně.

Tabulka 22 Vlhkost nosníků v průběhu všech cyklů

RPF		1. +20 °C	1. -25 °C	1. +60 °C	2. 20 °C	2. -25 °C	2. +60 °C	3. +20 °C	3. -25 °C	3. +60 °C	4. +20 °C
BK	Průměr	11,55	11,72	11,00	11,35	11,51	10,88	11,24	11,33	10,80	11,77
	Sm. odch.	0,77	0,80	0,82	0,81	0,81	0,72	0,72	0,72	0,70	0,86
SM	Průměr	12,41	12,50	11,64	12,19	12,38	11,55	12,08	12,73	11,88	11,95
	Sm. odch.	1,01	1,02	0,99	0,99	0,98	1,01	0,99	0,98	0,99	0,84
OL	Průměr	12,11	12,23	11,26	11,90	12,12	11,16	11,86	12,54	11,59	12,11
	Sm. odch.	0,33	0,33	0,39	0,38	0,36	0,42	0,39	0,37	0,47	0,47
K1	Průměr	11,17	11,22	10,69	11,03	11,17	10,56	10,96	11,55	10,72	11,18
	Sm. odch.	0,50	0,50	0,59	0,60	0,60	0,63	0,64	0,63	0,61	0,63
K2	Průměr	11,31	11,51	10,52	11,18	11,42	10,34	11,03	11,47	10,30	11,03
	Sm. odch.	0,34	0,32	0,35	0,37	0,39	0,35	0,38	0,35	0,36	0,39
K3	Průměr	11,61	11,85	10,93	11,46	11,72	10,77	11,36	11,52	10,73	11,38
	Sm. odch.	0,86	0,89	0,87	0,89	0,89	0,88	0,90	0,90	0,89	0,90
K4	Průměr	12,41	12,66	11,87	12,32	12,48	11,75	12,22	12,36	11,73	11,71
	Sm. odch.	1,38	1,37	1,36	1,42	1,41	1,40	1,45	1,47	1,42	1,48
K5	Průměr	11,88	11,94	11,16	11,63	11,80	11,05	11,54	12,19	11,33	11,87
	Sm. odch.	0,55	0,54	0,46	0,44	0,45	0,43	0,44	0,45	0,43	0,39
PUR		1. +20 °C	1. -25 °C	1. +60 °C	2. 20 °C	2. -25 °C	2. +60 °C	3. +20 °C	3. -25 °C	3. +60 °C	4. +20 °C
BK	Průměr	11,25	11,41	10,92	11,37	11,45	10,77	11,10	11,18	10,73	11,39
	Sm. odch.	0,77	0,76	0,77	0,78	0,79	0,74	0,76	0,76	0,75	0,77
SM	Průměr	11,90	12,07	11,43	12,01	12,12	11,33	11,76	11,85	11,38	12,04
	Sm. odch.	0,75	0,75	0,77	0,74	0,73	0,78	0,76	0,75	0,76	0,74
OL	Průměr	11,63	11,84	10,92	11,62	11,78	10,73	11,28	11,40	10,84	11,58
	Sm. odch.	0,82	0,83	0,84	0,82	0,81	0,83	0,81	0,81	0,80	0,79
K1	Průměr	11,15	11,16	10,55	11,08	11,22	10,62	10,79	11,00	10,41	10,54
	Sm. odch.	0,71	0,80	0,87	0,84	0,82	0,99	0,89	0,87	0,87	0,75
K2	Průměr	11,88	12,00	11,06	11,76	11,94	11,00	11,39	11,62	10,93	10,85
	Sm. odch.	0,87	0,87	0,74	0,77	0,79	0,76	0,80	0,81	0,78	0,73
K3	Průměr	11,34	11,47	10,72	11,47	11,66	10,64	11,11	11,36	10,56	11,59
	Sm. odch.	0,33	0,34	0,19	0,19	0,20	0,23	0,23	0,23	0,29	0,22
K4	Průměr	11,27	11,37	10,73	11,43	11,62	10,71	11,13	11,36	10,60	11,63
	Sm. odch.	0,58	0,57	0,69	0,70	0,67	0,57	0,59	0,58	0,56	0,58
K5	Průměr	11,53	11,69	11,00	11,92	12,14	11,09	11,65	11,92	11,06	12,31
	Sm. odch.	0,53	0,53	0,55	0,58	0,61	0,60	0,62	0,64	0,61	0,67



Z výše zmíněné tabulky vyplývá, že v průběhu teplotních cyklů docházelo ke změnám vlhkosti, avšak rozdíly nejsou při uvážení všech faktorů statisticky významné, viz Tabulka 23.

Tabulka 23 ANOVA vlhkosti nosníků v průběhu cyklů

	DF	SS	MS	F	p
Průsečík	1	99125,27	99125,27	169620,9	0,000
Kombinace	7	79,55	11,36	19,4	0,000
Lepidlo	1	10,87	10,87	18,6	0,000
Cyklus	9	79,43	8,83	15,1	0,000
Kombinace × Lepidlo	7	30,85	4,41	7,5	0,000
Kombinace × Cyklus	63	8,01	0,13	0,2	1,000
Lepidlo × Cyklus	9	3,02	0,34	0,6	0,818
Kombinace × Lepidlo × Cyklus	63	5,85	0,09	0,2	1,000
Chyba	610	356,48	0,58		
Celkem	769	578,04			

kde DF jsou stupně volnosti, SS je suma čtverců, MS jsou průměry čtverců.

Vlhkosti uvedené v tabulce 22 jsou však hodnoty vlhkosti nosníků, které prošly všemi třemi cykly teplotního namáhání. Hodnoty vlhkostí, které nosníky obsahovaly při testování však pocházejí z jiného souboru dat, s výjimkou hodnot „4. +20 °C“ které sloužily jako hodnoty vlhkostí na konci třetího cyklu. Rozdílnost souboru dat je dána především zmenšujícím se počtem nosníků po každém testování. Pro zachování stejného rozsahu datových souborů proto byly vybrány jen hodnoty vlhkostí těch nosníků, které byly na konci příslušného cyklu otestovány. Hodnoty vlhkosti jsou uvedeny v Tabulce 24 a budou sloužit dále pro porovnání mechanických vlastností nosníků.

Tabulka 24 Hodnoty vlhkosti nosníků při testování v %

		RPF				PUR			
		Ref.	1. c.	2. c.	3. c.	Ref.	1. c.	2. c.	3. c.
BK	Průměr	11,39	11,70	11,93	11,77	12,18	11,76	11,26	11,39
	Sm. odch.	0,34	0,46	0,82	0,86	0,74	0,78	0,83	0,77
SM	Průměr	11,91	11,13	11,10	11,95	12,53	12,65	11,82	12,04
	Sm. odch.	0,63	0,57	0,60	0,83	0,56	0,80	0,44	0,74
OL	Průměr	11,18	11,54	12,02	12,11	11,86	11,55	11,81	11,58
	Sm. odch.	0,71	0,53	0,82	0,47	0,71	0,88	1,02	0,79
K1	Průměr	11,08	11,32	11,18	11,18	10,94	10,48	11,01	10,54
	Sm. odch.	0,52	1,16	0,77	0,63	0,84	0,51	0,51	0,75
K2	Průměr	11,28	11,49	10,85	11,03	10,97	10,73	11,04	10,85
	Sm. odch.	0,46	0,67	0,52	0,39	0,56	0,80	1,21	0,73
K3	Průměr	11,27	11,55	11,33	11,38	11,17	11,02	10,43	11,59
	Sm. odch.	0,74	0,82	0,64	0,90	0,72	0,49	0,56	0,22
K4	Průměr	11,25	11,88	11,17	11,65	11,50	11,20	11,04	11,63
	Sm. odch.	0,58	0,52	0,56	0,88	0,94	0,75	0,52	0,58
K5	Průměr	12,10	11,67	11,84	11,88	11,49	12,18	11,99	12,31
	Sm. odch.	0,33	0,97	1,14	0,38	0,70	0,67	0,49	0,67

Taktéž u kombinací dřevin pro smykovou pevnost byla zjišťována vlhkost a výsledky tohoto měření jsou uvedeny v Tabulce 25.

Tabulka 25 Hodnoty vlhkosti kombinací dřevin pro smykovou pevnost v %

RPF		Cyklus					
		1. c.	2. c.	3. c.	Ref.	-25 °C	+60 °C
BB	Průměr	10,39	10,35	10,34	10,62	8,93	7,14
	Sm. odch.	0,15	0,12	0,15	0,17	0,17	0,30
OO	Průměr	9,73	9,81	9,85	9,94	9,72	6,06
	Sm. odch.	0,17	0,16	0,13	0,16	0,40	0,39
SS	Průměr	10,85	10,65	10,73	11,15	9,59	7,15
	Sm. odch.	0,36	0,24	0,20	0,20	0,24	0,23
BS	Průměr	10,02	10,13	10,17	10,76	9,53	7,78
	Sm. odch.	0,20	0,17	0,18	0,69	0,29	0,18
BO	Průměr	10,29	10,30	10,24	10,72	8,86	7,13
	Sm. odch.	0,17	0,23	0,11	0,16	1,56	0,25
SO	Průměr	10,73	11,10	10,70	10,74	9,79	6,85
	Sm. odch.	0,43	0,20	0,40	0,24	0,33	0,42

PUR		Cyklus					
		1. c.	2. c.	3. c.	Ref.	-25 °C	+60 °C
BB	Průměr	10,06	10,02	10,24	10,66	8,58	7,17
	Sm. odch.	0,17	0,17	0,18	1,47	0,56	0,20
OO	Průměr	9,80	9,87	9,98	9,93	9,07	6,11
	Sm. odch.	0,18	0,22	0,22	0,53	0,16	0,36
SS	Průměr	10,78	10,66	10,59	11,09	9,33	7,22
	Sm. odch.	0,17	0,17	0,19	0,20	0,95	0,25
BS	Průměr	11,43	10,36	10,74	11,05	9,35	7,67
	Sm. odch.	0,41	1,74	0,27	0,25	0,20	0,19
BO	Průměr	10,10	10,05	10,08	10,22	8,12	7,16
	Sm. odch.	0,14	0,17	0,18	0,28	0,17	0,20
SO	Průměr	10,70	10,09	10,19	10,64	10,07	7,16
	Sm. odch.	0,34	0,24	0,17	0,47	0,32	0,25

Naproti tomu u kombinací dřevin pro smykovou pevnost byly při uvážení všech faktorů rozdíly statisticky významné, viz tab. 26.

Tabulka 26 ANOVA vlhkosti kombinací dřevin pro smykovou pevnost

	SS	SV	MS	F	p
Průsečík	134228,8	1	134228,8	713842,4	0,000
Kombinace	130,2	5	26,0	138,5	0,000
Lepidlo	1,7	1	1,7	9,3	0,003
Cyklus	2229,8	5	446,0	2371,7	0,000
Kombinace × Lepidlo	16,1	5	3,2	17,2	0,000
Kombinace × Cyklus	81,3	25	3,3	17,3	0,000
Lepidlo × Cyklus	8,7	5	1,7	9,2	0,000
Kombinace × Lepidlo × Cyklus	31,5	25	1,3	6,7	0,000
Chyba	257,2	1368	0,2		

kde DF jsou stupně volnosti, SS je suma čtverců, MS jsou průměry čtverců.

Největší podíl na rozdílech mají bezesporu samostatné skupiny tepelného zatížení (-25 °C a +60 °C), kdy se vlhkost kombinací dřevin pro smykovou pevnost razantně snížila oproti referenci a cyklovaným tělesům. Snížení vlhkosti ve zkušebních tělesech si lze vysvětlit pomocí tzv. stavu vlhkostní rovnováhy (SVR), při kterém se vlhkost ve dřevě obklopeném vnějším prostředím o dané teplotě a relativní vlhkosti vzduchu (RH) ustálí na rovnovážné vlhkosti (Glass a Zelinka, 2021), kterou si dřevo zachová, pokud se nezmění vnější podmínky (parciální tlak vodních par a teplota) (Mitchell, 2018).

Teplota se projevuje na obsahu vlhkosti ve dřevě dvojím způsobem. Při zvýšené teplotě nastává změna v obsahu vlhkosti, což způsobuje změny v konfiguraci vazeb nekystalických oblastí molekul celulózy a hemicelulóz s celulózou vedoucí k sesychání dřeva. Krystalické oblasti celulózy však vykazují rezistenci v pohybu molekul, čímž vzniká napětí na amorfní část molekuly. V důsledku toho se při autokontrakci buněčné stěny při sušení vytvoří více vodíkových vazeb (Hillis, 1984). Tyto volné vodíkové vazby umožňují provázání dalších dřevních elementů mezi sebou, čímž se zvýší pevnost dřeva. To potvrzují i výsledky Baranského et al., (2014), kteří testovali vliv vlhkosti bukového a borovicového dřeva na mechanické vlastnosti dřeva. Taktéž Franke et al. (2019) zjišťovali na zabudovaném lepeném dřevě v různých částech Švýcarska vliv teploty a relativní vzrušné vlhkosti na rovnovážnou vlhkost dřeva. Z jejich výsledků je patrné, že v průběhu teplých měsíců je nižší vzdušná vlhkost a tomu odpovídající nižší vnitřní a povrchová vlhkost, což opět potvrzuje vztah teploty a vlhkosti.

Naproti tomu při teplotách pod bodem mrazu již nemá vzdušná vlhkost natolik velký vliv, ale důležitý je obsah vody ve dřevě. Z tabulek 20 a 24 je patrné, že mražené vzorky vykazují vyšší průměrnou hustotu ale zároveň nižší průměrnou vlhkost než referenční vzorky. Ke stejnému závěru došli i Campean et al. (2008) kteří zjistili, že mezi smrkovými vzorky při referenční teplotě a mraženými vzorky je průměrný pokles vlhkosti 6-10%, což je srovnatelné s výsledky v tabulce 24.

Přeměna kapalně vody na led uvnitř buněk vyvolává určitý tlak na buněčné stěny, který může vyvolat dostatečnou sílu k porušení buněčné stěny a k rozbití některých vazeb mezi molekulami vázané vody a dřevní hmotou a "vytlačit" určité množství vody z buněčných stěn. Difúzi vlhkosti z buněčných stěn do lumenů buněk během mražení je podle Shmulského a Shvetse (2006) důsledek gradientu tlaku par. S klesající teplotou klesá tlak vodní páry ve vzduchu rychleji než tlak vázané vody ve dřevě, což způsobuje migraci vody z buněčné stěny do vzduchu (do buněčného lumenu), kde krystalizuje.

Z výše zmíněných tabulek je patrné, že i nosníky z lepeného lamelového dřeva vykazují při cyklickém vystavení mrazení a ohřevu průměrný nárůst hustoty. Ke stejnému výsledku došli i Yang, et al. (2021), kteří cyklicky zmrazovali a ohřivali lepené dřevo modřínu a borovice. Taktéž Szmutku, et al. (2011) zjistili, že se po vysušení liší hustota dřívě zmrzlého a nezmrazeného dřeva o 1,5 %.

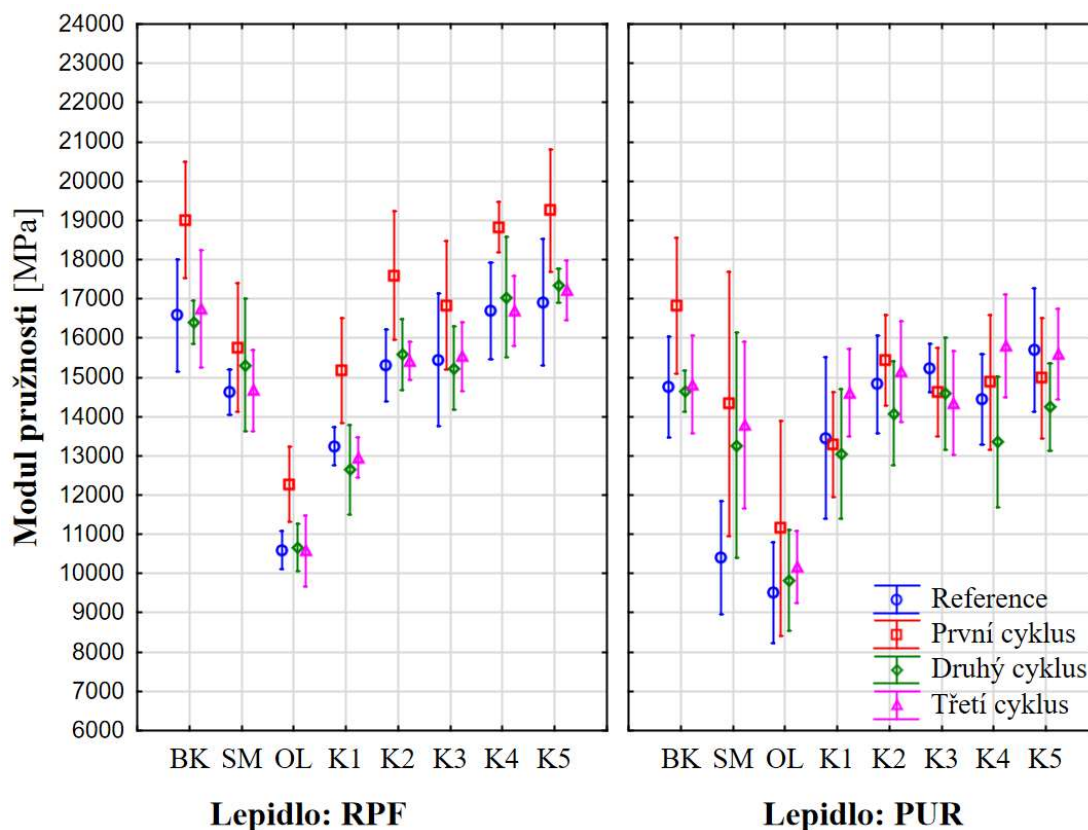
## 5.2. Modul pružnosti

Modul pružnosti byl zjišťován u nosníků namáhaných na ohyb a výsledky zobrazuje tabulka 27 a obr. 52.

Tabulka 27 Moduly pružnosti nosníků [MPa]

Kombinace		Ref.	RPF			Ref.	PUR		
			1.c.	2.c.	3.c.		1.c.	2.c.	3.c.
Buk	Průměr	16578	19009	16408	16751	14752	16817	14652	14810
	Sm. odch.	1028	1071	395	1072	917	1249	375	893
Olše	Průměr	10600	12273	10661	10579	9508	11152	9827	10178
	Sm. odch.	355	1965	434	688	924	1965	925	662
Smrk	Průměr	14622	15760	15315	14663	10401	14321	13267	13783
	Sm. odch.	416	1175	1218	742	1040	958	2072	1521
K1	Průměr	13238	15174	12649	12959	13454	13284	13041	14608
	Sm. odch.	351	968	821	363	1482	1462	1190	796
K2	Průměr	15302	17590	15586	15410	14818	15437	14075	15137
	Sm. odch.	664	1176	652	351	893	828	952	926
K3	Průměr	15439	16836	15239	15532	15229	14617	14585	14343
	Sm. odch.	1221	1181	766	637	445	811	1029	956
K4	Průměr	16696	18825	17043	16692	14442	14872	13352	15802
	Sm. odch.	888	468	1111	645	832	1229	1196	950
K5	Průměr	16911	19258	17343	17216	15705	14979	14245	15593
	Sm. odch.	1155	1125	311	556	1131	1103	802	827

Z tabulky a grafu je patrné, že cyklická změna teploty má vliv na modul pružnosti nosníků lepených PUR adhesivem zejména u homogenních kombinací (BK, SM, OL), kde je patrný rapidní nárůst modulu pružnosti po prvním teplotním cyklu. Tento trend si zachovávají i kombinace lepené RPF adhesivem. Poměr změny modulu pružnosti ukazuje tabulka 27, kde je procentuální vyjádření průměrné změny modulu pružnosti vztažené k průměrným hodnotám referenčních nosníků (20 °C, 65 % RH).



Obr. 52 Modul pružnosti nosníků

Tabulka 28 Poměrná změna MOE v %

RPF	Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Ref a 1.c.	12,8	13,6	7,2	12,8	13,0	8,3	11,3	12,2
Ref a 2.c.	-1,0	0,6	4,5	-4,7	1,8	-1,3	2,0	2,5
Ref a 3.c.	1,0	-0,2	0,3	-2,2	0,7	0,6	0,0	1,8
PUR	Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Ref a 1.c.	12,3	14,7	27,4	-1,3	4,0	-4,2	2,9	-4,8
Ref a 2.c.	-0,7	3,2	21,6	-3,2	-5,3	-4,4	-8,2	-10,2
Ref a 3.c.	0,4	6,6	24,5	7,9	2,1	-6,2	8,6	-0,7

Z obrázku 48 a tabulky 28 je rovněž patrný vyšší modul pružnosti u nosníků lepených pomocí RPF adhesiva, zatímco nosníky lepené PUR adhesivem vykazují nižší hodnoty. Porovnání průměrných hodnot modulu pružnosti mezi lepidly je uveden v tabulce 29, přičemž platí, že pokud je rozdíl kladný, nabývají vyššího modulu pružnosti nosníky lepené PUR adhesivem, v případě záporného poměru mají vyšší modul pružnosti nosníky lepené RPF lepidlem.

Tabulka 29 Porovnání modulu pružnosti nosníků mezi lepidly v %

PUR×RPF	Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Reference	-12,4	-11,5	-40,6	1,6	-3,3	-1,4	-15,6	-7,7
1. cyklus	-13,0	-10,0	-10,1	-14,2	-13,9	-15,2	-26,6	-28,6
2. cyklus	-12,0	-8,5	-15,4	3,0	-10,7	-4,5	-27,6	-21,7
3. cyklus	-13,1	-3,9	-6,4	11,3	-1,8	-8,3	-5,6	-10,4

Pro potvrzení rozdílů byla provedena analýza rozptylů (ANOVA), jejíž výsledky jsou uvedeny v tabulce 30.

Tabulka 30 ANOVA modulu pružnosti nosníků

	DF	SS	MS	F	p
Průsečík	1	6,89E+10	6,89E+10	54631,12	0,000
Kombinace	7	1,05E+09	1,50E+08	118,87	0,000
Cyklus	3	1,08E+08	3,59E+07	28,46	0,000
Lepidlo	1	1,88E+08	1,88E+08	149,12	0,000
Kombinace × Cyklus	21	3,90E+07	1,86E+06	1,47	0,087
Kombinace × Lepidlo	7	6,41E+07	9,16E+06	7,26	0,000
Cyklus × Lepidlo	3	3,00E+07	1,00E+07	7,94	0,000
Kombinace × Cyklus × Lepidlo	21	4,47E+07	2,13E+06	1,69	0,033
Chyba	256	3,23E+08	1,26E+06		

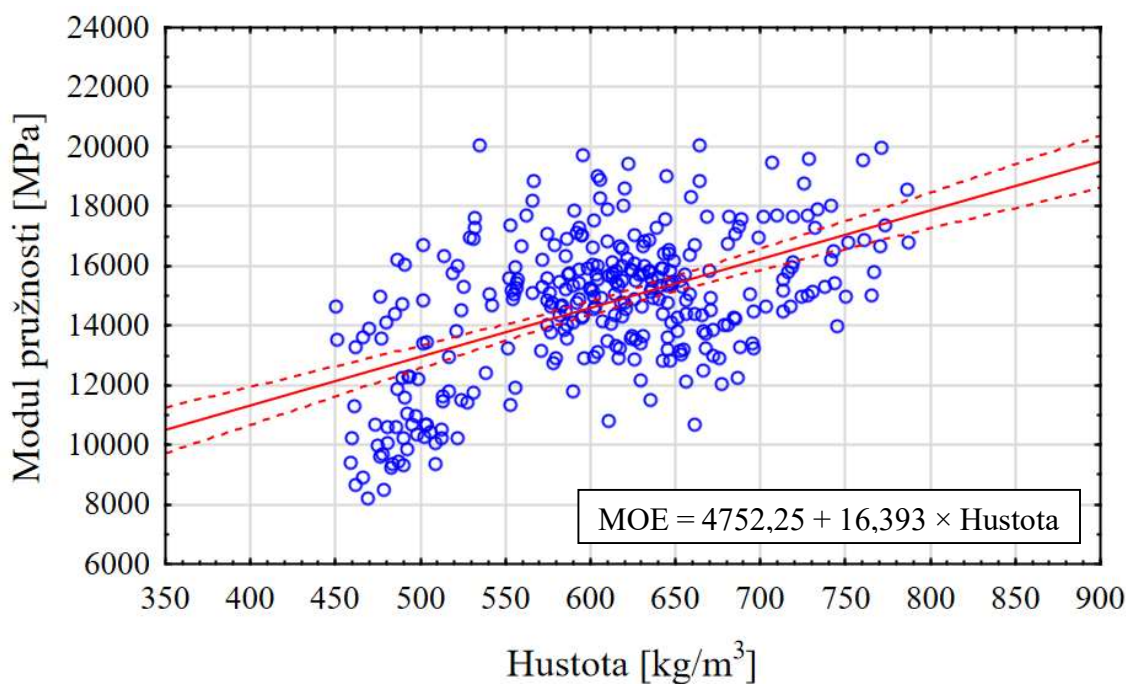
kde DF jsou stupně volnosti, SS je suma čtverců, MS jsou průměry čtverců.

Z tabulky 30 je patrné, že největší vliv má faktor použitého lepidla, který se projevuje zejména u homogenní kombinace smrku (viz tab. 29). Z analýzy rozptylů dále vyplývá, že i mezi kombinacemi jsou významné rozdíly, nicméně to je z hlediska kombinace dřevin žádaný výsledek. Taktéž mezi cykly teplotního namáhání existují značné rozdíly, nicméně síla tohoto faktoru je v porovnání se silou faktoru lepidla a kombinace nízký. Kombinace faktorů dřeviny a cyklického namáhání nevykazuje jako jediný faktor statisticky významné rozdíly, což se odráží ve velmi podobném trendu změny modulu pružnosti v rámci stejných kombinací dřevin vlivem teplotního namáhání. Nicméně, při uvážení působení všech faktorů je zřejmé, že existují významné rozdíly.

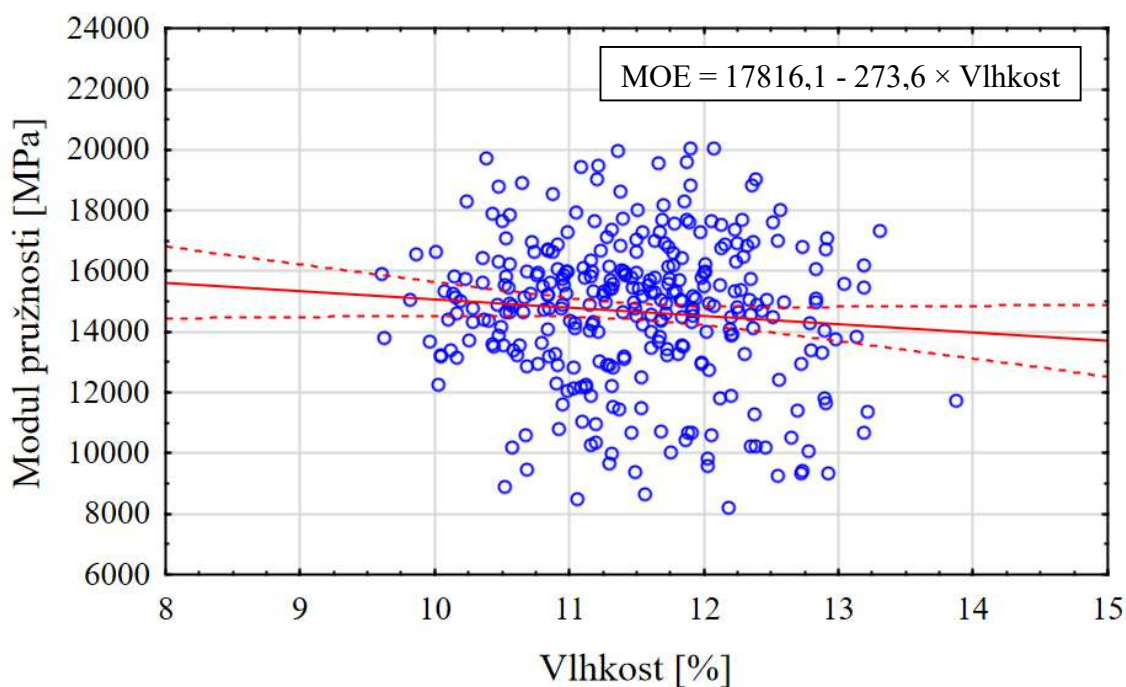
Pro detailnější zjištění významnosti rozdílů faktorů byl proveden i Tukeyho test, který je pro velikost tabulek uveden v přílohách 3 a 12–15. Rovněž byla provedena korelace pro ověření vlivu hustoty a vlhkosti na velikost modulu pružnosti. Výsledek je uveden v tabulce 31 a na obr. 53 a 54.

Tabulka 31 Korelace mezi modulem pružnosti, hustotou a vlhkostí

	Hustota	Vlhkost
Modul pružnosti	$r = 0,529$ $r^2 = 0,280$ $p = 0,002$	$r = -0,091$ $r^2 = 0,008$ $p = 0,106$



Obr. 53 Korelace mezi modulem pružnosti nosníků a hustotou



Obr. 54 Korelace mezi modulem pružnosti nosníků a vlhkostí

Z tabulky 31 a obrázků 53 a 54 je patrné, že modul pružnosti středně koreluje s hustotou, zatímco s vlhkostí koreluje jen velmi slabě. Názvosloví síly korelace bylo použito dle Evanse (1996), kdy se hodnota Pearsonova korelačního koeficientu pro střední korelaci pohybuje mezi 0,4 - 0,59 a pro velmi slabou korelaci mezi 0 - 0,19.

Výsledky korelace naznačují, že na velikost modulu pružnosti má vliv jen hustota a vlhkost nikoliv, avšak zde je třeba přihlídnout k metodice experimentu, kdy se netestoval vliv vlhkosti jako hlavní faktor, nýbrž jen pro ověření, zda v průběhu teplotních cyklů nedocházelo k přílišnému kolísání vlhkosti v nosnících. Z literatury je již dlouho dobře známo, že i obsah vlhkosti ve dřevě má vliv na velikost modulu pružnosti (Bodig a Jayne, 1982; Požgaj et al., 1997), avšak při rozdílu obsahu vlhkosti mezi cykly do 1% (viz tab. 24) je rozdíl natolik malý, že nevykazuje statistickou významnost.

Pro praktické porovnání modulů pružnosti mezi kombinacemi a cykly byly porovnány průměrné hodnoty modulu pružnosti oproti referenčním dřevinám (homogenní kombinace) rozdělené po jednotlivých cyklech (viz tab. 33).

Tabulka 32 Porovnání modulů pružnosti nosníků vztažených k referenční dřevině v %

RPF	Ref. ↓	Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Reference	BK	0,0	-56,4	-13,4	-25,2	-8,3	-7,4	0,7	2,0
	OL	36,1	0,0	27,5	19,9	30,7	31,3	36,5	37,3
	SM	11,8	-37,9	0,0	-10,5	4,4	5,3	12,4	13,5
1. Cyklus	BK	0,0	-54,9	-20,6	-25,3	-8,1	-12,9	-1,0	1,3
	OL	35,4	0,0	22,1	19,1	30,2	27,1	34,8	36,3
	SM	17,1	-28,4	0,0	-3,9	10,4	6,4	16,3	18,2
2. Cyklus	BK	0,0	-53,9	-7,1	-29,7	-5,3	-7,7	3,7	5,4
	OL	35,0	0,0	30,4	15,7	31,6	30,0	37,4	38,5
	SM	6,7	-43,7	0,0	-21,1	1,7	-0,5	10,1	11,7
3. Cyklus	BK	0,0	-58,3	-14,2	-29,3	-8,7	-7,9	-0,4	2,7
	OL	36,8	0,0	27,9	18,4	31,4	31,9	36,6	38,6
	SM	12,5	-38,6	0,0	-13,2	4,8	5,6	12,2	14,8
PUR		Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Reference	BK	0,0	-55,2	-41,8	-9,7	0,4	3,1	-2,1	6,1
	OL	35,5	0,0	8,6	29,3	35,8	37,6	34,2	39,5
	SM	29,5	-9,4	0,0	22,7	29,8	31,7	28,0	33,8
1. Cyklus	BK	0,0	-50,8	-17,4	-26,6	-8,9	-15,0	-13,1	-12,3
	OL	33,7	0,0	22,1	16,0	27,8	23,7	25,0	25,5
	SM	14,8	-28,4	0,0	-7,8	7,2	2,0	3,7	4,4
2. Cyklus	BK	0,0	-49,1	-10,4	-12,4	-4,1	-0,5	-9,7	-2,9
	OL	32,9	0,0	25,9	24,6	30,2	32,6	26,4	31,0
	SM	9,5	-35,0	0,0	-1,7	5,7	9,0	0,6	6,9
3. Cyklus	BK	0,0	-45,5	-7,5	-1,4	2,2	-3,3	6,3	5,0
	OL	31,3	0,0	26,2	30,3	32,8	29,0	35,6	34,7
	SM	6,9	-35,4	0,0	5,7	8,9	3,9	12,8	11,6



Z výše zmíněného vyplývá, že vliv teploty a jejího cyklického působení má vliv na modul pružnosti lepeného dřeva. Campean, et al., (2008) zjistili, že při mrazení dřeva dochází k poklesu modulu pružnosti smrkového dřeva o cca 1,3 % zatímco Szmotku et al. (2013) uvádí pokles o 2 % při rychlém zmrazení a 24 % při pomalém zmrazení. Na druhou stranu Gao, et al., (2015) uvádí, že při změně teploty z 20 °C na -40 °C dochází ke zvýšení statického modulu pružnosti o 36 %, zatímco u dynamického modulu pružnosti jen o 16,2 %. Podle Drakea, et al. (2015) dochází při poklesu teplot ke změně způsobů deformací, jelikož zjistili, že při teplotě -40 °C dochází častěji k selhání tahových vrstev lepeného lamelového dřeva, na rozdíl od selhání při 0 °C, kdy dochází častěji k selhání ve smyku. Zároveň však došlo ke zvýšení tuhosti a pevnosti ohýbaného nosníku.

Velkou roli ve změně modulu pružnosti, stejně jako i ostatních mechanických vlastností, hraje obsah vlhkosti ve dřevě. Jak uvádí Özkan (2021) u bukového dřeva s nulovou vlhkostí došlo při změně teplot z +20°C na -196 °C ke zvýšení statického modulu pružnosti o 24,17 %, zatímco u dřeva s obsahem vlhkosti 12% došlo ke zvýšení modulu pružnosti o 34,79 %. Jak uvádí Green a Evans (2003), při zvyšování teplot dochází ke snižování modulu pružnosti, přičemž s nárůstem teploty o 10 °C dochází k poklesu modulu pružnosti o cca 2 %. Jejich závěry potvrzuje i Sviták, et al. (2014). S rostoucí teplotou dochází také ke snižování adheze k adherentu snižováním vnitřní koheze lepidla a přechodem lepidla přes teplotu skelného přechodu ( $T_g$ ), kdy se mění mezimolekulární síly (Richter a Steiger, 2005; Richter et al., 2006; Clauß et al., 2011a).

Taktéž cyklické působení teplot má vliv na vlastnosti dřeva. Jak zjistili Yang, et al. (2021), že při cyklickém vystavení modřínového a borového dřeva změnám teplot dochází ke snižování modulu pružnosti (cca 4 %, 12 %, 10%) ve třech cyklech mrazení a ohřevu. Takto velké změny však korespondují s výsledky výše jen u homogenních kombinací z jednoho druhu dřeva a jen u prvního cyklu. Kombinace dřevin vykazují v tomto ohledu mnohem menší změnu modulu pružnosti. Velký vliv má však na ohybové vlastnosti lepeného dřeva, přičemž vliv je větší při použití dřevin s menší hustotou. Zatímco u dřevin s vyšší hustotou je více ovlivněna smyková pevnost.

Další faktor, který silně ovlivňuje ohybové vlastnosti lepeného lamelového dřeva je kombinace dřevin, resp. homogenní kombinace s různými pevnostními třídami. Jak zjistili Ehrhart et al. (2020), kteří testovali modul pružnosti na bukových nosnících lepených PUR lepidlem o různých pevnostních třídách. Z jejich výsledků vyplývá, že v případě homogenních nosníků (o stejné pevnostní třídě) dochází k nárůstu modulu pružnosti, přesněji mezi třídami GL40h, GL48h a GL 55h o 7,8 %, resp. 14,5 %.

Velký rozdíl nastává u jejich kombinací tvořených bukem, avšak o odlišných pevnostních třídách vnitřních lamel, kdy pro vnější lamely použili pevnostní třídu o 11, resp. 20 stupňů lepší než ve středových lamelách. Výsledkem je nárůst modulu pružnosti o 1,4 resp. 1,3 %.

Taktéž Dewi a Soehardjono (2018) testovali kombinované lepené nosníky ze dřeva Sengonu (*Albizia falcatara* Miq.) a kokosovníku (*Cocos nucifera* L.), přičemž při použití hustější dřeviny do vnějších lamel došlo ke zvýšení modulu pružnosti v ohybu o 28 % oproti homogenní kombinaci ze Sengonu. Ke stejnému výsledku dospěli i Šuhajdová et al. (2023), kteří měřili modul pružnosti u kombinovaného lepeného lamelového dřeva z buku a topolu lepeného PUR lepidlem. Z jejich práce je patrné, že při použití topolu (třída pevnosti D18) do středových lamel a buku (D40) do vnějších dojde k poklesu modulu pružnosti o -0,8 % oproti homogennímu nosníku z buku, avšak již neuvádějí porovnání s homogenní kombinací topolu. Testovali však jednotlivé lamely buku a topolu, přičemž bukové lamely dosahovaly o 32 % vyššího modulu pružnosti než topolové, z čehož i na základě výsledků výše lze vyvodit, že kombinace dřevin bude dosahovat vyššího modulu pružnosti než homogenní kombinace topolu.

Tak, jako Evropa hledá možnosti kombinací dřevin se smrkem a bukem, podobně i svět hledá alternativy. Například Aratake et al. (2011) testovali nosníky z kryptomerie japonské – obchodní název Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) a kombinaci s douglaskou (*Pseudotsuga menziesii* Franco). Kombinované symetrické nosníky z obou dřevin vykazovaly průměrné zvýšení modulu pružnosti o 34,9 % oproti homogennímu nosníku z japonského cedru, což odpovídá nárůstu modulu pružnosti u kombinace olše s bukem (K2), kdy oproti olši došlo k zvýšení modulu pružnosti o 45,7 %.

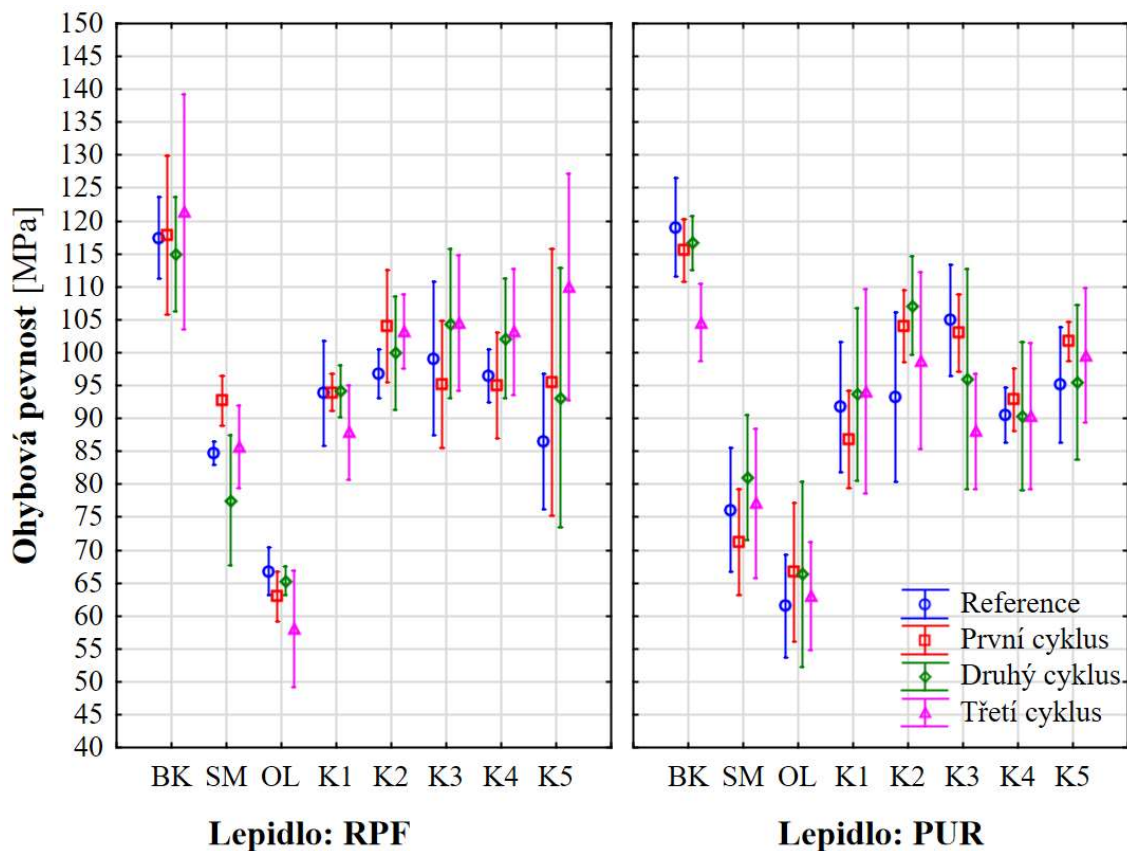
Stejně tak, při porovnání symetrických kombinací zjistili Ngadianto et al., (2023) stejný trend. Jejich lepené nosníky z tropických dřevin (*Acacia mangium* Willd., *Maesopsis eminii* Engl., a *Melia azedarach* L.) slepené v podobné konfiguraci jako K2 a K5 vykazovaly zvýšení modulu pružnosti přidáním pevnější dřeviny do vnějších lamel o 17,2 %, respektive 21,6 %. Z těchto výsledků je patrné, že za zvýšením hodnoty modulu pružnosti stojí nejen uspořádání lamel v nosníku, ale rovněž i použité dřeviny, přičemž platí, že čím větší rozdíl mezi vnějšími vrstvami a vnitřními, tím je rozdíl v hodnotách modulu pružnosti vyšší.

### 5.3. Ohybová pevnost

Další zjišťovanou vlastností je ohybová pevnost nosníků (MOR). Výsledky experimentálního měření jsou uvedeny v tabulce 33 a na obr. 55.

Tabulka 33 Ohybová pevnost nosníků [MPa]

Kombinace		RPF Cyklus				PUR Cyklus			
		Ref.	1.c.	2.c.	3.c.	Ref.	1.c.	2.c.	3.c.
Buk	Průměr	117,43	117,81	114,91	121,31	119,03	115,57	116,66	104,56
	Sm. odch.	4,41	8,66	6,24	12,86	5,42	3,43	2,92	4,26
Olše	Průměr	66,71	62,98	65,34	57,99	61,51	66,62	66,38	63,00
	Sm. odch.	2,62	7,61	1,55	6,36	5,64	7,61	10,15	5,93
Smrk	Průměr	84,70	92,70	77,50	85,67	76,07	71,24	81,04	77,15
	Sm. odch.	1,31	2,70	7,12	4,57	6,77	5,33	6,87	8,17
K1	Průměr	93,82	93,90	94,13	87,86	91,73	86,75	93,65	94,09
	Sm. odch.	5,78	2,04	2,80	5,13	7,16	6,64	9,43	11,15
K2	Průměr	96,76	104,06	99,91	103,23	93,23	103,96	107,16	98,77
	Sm. odch.	2,65	6,15	6,16	4,05	9,25	3,95	5,37	9,70
K3	Průměr	99,05	95,16	104,39	104,48	104,90	102,99	95,93	88,03
	Sm. odch.	8,40	6,96	8,18	7,46	6,11	4,21	12,04	6,29
K4	Průměr	96,47	95,00	102,16	103,13	90,47	92,84	90,35	90,29
	Sm. odch.	2,87	5,75	6,58	6,93	2,99	3,39	8,10	7,97
K5	Průměr	86,50	95,45	93,13	109,97	95,09	101,71	95,53	99,57
	Sm. odch.	7,39	14,61	14,18	12,40	6,34	2,17	8,46	7,34



Obr. 55 Ohybová pevnost nosníků

Z tabulky 33 a obr. 55 je patrný vliv cyklického vystavení změně teploty zejména u homogenních kombinací lepených pomocí PRF i PUR adhesiva, zatímco větší rozptyl hodnot vykazují symetrické nehomogenní nosníky lepené pomocí RPF lepidla. Tyto změny mezi cykly jsou značné, přičemž rozdíly průměrných hodnot uvádí tabulka 34, kde jsou porovnávány průměrné hodnoty z jednotlivých cyklů vztažené k referenci.

Tabulka 34 Poměrná změna MOR v %

RPF	Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Ref a 1.c.	0,3	-5,9	8,6	0,1	7,0	-4,1	-1,5	9,4
Ref a 2.c.	-2,2	-2,1	-9,3	0,3	3,2	5,1	5,6	7,1
Ref a 3.c.	3,2	-15,0	1,1	-6,8	6,3	5,2	6,5	21,3
PUR	Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Ref a 1.c.	-3,0	7,7	-6,8	-5,7	10,3	-1,9	2,6	6,5
Ref a 2.c.	-2,0	7,3	6,1	2,0	13,0	-9,3	-0,1	0,5
Ref a 3.c.	-13,8	2,4	1,4	2,5	5,6	-19,2	-0,2	4,5

Z tabulky 34 je patrné, že RPF lepidlo je vhodnější pro lepení listnatých dřevin s vyšší hustotou, zatímco PUR adhesivum je vhodnější pro lepení listnatých dřevin s nižší hustotou. Pro jehličnaté dřeviny vykazují nosníky výkyvy ve zvýšení i snížení ohybové pevnosti, avšak nikoliv tak velké, jako v případě listnatých dřevin. Tento efekt se přenáší i na kombinace dřevin, kdy pro kombinace obsahující olši (K1 a K2) je výhodnější použití PUR adhesiva, zatímco u kombinací obsahující smrk (K4 a K5) dosahují vyšších průměrných hodnot ohybové pevnosti nosníky lepené pomocí RPF adhesiva.

Porovnání průměrných hodnot ohybové pevnosti mezi lepidly je uveden v tabulce 35, přičemž platí, že pokud je rozdíl kladný, nabývají vyšší ohybové pevnosti nosníky lepené PUR adhesivem, v případě záporného poměru mají vyšší ohybovou pevnost nosníky lepené RPF lepidlem.

Tabulka 35 Porovnání ohybové pevnosti nosníků mezi lepidly v %

PUR×RPF	Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Reference	1,34	-8,45	-11,34	-2,28	-3,80	5,57	-6,63	9,03
1. cyklus	-1,94	5,47	-30,12	-8,24	-0,09	7,60	-2,33	6,15
2. cyklus	1,50	1,56	4,37	-0,52	6,76	-8,82	-13,06	2,51
3. cyklus	-16,02	7,95	-11,04	6,62	-4,51	-18,68	-14,22	-10,45

Pro potvrzení rozdílů byla provedena analýza rozptylů (ANOVA), jejíž výsledky jsou uvedeny v tabulce 36.

Tabulka 36 ANOVA ohybové pevnosti nosníků

	DF	SS	MS	F	p
Průsečík	1	2774665,63	2774665,63	44819,26	0,00
Kombinace	7	66054,31	9436,33	152,43	0,00
Cyklus	3	130,38	43,46	0,70	0,55
Lepidlo	1	601,62	601,62	9,72	0,00
Kombinace × Cyklus	21	2154,78	102,61	1,66	0,04
Kombinace × Lepidlo	7	1121,59	160,23	2,59	0,01
Cyklus × Lepidlo	3	564,96	188,32	3,04	0,03
Kombinace × Cyklus × Lepidlo	21	3128,24	148,96	2,41	0,00
Chyba	256	15848	62		

kde DF jsou stupně volnosti, SS je suma čtverců, MS jsou průměry čtverců.

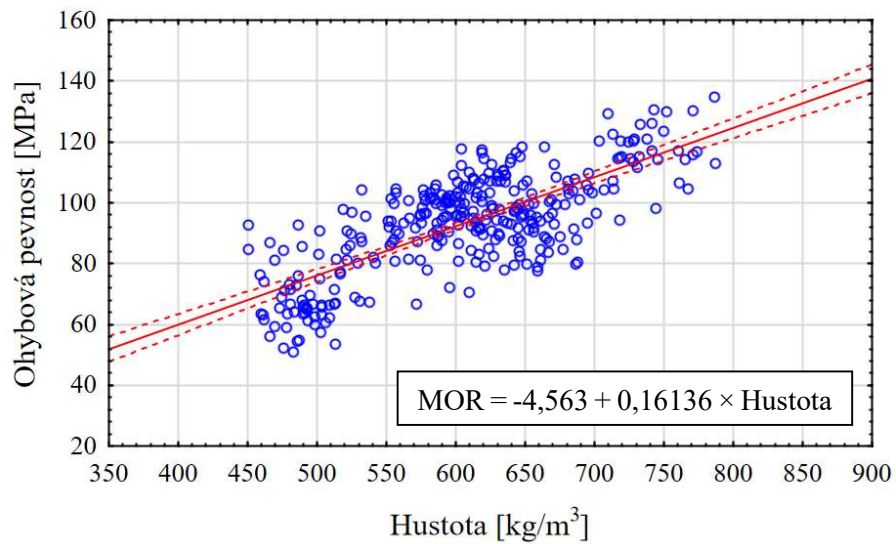
Z tabulky 36 je patrné, že všechny faktory mají statisticky významný vliv, s výjimkou samotného faktoru cyklické změny teploty. Ačkoliv jsou změny ohybové pevnosti v cyklech dle obr. 55 poměrně velké, samostatně se přibližují statistické významnosti, nicméně nedosahují takových rozdílů. Nejsilnějším faktorem je pak kombinace dřevin, která z podstaty anatomické struktury různých dřevin vykazuje největší variabilitu. Jiná situace panuje při kombinaci dvou faktorů. Zde jsou všechny faktory statisticky významné, nicméně jejich vliv na ohybovou pevnost již není tak silný, jako v případě samostatných faktorů lepidla a kombinace dřevin. Kombinace všech tří faktorů dohromady rovněž statisticky významně ovlivňuje ohybovou pevnost lepených nosníků.

Pro detailnější zjištění významnosti rozdílů faktorů byl proveden i Tukeyho test, který je pro velikost tabulek uveden v přílohách 3 a 16–19. Rovněž byla provedena korelace pro ověření vlivu hustoty, vlhkosti a modulu pružnosti na velikost ohybové pevnosti. Výsledek je uveden v tabulce 37 a na obr. 56–58.

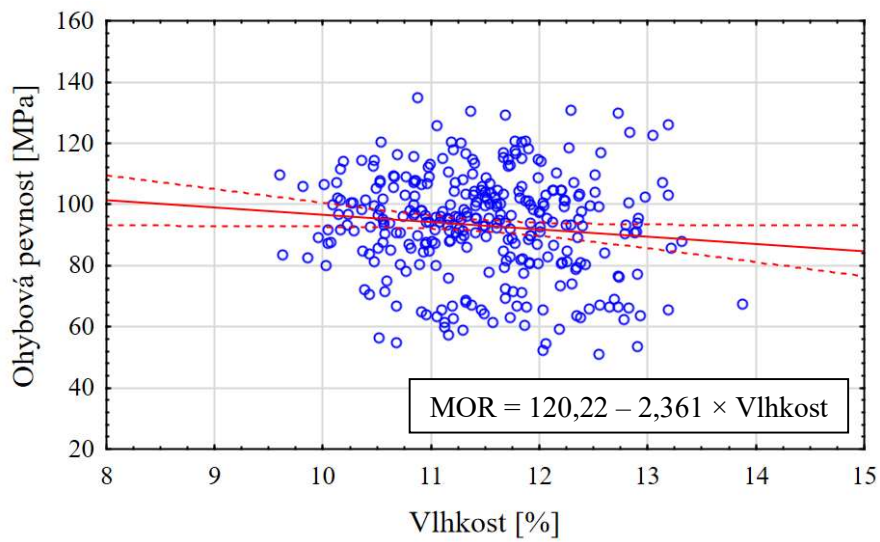
Tabulka 37 Korelace mezi ohybovou pevností, hustotou, vlhkostí a MOE

	Hustota	Vlhkost	MOE
Ohybová pevnost	$r = 0,748$ $r^2 = 0,559$ $p = 0,000$	$r = -0,112$ $r^2 = 0,013$ $p = 0,0449$	$r = 0,674$ $r^2 = 0,454$ $p = 0,000$

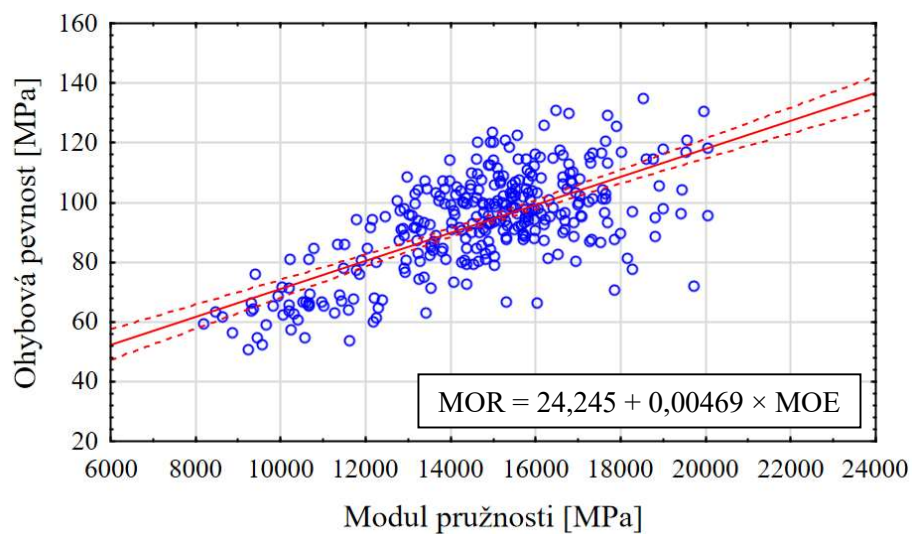
Z tabulky 36 a obr. 52-54 je pak zřejmé, že velikost ohybové pevnosti koreluje se všemi veličinami, přičemž při použití názvosloví dle Evanse (1996) koreluje hustota s ohybovou pevností silně, s vlhkostí koreluje ohybová pevnost záporně velmi slabě a s modulem pružnosti silně.



Obr. 56 Korelace mezi ohybovou pevností a hustotou



Obr. 57 Korelace mezi ohybovou pevností a vlhkostí



Obr. 58 Korelace mezi ohybovou pevností a modulem pružnosti

Výsledky korelací z obr. 56–58 a tabulky 37 naznačují podobný trend jako v případě modulu pružnosti, přičemž vlhkost je na hranici statistické významnosti. Zde je opět třeba přihlídnout k metodice experimentu, kde není změna vlhkosti hlavní sledovaný parametr, ale spíše jen jako ukazatel pro ověření změn v nosnících. Navíc při průměrné změně vlhkosti o 1 % mezi cykly (viz tab. 24) je velmi slabá korelace odpovídající. Korelace modulu pružnosti s ohybovou pevností vypovídá o silné závislosti obou proměnných, přičemž obě jsou silně závislé na hustotě nosníků. To potvrzují Sonderegger et al. (2008), kteří testovali závislost modulu pružnosti na smrkovém dřevě a Mihailović et al. (2022), kteří zjistili silnou kladnou korelaci mezi modulem pružnosti a ohybovou pevností bukového dřeva a to i při různých rychlostech zatěžování.

Pro praktické porovnání ohybové pevnosti mezi kombinacemi a cykly byly porovnány průměrné hodnoty ohybové pevnosti oproti referenčním dřevinám (homogenní kombinace) rozdělené po jednotlivých cyklech (viz tab. 38).

Tabulka 38 Porovnání ohybové pevnosti nosníků vztažených k referenční dřevině v %

RPF		Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Reference	BK	0,0	-76,0	-38,6	-25,2	-21,4	-18,6	-21,7	-35,8
	OL	43,2	0,0	21,2	28,9	31,1	32,7	30,8	22,9
	SM	27,9	-27,0	0,0	9,7	12,5	14,5	12,2	2,1
1. Cyklus	BK	0,0	-87,1	-27,1	-25,5	-13,2	-23,8	-24,0	-23,4
	OL	46,5	0,0	32,1	32,9	39,5	33,8	33,7	34,0
	SM	21,3	-47,2	0,0	1,3	10,9	2,6	2,4	2,9
2. Cyklus	BK	0,0	-75,9	-48,3	-22,1	-15,0	-10,1	-12,5	-23,4
	OL	43,1	0,0	15,7	30,6	34,6	37,4	36,0	29,8
	SM	32,6	-18,6	0,0	17,7	22,4	25,8	24,1	16,8
3. Cyklus	BK	0,0	-109,2	-41,6	-38,1	-17,5	-16,1	-17,6	-10,3
	OL	52,2	0,0	32,3	34,0	43,8	44,5	43,8	47,3
	SM	29,4	-47,7	0,0	2,5	17,0	18,0	16,9	22,1
PUR		Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Reference	BK	0,0	-93,5	-56,5	-29,8	-27,7	-13,5	-31,6	-25,2
	OL	48,3	0,0	19,1	32,9	34,0	41,4	32,0	35,3
	SM	36,1	-23,7	0,0	17,1	18,4	27,5	15,9	20,0
1. Cyklus	BK	0,0	-73,5	-62,2	-33,2	-11,2	-12,2	-24,5	-13,6
	OL	42,4	0,0	6,5	23,2	35,9	35,3	28,2	34,5
	SM	38,4	-6,9	0,0	17,9	31,5	30,8	23,3	30,0
2. Cyklus	BK	0,0	-75,8	-44,0	-24,6	-8,9	-21,6	-29,1	-22,1
	OL	43,1	0,0	18,1	29,1	38,1	30,8	26,5	30,5
	SM	30,5	-22,1	0,0	13,5	24,4	15,5	10,3	15,2
3. Cyklus	BK	0,0	-66,0	-35,5	-11,1	-5,9	-18,8	-15,8	-5,0
	OL	39,7	0,0	18,3	33,0	36,2	28,4	30,2	36,7
	SM	26,2	-22,5	0,0	18,0	21,9	12,4	14,5	22,5

Ohybovou pevnost dřeva ovlivňuje řada faktorů, jak tvrdí Hernández, et al. (2014), zejména obsah vlhkosti ve dřevě a hustota. Své tvrzení dokládají otestováním smrkového a jedlového dřeva při různých teplotách. Výsledkem jejich experimentu je, že při vzrůstající teplotě od -30 °C do 20 °C dochází k průměrnému snížení MOR o 7,24 % u jádrového a 14,45 % u bělového dřeva při přírůstu teploty o 10 °C. Rozdíl mezi bělí a jádrem však není statisticky významný pro praktické použití. K podobnému závěru došli i Zhao et al. (2015).

Na druhou stranu Campean, et al. (2008), tvrdí, že při zmrazení dochází ke snížení pevnosti v ohybu až o 6 %. Jejich tvrzení potvrzují i Szmotku, et al. (2013), kteří zjistili, že dochází k poklesu pevnosti v ohybu při rychlém mrazení (-10 °C/h) o 4 %, zatímco při pomalém (-1 °C/h) o 24 %. Taktéž Liu, et al., (2015) došli k závěru, že při úpravě dřeva mrazením dochází ke snížení ohybové pevnosti o 7,34 % a 10,83 % při předmrazení na -20 °C, respektive -40 °C. Možné vysvětlení snížení pevnosti v ohybu lze nalézt v mikrostruktuře dřeva. Poklesem pevnosti hemicelulóz a celulózy a vlivem tlaku ledu vzniklého při mrazení vody sice dochází ke ztužování buněčné stěny, což má za následek zvýšení MOE, ale rovněž může vést k porušení H-vazeb na rozhraní voda/led, což ve výsledku může vést ke vzniku mikrotrhlin v buněčné stěně, a tedy celkovému snížení ohybové pevnosti (Szmotku et al., 2013; Liu et al., 2015; Missio et al., 2016).

Při cyklickém vystavení teplotám navíc dochází, stejně jako u modulu pružnosti, ke snižování ohybové pevnosti. Yang, et al. (2021) testovali nosníky ve třech cyklech ohřevu a mrazení (-20 °C), přičemž u modřínu nastal průměrný pokles ohybové pevnosti o přibližně 14 % (6,29 %, 25,92 %, 10,35 %), zatímco u borovice průměrně o přibližně 16 % (26,56 %, 16,11 %, 5,45 %).

Porovnáním adhesiv dochází k zajímavému zjištění, kdy větších rozptylů je dosaženo v případě RPF adhesiva. Nicméně, celkově je ohybová pevnost nosníků lepených RPF vyšší než v případě nosníků lepených PUR adhesivem. Tento efekt může být způsoben faktem, že většina lepidel je primárně určena na lepení jehličnatého dřeva, což může v případě lepení listnatých dřevin způsobovat problémy, zejména vlivem obsahu extraktiv ve dřevě (tríslovin a taninů). To potvrzuje i Purba et al., (2022), kteří lepili kombinované lepené lamelové dřevo z dubu a pomocí MUF a PUR adhesiva, přičemž smyková pevnost dubových nosníků dosahovala vyšší pevnosti, ale zároveň mnohem většího rozptylu než kombinace.



Taktéž Tran et al. (2016) testovali lepené nosníky z dubu a buku lepených MUF adhesivem, kde zjišťovali i vliv délkově napojovaných lamel a vliv počtu vrstev. Zjistili, že v případě homogenních dubových nosníků vychází ohybová pevnost o 14 % nižší než v případě homogenních bukových nosníků. Zde se opět potvrzuje vliv dřeviny, její anatomické struktury a mechanických vlastností.

V případě kombinací dřevin hraje velkou roli i příčný průřez nosníku. Balász et al., (2020), kteří kombinovali jehličnaté a listnaté dřeviny o pevnostních třídách C16 a D30 zjistili, že se zvětšujícím se průřezem nosníku dochází k většímu nárůstu ohybové pevnosti a tuhosti nosníku v případě kombinovaného dřeva s vnějšími lamelami z pevnější dřeviny, než pokud je použit homogenní nosník. Nicméně, se vzrůstajícím průřezem se přínos této kombinace zmenšuje a největší nárůst ohybové pevnosti je v případě malých průřezů. To potvrzují i výsledky ohybové pevnosti nosníků uvedených v této práci, kdy nárůst ohybové pevnosti mezi homogenním smrkovým nosníkem a kombinací K5 (vnější lamely bukové a vnitřní smrkové) dosáhl zvýšení ohybové pevnosti o 14,8 % při použití RPF adhesiva a 11,6 % při použití PUR.

Taktéž Rescalvo et al., (2020), kteří měřili ohybovou pevnost kombinací topolu a borovice, přičemž při použití kombinací s pevnostními třídami T8 (topol) a T24 (borovice) zjistili, že došlo k nárůstu ohybové pevnosti o 41,1 % vůči čistě topolovému glulamu. Podobně při zvýšení pevnostní třídy borovice na T30 došlo ke zvýšení ohybové pevnosti o 29,5 %.

Ke stejnému zjištění došli i Ndong Bidzo et al. (2022), kteří testovali lepené dřevo z tropického Niove (*Staustia kamernesis*, Ni) a Oziga (*Dacryodes buettneri*, Oz). V případě nesymetrických kombinací (duo) došlo k nárůstu ohybové pevnosti oproti méně pevné dřevině (Ozigo) o 9 % při použití Niove ve spodní lamelě. A v případě symetrických kombinací (trio) došlo k nárůstu o 35,4 % při použití Niove ve vnějších lamelách. Stejně jako v případě těchto tropických dřevin, tak i u běžně používaných dřevin dochází k navýšení ohybové pevnosti.

#### **5.4. Analytický model**

Výsledky analytického modelu jsou uvedeny v Tab. 39, která obsahuje výsledky výpočtu umístění neutrální osy nosníků a porovnání odhadovaného modulu pružnosti nosníků s reálně změřenou velikostí modulu pružnosti pro nosníky lepené RPF a PUR adhesivem.

Tabulka 39 Analytický model pozice neutrální osy ( $y_n$ ) a modulu pružnosti

		Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
$y_n$	[mm]	30.7	31.4	30.5	40	32.5	31.1	39.3	29.9
RPF		Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Předpokládaný MOE	[GPa]	15.2	10.9	14	11.4	15.7	14.2	14.2	14.4
Změřený MOE	[GPa]	16.1	10	14.3	12.7	15	14.8	15.6	16.5
Rozdíl	[%]	-5.6	9	-2.3	-10.8	4.9	-4.3	-9.6	-14.4
PUR		Buk	Olše	Smrk	K1	K2	K3	K4	K5
Předpokládaný MOE	[GPa]	15.1	10.7	14.3	13.4	15.5	15.1	14.7	15.1
Změřený MOE	[GPa]	14.8	10.2	13.8	14.6	15.2	14.3	15.8	15.6
Rozdíl	[%]	2.7	6.9	1.5	-27.9	3.5	-1.1	-11.3	-8.3

Prvním výsledkem je zjištění umístění neutrální osy v lepeném nosníku ( $y_n$ ). Pro symetrické nosníky je výsledek shodný se všeobecnou teorií pružnosti, a to, že neutrální osa se nachází ve středu výšky ohýbaného nosníku (30 mm). Rozdíl je nepatrný, do 1,5 mm. Pro symetrické nehomogenní nosníky, jakými jsou kombinace K2 a K5 by dle teorie měla být neutrální osa rovněž umístěna ve středu nosníku. Zde dochází k zajímavému efektu, kdy v případě K2, v jehož středových vrstvách je použita olše, je patrné mírné nadhodnocení, zatímco u kombinace K5, kde jsou středové vrstvy tvořeny smrkem, dochází k mírnému podhodnocování. V obou případech rozdíl nepřesáhne 3 mm, což při výšce nosníku 60 mm tvoří odchylku do 5 %. V případě nehomogenního symetrického nosníku s kombinovanými středovými lamelami (K3) byl pro hodnoty výpočtu použit průměr z obou dřevin a výsledek odpovídá teorii se stejnou odchylkou jako v případě K2 a K5. Pro nesymetrické nosníky, jakými jsou K1 (Buk + Olše) a K4 (Buk + Smrk) je znatelné posunutí neutrální osy směrem k tlakové zóně. Tento fakt je přičítán použití dřevin s nižším modulem pružnosti, než je buk. Olše má navíc oproti smrku nižší MOE zhruba o 20 %, což vychyluje neutrální osu ještě více k tlakové zóně.

Zajímavým efektem, který při ohýbání nastává je tzv. posunutí neutrální osy. Shim et al. (2009) predikovali a následně experimentálně ověřovali umístění neutrální osy a predikci modulu pružnosti na základě Metody transformovaného řezu (Transformed Section Method). Pomocí ní testovali homogenní nosník z lepeného borovicového dřeva lepeného rezorcinolovým lepidlem, jehož průměrný modul pružnosti byl 8,6 MPa a odhadovaný 11,4 MPa, což odpovídá 25% nadhodnocení odhadu, než je skutečnost.

V případě kombinace dřevin (borovice a modřín) byl predikováno MOE 11,7 MPa, přičemž reálný modul pružnosti byl 10 MPa (14 % rozdíl). V případě umístění neutrální osy se dle jimi použité metody liší umístění neutrální osy od středu nosníku u homogenního nosníku z borovice průměrně o 1,5 mm. U homogenních kombinací nosníků v této práci je pak průměrná odchylka od středu nosníku 0,9 mm.

V případě kombinovaného symetrického glulamu zjistili Shim et al. (2009) odchylku neutrální osy průměrně o 0,9 mm oproti reálnému měření, zatímco kombinace uvedené v této práci (K2, K3 a K5) vykazují 1,2 mm. Z jejich výsledků je proto, i přes použití jiné metody, možné vyčíst analogii. Předpokládaný modul pružnosti je vyšší než reálná hodnota. Taktéž, homogenní nosníky vykazují vyšší odchylky od reálných hodnot než kombinace dřevin. Výjimku v tomto případě tvoří kombinace K5, která při použití RPF adhesiva vykazovala při otestování vyšší pevnost než homogenní bukový nosník.

Na druhou stranu, Rescalvo et al., (2020) odhadovali modul pružnosti u lepeného homogenního i kombinovaného dřeva topolu a borovice s využitím věty o paralelních osách (parallel axes theorem). Z jejich zjištění vyplývá, že vypočtený modul pružnosti pro homogenní glulam z topolu pevnostní třídy GL20h (lamely T10) je o 7 % nižší než výsledky měření reálných nosníků. V případě nosníků uvedených v této práci je nejnižší pevnostní třída u olše, GL22h (lamely T12), která však vykazuje o + 9 % vyšší rozdíl, oproti naměřeným hodnotám. Obdobně u druhé dřeviny, borovice (GL32h – lamely T24), Rescalvo et al., (2020) zjistili rozdíl o - 6,6 % nižší, oproti naměřené hodnotě. Analogicky, v našem případě smrk (GL32h – lamely T26) vykazuje nepatrně nižší hodnoty (rozdíl - 2,3 %), než u naměřených hodnot. Tyto rozdíly jasně ukazují na homogennější strukturu jehličnatých dřevin, kdy listnaté dřeviny, zejména méně husté vykazují větší proměnlivost, a tudíž i větší náročnost na zjištění přesného modelu.

Zajímavý efekt však nastává u kombinace dřevin. Rescalvo et al., (2020) použili kombinaci jehličnaté a listnaté dřeviny (borovice a topol), přičemž borovice je ve vnějších vrstvách. V našem případě byly použity dvě symetrické nehomogenní kombinace (K2 – buk a olše, K5 – buk a smrk), kdy v obou případech byly vnější lamely tvořené bukem. V kombinaci K5 lepené RPF adhesivem byl v našem případě rozdíl predikované od naměřené hodnoty - 14,4 %, zatímco Rescalvo et al., (2020) uvádí pokles o - 9,9 %, což je znatelný rozdíl, avšak porovnáním s výsledky odhadu pro PUR je rozdíl jen -8,3 %, což odpovídá jejich výsledkům. Rozdíl nastává v kombinaci K2, která je celá tvořená listnatými druhy, kdy rozdíl dosahuje + 4,9 %.

Třetí a rozhodně ne poslední metodou je zdokonalená metoda nosníku s konstantním průřezem (method of improved beam constant section). Tuto metodu použili Cheng a Hu, (2011), kteří testovali topolové glulamy, na nichž odhadovali umístění neutrální osy a modul pružnosti lepeného homogenního symetrického nosníku. Výsledkem jejich práce je, že v případě nevyztužených nosníků lepených pomocí MDI se liší umístění neutrální osy od osy nosníku průměrně o 0,9 %, nejvíce pak 4 %. Tento rozdíl koresponduje s výsledky nosníků uvedených v této práci, kdy největší rozdíly v homogenních kombinacích dosahují 1,4 %. Taktéž, jejich odhad modulu pružnosti vykazuje mírné odchylení od reálné hodnoty, průměrně o 1,7 %. V porovnání s nosníky lepenými RPF lepidlem, které dosahují odchylky průměrně 5,6 % (max. 9 %) a u nosníků lepených PUR lepidlem je tato průměrná odchylka nižší (3,7 %).

### 5.5. Numerický model

Výsledkem numerického modelu je model, který popisuje chování lepeného lamelového dřeva. Výsledek této metody je znázorněn v Tab. 40. Modelovaný problém se nachází v oblasti lineárních deformací. Výsledkem je proto velikost napětí, které se v nosníku vyskytuje, reprezentovaná napětím podle Von Misesse, dále posunutí, které se porovnává s hodnotami  $w_2$ .

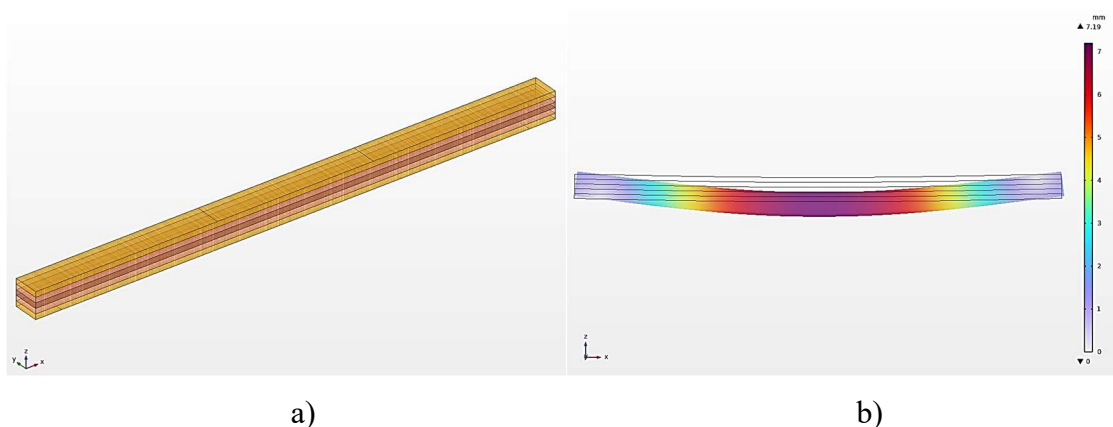
Tabulka 40 Výsledky numerického modelu

	Naměřené hodnoty		Modelované hodnoty		Rozdíl		$F_m$ (5120 N)		Tuhost $K$	
	$F_2$	$w_2$	$w_{p2}$ při $F_2$	$(w_{p2}-w_2)$	$(w_{p2}-w_2)$	$w_{pm}$ při $F_m$	reálná	modelovaná		
	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[N/mm]	[N/mm]		
Buk	10.2	12.2	13.3	1.1	8.3	6.7	838.7	769.6		
Smrk	6.2	8.3	9.1	0.7	8.2	7.4	750.5	689.3		
Olše	4.9	9.4	10.3	0.9	8.9	10.7	526.3	479.8		
K1	7.4	11.2	12.3	1.1	8.8	8.5	661.3	603.1		
K2	7.7	9.7	10.8	1.1	10.4	7.2	794.7	711.7		
K3	8.5	11	12.0	1	8.6	7.2	778.1	711.1		
K4	8.2	10.1	11.3	1.2	10.4	7	812.8	728.6		
K5	8.8	10.2	11.7	1.6	13.4	6.8	869.1	752.9		
Průměr	7.7	10.3	11.3	1.1	9.6	7.7	754	680.8		

kde  $F_2$  je 40 % z  $F_{max}$  [N],  $w_2$  je průhyb při  $F_2$  [mm],  $w_{p2}$  je modelovaná hodnota průhybu při  $F_2$  [mm],  $F_m$  je zatěžovací síla modelu (5120 N pro všechny kombinace) [N],  $w_{pm}$  je modelovaná hodnota průhybu při  $F_m$  [mm].

Z tabulky 40 je patrné, že největší průhyb ( $w_{pm}$ ) při zatížení pomocí  $F_m$  nastává u olše (10,7 mm), zatímco nejmenší u buku (6,7 mm). Smrk se nachází přibližně v polovině tohoto intervalu. Kombinace dřevin vykazují navzájem velmi podobnou charakteristiku. Kombinace, ve kterých je zastoupena olše (K1, K2 a K3) vykazují značné snížení průhybu, pokud se olšové dřevo skombinuje s bukem. Rozdíly nastávají v uspořádání jednotlivých lamel ve zkoumaných kombinacích. Zde se zásadně potvrzuje že symetrické uspořádání (K2 a K3 – buk ve vnějších lamelách, olše ve vnitřních, viz obr. 59) má v zásadě lepší charakteristiku, než asymetrické uspořádání (K1). Tento efekt si lze vysvětlit působením vnitřních sil v zatěžovaném nosníku. Při symetrickém uspořádání je velikost tlakových a tahových napětí vystavena dřevu s vyšším modulem pružnosti, v tomto případě buku, které lépe odolává namáhání.

Zatímco v případě asymetrické kombinace K1 dochází při působení stejného zatížení k tvorbě elastických deformací dřívě, zejména v tlakové zóně lepeného nosníku. U kombinací, ve kterých je obsažen smrk (K3, K4 a K5) dochází stejně jako u olše ke snížení průhybu, vlivem přítomnosti bukových lamel. Smrkové dřevo má však naproti olši vyšší modul pružnosti, a tak nepůsobí tak velký rozdíl v materiálových vlastnostech jako buk  $\times$  olše. Rovněž, tlaková pevnost smrku může dosahovat až spodní hranice hodnot měřených u buku. Z těchto důvodů proto došlo ke snížení průhybu, ačkoliv rozdíly nebyly tolik markantní.



Obr. 59 Model nosníku a) kombinace K3 b) průhyb kombinace K3

Druhou částí výsledků numerického modelu je modelování zatížení pomocí reálných hodnot zatížení ( $F_2$ ) a jejich hodnot průhybu ( $w_{p2}$ ). Zde je patrné, že kombinace dřevin, které vykazují podobnou zatěžovací sílu mají i podobnou velikost průhybu. Naproti tomu modelované varianty vykazují podobný trend, avšak větší rozptyl hodnot.

Kombinace K2 vykazuje v obou případech nejnižší průhyb a kombinace K1 nejvyšší. U homogenních nosníků je porovnání složitější. U olše je zatěžovací síla nejnižší a oproti buku poloviční. I tak ale hodnota průhybu dosahuje dvou třetin hodnot buku. Pokud by měla být olše zatížena stejnou zatěžovací silou jako buk, pak by se již měřené nosníky nacházely v oblasti plastických deformací, či by u nich došlo k překročení meze pevnosti. Smrk naproti olši byl zatěžován vyšší silou, ale dosáhl menšího průhybu než olše.

Důležitý poznatek přináší porovnání reálných hodnot ( $w_2$ ) a modelových hodnot ( $w_{p2}$ ). Z tabulky je patrné, že všechny modelované kombinace vykazují vyšší průhyb, než jak byly změřeny na reálných nosnících. Průměrná odchylka od reálných hodnot průhybu činí 1,1 mm, což odpovídá průměrně 9,6 %. V tomto případě platí, že pokud vykazuje model vyšší průhyb než reálný nosník, pak je model „přísnější“ a ukazuje horší variantu, než je reálná hodnota průhybu a celý výsledek naddimenzuje.

Poslední část výsledků numerického modelu spočívá ve výpočtu tuhosti jednotlivých kombinací. Z výsledků je patrné, že nejvyšší tuhost modelovaných nosníků dosahuje nosník z buku, nejméně pak nosník z olše a smrkový je přibližně v průměru obou. Kombinace s olši vykazují značný nárůst oproti čisté olši, u symetrických kombinací více než u nesymetrických. U reálně změřených nosníků je pak situace odlišná, zejména proto, že kombinace K5 dosahuje nejvyšší tuhosti. Všechny hodnoty tuhosti vypočtené z modelovaných hodnot však vykazují značné poddimenzování (průměrně o 9,6 %).

Modelováním vlastností lepených nosníků se zabývala řada autorů. Například Melzerová et al., (2014), kteří modelovali průhyb lepeného nosníku ze smrku. Jejich model obohacený o Metodu vzorkování latinskou hyperkrychlí (Latin Hypercube Sampling method), která umožňuje generovat téměř náhodné parametry výběrového souboru. Výsledkem jejich modelu ověřeného experimentálním změřením je rozdíl + 5,5 % nadhodnocení modelu oproti reálně změřenému nosníku.

Naproti tomu Rescalvo et al., (2020), kteří numericky modelovali lepené nosníky z borovice, topolu a jejich kombinace, dospěli k opačnému závěru. Ačkoliv používali jiné dřeviny, lze jejich výsledky porovnat díky zařazení do pevnostních tříd. Tuhost nosníků z borovice (T24) se přibližují nosníkům uvedených v této práci ze smrku (T26), přičemž rozdíl mezi jejich modelem je průměrně 10 %, zatímco u našeho modelu 8,2 %.

Podobně tomu je i u dalších dřevin, kdy jejich model s topolem (T10) vykazuje změnu 2,4 %, zatímco naše olše (T13) vykazuje rozdíl 8,8 %. Taktéž, jejich kombinace (T30+T8) vykazuje rozdíl 2,2 %, zatímco naše kombinace přibližující se parametry jejich kombinaci je K2 (T30+T13) vykazuje rozdíl 10,4 %. Průměrný rozdíl je pak 4,9 % a 9,1 % v našem případě. Tyto rozdíly jsou dány jednak jinou skladbou dřevin, které mají odlišné vlastnosti a taktéž jejich uspořádáním v lepeném nosníku. Nicméně lze konstatovat, že s dostatečnou přesností lze modelovat průhyby a tuhosti navrhovaných nosníků.

### 5.6. Podélná smyková pevnost při tahovém namáhání

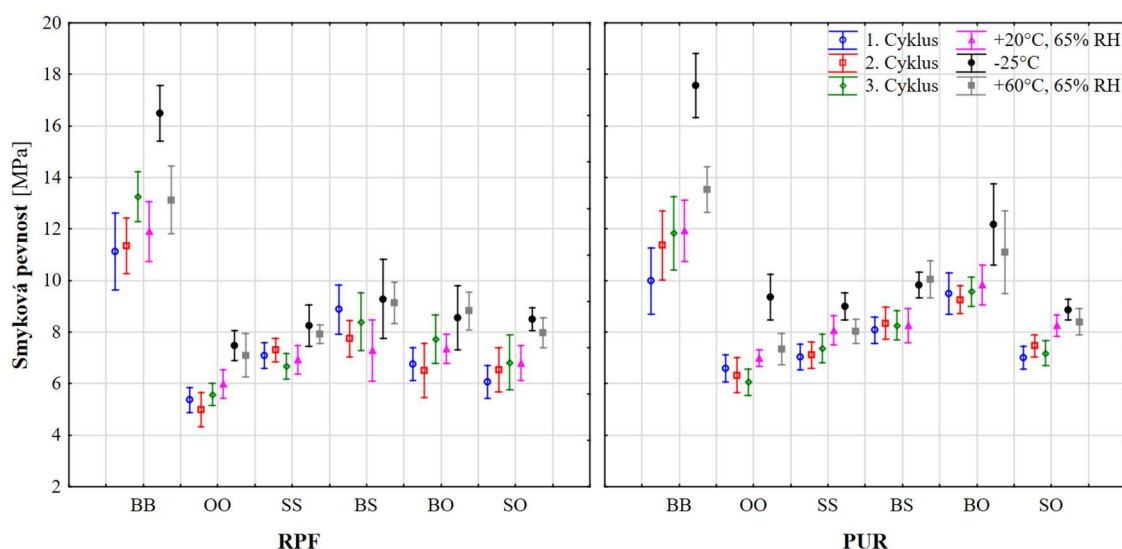
Podélná smyková pevnost při tahovém namáhání byla zjišťována u kombinací dřevin, přičemž výsledky zobrazuje Tabulka 41 a Obr. 60.

Tabulka 41 Výsledky podélné smykové pevnosti kombinací v MPa

RPF		Cyklus					
		1. c.	2. c.	3. c.	Ref.	-25 °C	+60 °C
BB	Průměr	11,14	11,36	13,26	11,91	16,50	13,13
	Sm. odch.	3,18	2,31	2,08	2,50	2,30	2,82
OO	Průměr	5,36	4,99	5,58	5,98	7,48	7,10
	Sm. odch.	1,03	1,43	0,90	1,18	1,25	1,82
SS	Průměr	7,09	7,31	6,68	6,92	8,25	7,91
	Sm. odch.	1,06	0,98	1,05	1,16	1,69	0,78
BS	Průměr	8,87	7,75	8,40	7,28	9,29	9,13
	Sm. odch.	2,02	1,51	2,40	2,52	3,29	1,72
BO	Průměr	6,76	6,51	7,73	7,35	8,56	8,82
	Sm. odch.	1,37	2,24	2,00	1,21	2,68	1,57
SO	Průměr	6,07	6,54	6,82	6,80	8,50	7,97
	Sm. odch.	1,37	1,84	2,26	1,44	0,96	1,24

PUR		Cyklus					
		1. c.	2. c.	3. c.	Ref.	-25 °C	+60 °C
BB	Průměr	9,98	11,37	11,84	11,92	17,57	13,52
	Sm. odch.	2,74	2,86	3,03	2,54	2,66	1,89
OO	Průměr	6,61	6,33	6,06	6,99	9,35	7,35
	Sm. odch.	1,12	1,46	1,10	0,67	1,91	1,30
SS	Průměr	7,04	7,11	7,37	8,07	9,00	8,03
	Sm. odch.	1,07	1,11	1,17	1,21	1,15	0,99
BS	Průměr	8,07	8,35	8,26	8,25	9,82	10,04
	Sm. odch.	1,11	1,32	1,20	1,41	1,07	1,55
BO	Průměr	9,50	9,26	9,57	9,83	12,18	11,10
	Sm. odch.	1,69	1,17	1,22	1,64	3,38	3,42
SO	Průměr	7,00	7,47	7,18	8,26	8,87	8,40
	Sm. odch.	0,93	0,92	1,05	0,89	0,88	1,11



Obr. 60 Podélná smyková pevnost v tahu kombinací dřevin a různých lepidel

Z tabulky 41 a Obr. 60 je patrné, že nejvyšších hodnot smykové pevnosti dosahují všechny kombinace dřevin vystavené  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a to u kombinací lepených jak PUR adhesivem, tak i pomocí RPF. Ze samotných kombinací pak vykazuje nejvyšší smykovou pevnost homogenní kombinace buk-buk (BB), zatímco nejnižší olše-olše (OO). V případě kombinací dřevin je pak patrný nárůst smykové pevnosti, zejména vlivem kombinací dřevin s bukem. Poměr změny smykové pevnosti ukazuje tabulka 42, kde je procentuální vyjádření průměrné změny smykové pevnosti z každého cyklu a teplotního namáhání vztažené k průměrným hodnotám referenčních kombinací ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $65\text{ \% RH}$ ).

Tabulka 42 Poměrná změna smykové pevnosti v %

RPF	BB	OO	SS	BS	BO	SO
Ref a 1.c.	-6,9	-11,5	2,3	18,0	-8,7	-12,0
Ref a 2.c.	-4,9	-20,0	5,2	6,1	-12,9	-4,0
Ref a 3.c.	10,2	-7,2	-3,7	13,3	4,9	0,4
Ref. a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$	27,8	20,0	16,1	21,6	14,1	20,1
Ref. a $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$	9,3	15,8	12,5	20,2	16,7	14,7
PUR	BB	OO	SS	BS	BO	SO
Ref a 1.c.	-19,4	-5,8	-14,6	-2,1	-3,5	-18,0
Ref a 2.c.	-4,9	-10,5	-13,5	1,2	-6,2	-10,6
Ref a 3.c.	-0,7	-15,3	-9,5	0,1	-2,7	-15,1
Ref. a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$	32,2	25,3	10,3	16,0	19,3	6,9
Ref. a $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$	11,9	4,9	-0,5	17,9	11,5	1,7

Porovnání průměrných hodnot smykové pevnosti mezi lepidly je uvedeno v tabulce 43, přičemž platí, že pokud je rozdíl kladný, nabývají vyšší smykové pevnosti kombinace lepené PUR adhesivem, v případě záporného poměru mají vyšší smykovou pevnost kombinace lepené RPF lepidlem.



Tabulka 43 Porovnání smykové pevnosti kombinací mezi lepidly v %

PUR×RPF	BB	OO	SS	BS	BO	SO
Reference	-11,5	18,8	-0,6	-9,9	28,8	13,3
1. cyklus	0,1	21,2	-2,8	7,2	29,7	12,5
2. cyklus	-12,0	7,9	9,4	-1,7	19,2	5,0
3. cyklus	0,1	14,4	14,2	11,7	25,2	17,7
-25 °C	6,1	20,0	8,3	5,4	29,7	4,2
+60 °C	2,9	3,3	1,4	9,1	20,5	5,2

Pro potvrzení rozdílů byla provedena analýza rozptylů (ANOVA), jejíž výsledky jsou uvedeny v tabulce 44.

Tabulka 44 ANOVA smykové pevnosti kombinací

	DF	SS	MS	F	p
Průsečík	1	108158,8	108158,8	33331,12	0,000
Kombinace	5	5749,7	1149,9	354,37	0,000
Lepidlo	1	247,0	247,0	76,11	0,000
Cyklus	5	1300,0	260,0	80,12	0,000
Kombinace × Lepidlo	5	280,5	56,1	17,29	0,000
Kombinace × Cyklus	25	500,2	20,0	6,17	0,000
Lepidlo × Cyklus	5	49,4	9,9	3,05	0,010
Kombinace × Lepidlo × Cyklus	25	77,9	3,1	0,96	0,519
Chyba	1368	4439,1	3,2		

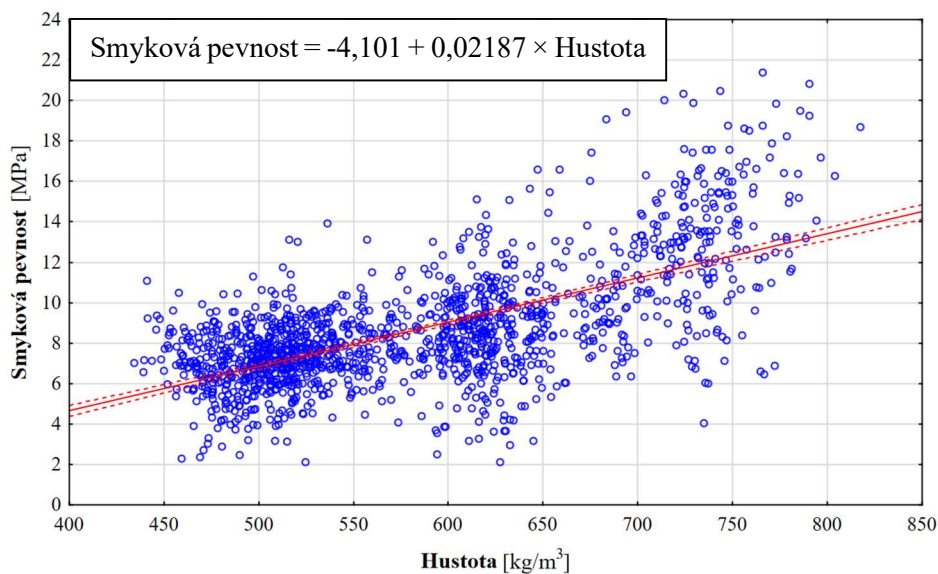
kde DF jsou stupně volnosti, SS je suma čtverců, MS jsou průměry čtverců.

Z výsledků v tabulce 44 je patrné, že vliv jednotlivých faktorů je statisticky významný a rovněž vliv kombinace dvou faktorů vykazuje silnou statistickou významnost. Nejsilnějším faktorem je pak kombinace dřevin, která z podstaty anatomické struktury různých dřevin vykazuje největší variabilitu. Naproti tomu rozdíly mezi vlivem teploty uvedeným pod faktorem cyklus a mezi faktorem lepidla vykazují téměř totožnou sílu, ačkoliv při jejich spolupůsobení již není jejich síla natolik velká, avšak stále statisticky významná. Spolupůsobení všech faktorů společně nevykazuje statistickou významnost, ačkoliv výsledek je velmi blízko hranici statistické významnosti. Možným vysvětlením je velký testovaný soubor dat, kdy při uvážení všech faktorů dohromady pracuje analýza s 1440 unikátními hodnotami, což ve výsledku rozšíří rozptyl hodnot natolik, že například hodnoty kombinace BB vystavené mrazení považuje analýza za extrém, a tedy potvrdí nulovou hypotézu testu, a to že datový soubor nevykazuje odlišný rozptyl.

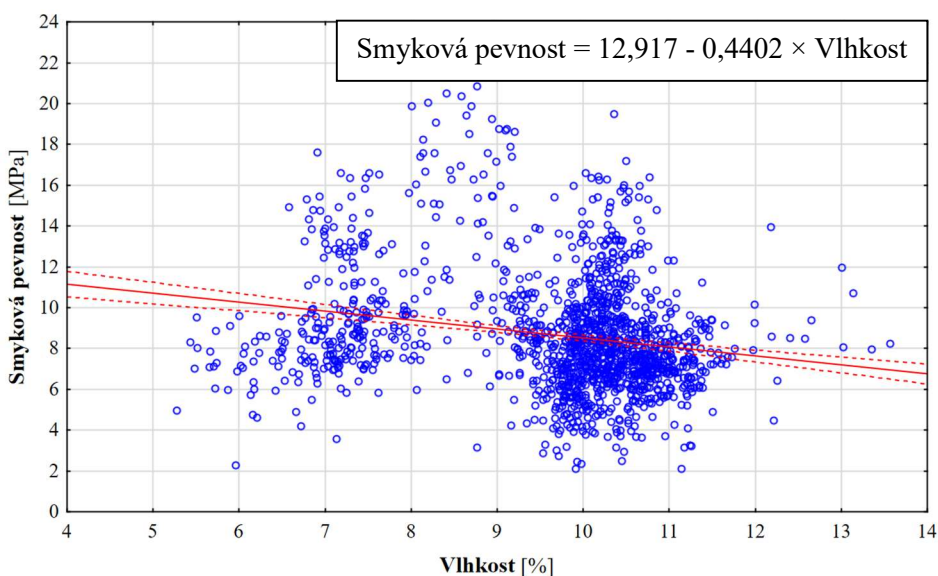
Pro detailnější zjištění významnosti rozdílů faktorů byl proveden i Tukeyho test, který je pro velikost tabulek uveden v přílohách 3 a 20–23. Rovněž byla provedena korelace pro ověření vlivu hustoty a vlhkosti na velikost smykové pevnosti. Výsledek je uveden v tabulce 45 a na obr. 61 a 62.

Tabulka 45 Korelace smykové pevnosti na hustotě a vlhkosti

	Hustota	Vlhkost
Smyková pevnost	$r = 0,652$ $r^2 = 0,425$ $p = 0,000$	$r = -0,206$ $r^2 = 0,042$ $p = 0,000$



Obr. 61 Korelace mezi smykovou pevností a hustotou



Obr. 62 Korelace mezi smykovou pevností a vlhkostí

Z tabulky 45 a obr. 61 a 62 je patrné, že smyková pevnost koreluje s hustotou silně, zatímco s vlhkostí záporně slabě. Z obr. 58 je patrný vyšší rozptyl vlhkosti než v případě lepených nosníků, což dokládá i statistická významnost z tabulky 45. Navíc se zde opět projevuje design experimentu, kdy změna vlhkosti vystupovala jako ověření důsledku teplotního namáhání, nikoliv jako primární sledovaný faktor.

Pro praktické porovnání smykové pevnosti mezi kombinacemi, teplotními stupni a cykly byly porovnány průměrné hodnoty smykové pevnosti oproti referenčním dřevinám (homogenní kombinace) rozdělené po jednotlivých teplotních stupních a cyklech (viz tab. 46).

Tabulka 46 Porovnání smykové pevnosti kombinací ku referenční dřevině v %

RPF		BB	OO	SS	BS	BO	SO
Ref.	BB	0,0	-49,8	-41,9	-38,9	-38,3	-42,9
	OO	99,0	0,0	15,7	21,7	22,9	13,6
	SS	72,0	-13,6	0,0	5,2	6,2	-1,8
1. c.	BB	0,0	-51,8	-36,4	-20,3	-39,3	-45,5
	OO	107,6	0,0	32,1	65,4	26,0	13,2
	SS	57,2	-24,3	0,0	25,2	-4,6	-14,3
2. c.	BB	0,0	-56,1	-35,7	-31,8	-42,7	-42,4
	OO	127,7	0,0	46,5	55,4	30,6	31,1
	SS	55,4	-31,8	0,0	6,1	-10,9	-10,5
3. c.	BB	0,0	-57,9	-49,7	-36,7	-41,7	-48,6
	OO	137,6	0,0	19,6	50,4	38,5	22,2
	SS	98,6	-16,4	0,0	25,8	15,8	2,2
-25 °C	BB	0,0	-54,7	-50,0	-43,7	-48,1	-48,5
	OO	120,5	0,0	10,3	24,2	14,4	13,6
	SS	99,9	-9,4	0,0	12,6	3,7	3,0
+60 °C	BB	0,0	-45,9	-39,7	-30,5	-32,8	-39,3
	OO	84,8	0,0	11,4	28,5	24,2	12,2
	SS	65,9	-10,2	0,0	15,4	11,5	0,7
PUR		BB	OO	SS	BS	BO	SO
Ref.	BB	0,0	-41,4	-32,3	-30,8	-17,5	-30,7
	OO	70,5	0,0	15,5	18,0	40,6	18,2
	SS	47,7	-13,4	0,0	2,2	21,8	2,4
1. c.	BB	0,0	-33,8	-29,5	-19,2	-4,9	-29,9
	OO	51,2	0,0	6,6	22,2	43,8	6,0
	SS	41,8	-6,2	0,0	14,6	34,8	-0,6
2. c.	BB	0,0	-44,3	-37,5	-26,6	-18,5	-34,3
	OO	79,6	0,0	12,3	31,9	46,3	18,1
	SS	59,9	-11,0	0,0	17,4	30,3	5,1
3. c.	BB	0,0	-48,8	-37,8	-30,3	-19,1	-39,4
	OO	95,3	0,0	21,5	36,2	57,9	18,4
	SS	60,7	-17,7	0,0	12,1	29,9	-2,5
-25 °C	BB	0,0	-46,8	-48,8	-44,1	-30,7	-49,5
	OO	87,8	0,0	-3,8	4,9	30,2	-5,2
	SS	95,3	4,0	0,0	9,1	35,3	-1,4
+60 °C	BB	0,0	-45,7	-40,6	-25,7	-17,9	-37,9
	OO	84,1	0,0	9,3	36,7	51,1	14,4
	SS	68,5	-8,5	0,0	25,1	38,3	4,7

Z výše zmíněného vyplývá, že vliv teploty má vliv na smykovou pevnost lepeného dřeva. Jak zjistili Wang et al. (2015), kteří testovali smykovou pevnost lepeného dřeva smrku lepeného pomocí řady lepidel, především pak PUR, RPF lepidla. Z jejich zjištění vyplývá, že při poklesu teplot z 20 °C na -30 °C poklesne pevnost o 6,5 %, a při změně teploty z 20 °C na -60 °C poklesne pevnost o 27,5 %. Podobný trend zjistili i u RPF adhesiva, kde při poklesu teplot z 20 °C na -30 °C poklesne smyková pevnost o 6,1 %, zatímco při změně teploty z 20 °C na -60 °C poklesne pevnost o 18,4 %. Tento pokles si vysvětlují křehnutím lepidla a dřeva. Snížení mechanických vlastností mrazeného dřeva potvrzují i Szmutku et al. (2013), nicméně velmi záleží na rychlosti mrazení dřeva.

O rok později zopakovali Wang et al. (2016) experiment za použití jiného postupu dle EN 14080 (2013) na lepeném smrkovém dřevě lepeném RPF adhesivem zatíženém stejnými teplotními stupni. Z jejich výsledků však vyplývá odlišný trend oproti předchozímu výsledky, kdy při poklesu teplot z 20 °C na -30 °C došlo k nárůstu smykové pevnosti o 15,4 %, a při poklesu teploty z 20 °C na -60 °C došlo k nárůstu smykové pevnosti o 14,7 %. Tyto změny si vysvětlovali vlivem nízké teploty na samotné adhezivum, jeho chemickou strukturu a elastické parametry.

Naproti tomu při zvýšené teplotě dochází ke snižování smykové pevnosti lepeného spoje. Potvrzuje to například Clauß et al. (2011), kteří testovali bukové dřevo lepené řadou lepidel, zejména PUR a RPF lepidly. Při zvýšení teploty z 20 °C na 70 °C zaznamenali pokles o 9 % při lepení pomocí RPF lepidla a 13,1 - 31,4% pokles při lepení různými PUR lepidly. Nejvyšší změna však nastala při teplotě 220 °C kdy u RPF nastal pokles smykové pevnosti o 61 % a u PUR o 82 %. Tak razantní pokles je však způsoben počínající pyrolýzou a rozkladem složek dřeva. Při teplotách okolo 60 °C většina lepidel prochází krystalickou změnou přes tzv. teplotu skelného přechodu ( $T_g$ ), kdy se snižuje adheze lepidel a mezimolekulární síly (Richter a Steiger, 2005; Richter et al., 2006).

Taktéž Bernaczyk et al. (2023) zjišťovali vliv vysoké teploty na smykovou pevnost lepeného bukového dřeva lepeného pomocí PUR a RPF adhesiva. Svými zjištěními potvrzují fakt, že při zvýšené teplotě dochází ke snižování smykové pevnosti lepeného spoje, přičemž při změně teploty z 20 °C na 200 °C dojde ke statisticky významnému poklesu pevnosti o 33 % u RPF lepidel a 53 % u PUR adhesiv. To je dle jejich závěrů způsobené především přerušением kovalentních vazeb u RPF lepidla. Naproti tomu síťované elastomerická lepidla, jako je PUR, vykazují dvoufázovou morfologii. Ta zahrnuje segment s nízkou  $T_g$  a segment s vysokou  $T_g$ . Jedinečné vlastnosti těchto lepidel lze proto přičíst této dvoufázové struktuře.

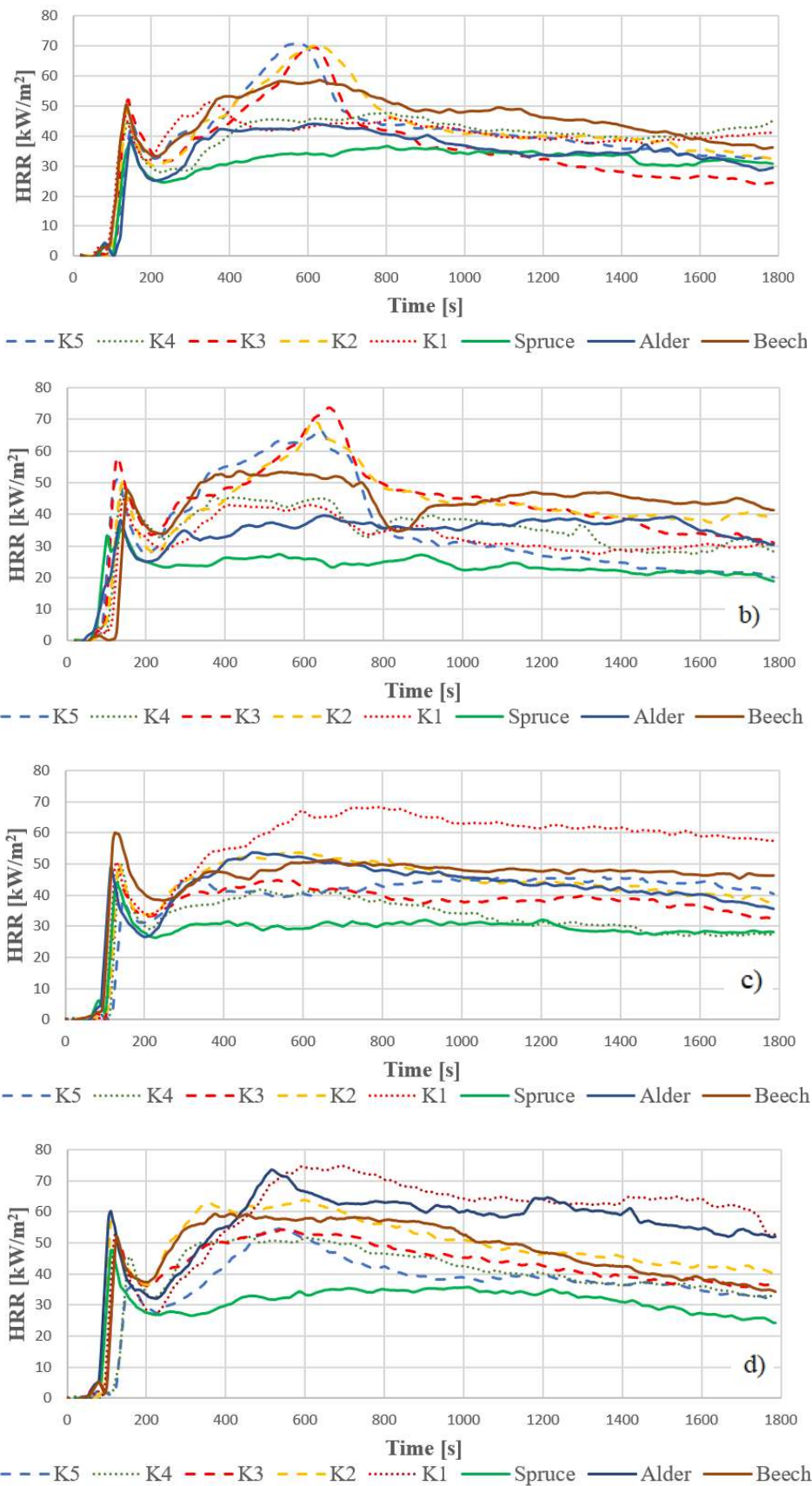
Taktéž cyklické působení teplot má vliv na smykovou pevnost dřeva. Yang et al. (2021) vystavovali modřínové a borovicové nosníky lepené pomocí RPF adhesiva cyklické změně teploty mražením střídané ohřevem ve vodě o teplotě 20 °C s následnou klimatizací na 12% vlhkost dřeva. Z jejich zjištění vyplývá snižující se trend, kdy mezi referencí a jednotlivými cykly byl zaznamenán pokles smykové pevnosti o 14,2 %, 32,9 % a 60 % u modřínového lepeného dřeva a v případě borovice 7,8 %, 12,7 % a 30,4 %. Jejich vysvětlením je rozdíl hustoty mezi jarním a letním dřevem a vnitřním napětím způsobeným nerovnoměrným bobtnáním uvnitř dřeva, které ovlivnilo pevnost lepeného spoje v důsledku neustálé změny vnější teploty.

Velkou roli ve změně smykové pevnosti, stejně jako i ostatních mechanických vlastností, hraje obsah vlhkosti ve dřevě. Jak zjistili Bockel et al. (2020), kteří testovali bukové dřevo lepené pomocí PUR a RPF adhesiva, vystavených podle normy EN 302-1 (2013) dvěma stupňům vlhkovního zatížení (máčené ve studené vodě a testované za mokra, máčené ve vroucí vodě, testované při 12% vlhkosti). Z jejich zjištění je zřejmé, že při testování za mokra dochází k zásadnímu poklesu smykové pevnosti, zatímco při vystavení vroucí vodě s následnou klimatizací nedošlo k poklesu smykové pevnosti.

Vlhkost má vliv na samotná lepidla, jak prokázali Kläusler et al. (2013). Tahová pevnost PUR lepidlových fólií z lepidel na dřevo se snížila o 19–30 % při zvýšení vlhkosti okolního prostředí ze standardního klimatu na relativní vlhkost 95 %. Kromě toho se její modul pružnosti snížil v rozmezí 31–56 %. Oproti tomu RPF fólie nevykazovala pokles pevnosti v tahu se zvyšující se vlhkostí, ale modul pružnosti se výrazně snížil o 50 %.

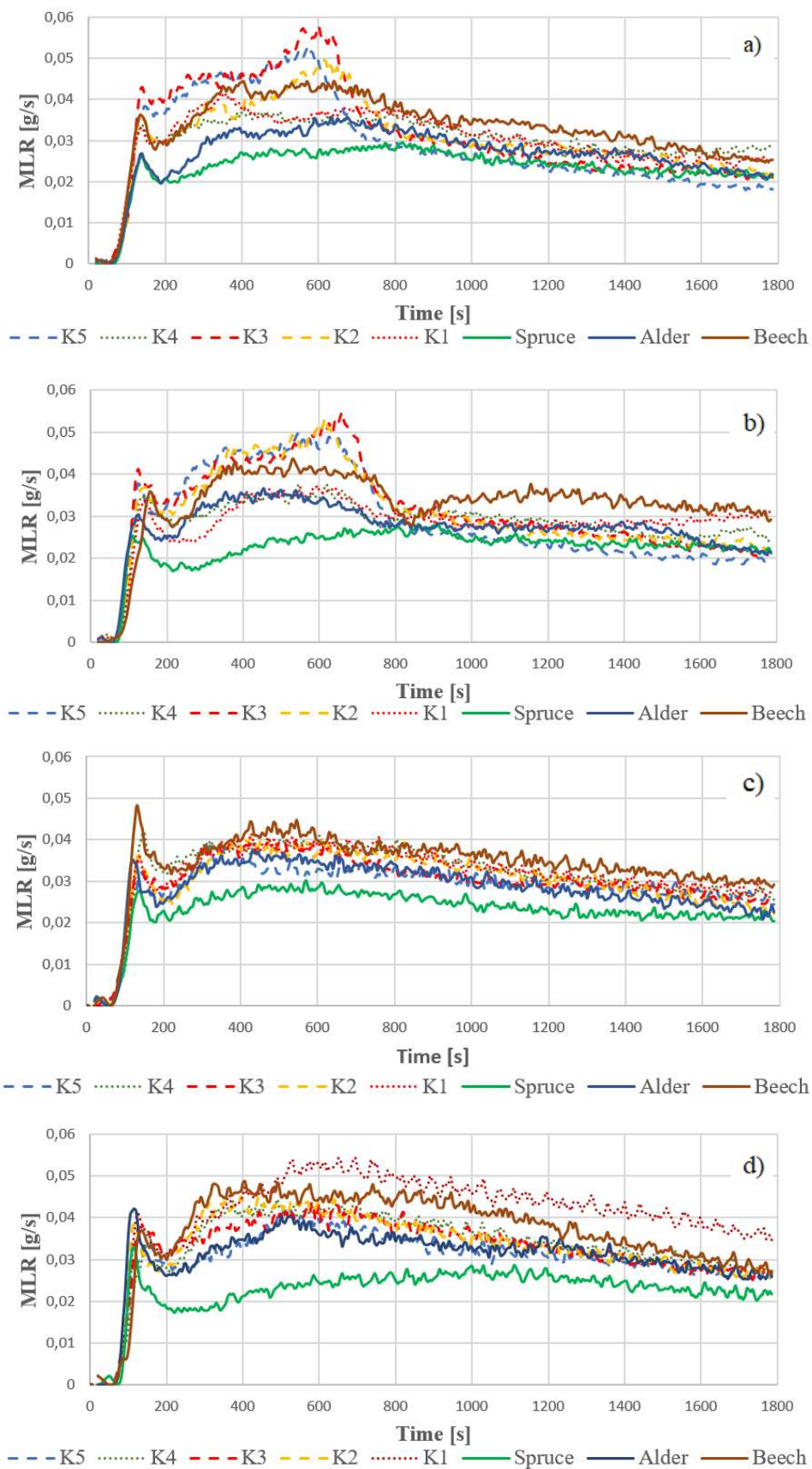
## **5.7. Výsledky hoření**

Výsledky rychlosti uvolňování tepla (HRR) z kalorimetrické zkoušky jsou znázorněny na obr 63 a rychlost úbytku hmoty (MLR) na obr 64. Z nich je patrný prvotní rapidní nárůst s následným poklesem, který je charakteristický pro dřevo. Tento pokles je dán zejména počátkem vzniku zuhelnatělé vrstvy, která funguje jako izolátor od dalšího působení tepelného toku. Od dvousté sekundy se však chování jednotlivých kombinací liší. Nicméně charakteristickým znakem většiny kombinací je vznik druhého vrcholu (peaku), který je zapříčiněn zejména destrukcí povrchu a vznikem nových trhlin, přes které unikají nově vznikající plynné produkty pyrolýzy.



Obr. 63 Rychlost uvolňování tepla (HRR) lepených kombinací

a) lepené pomocí RPF, orientace 1; b) lepené pomocí PUR, orientace 1  
 c) lepené pomocí RPF, orientace 2; d) lepené pomocí PUR, orientace 2



Obr. 64 Rychlost úbytku hmoty (MLR) lepených kombinací

a) lepené pomocí RPF, orientace 1; b) lepené pomocí PUR, orientace 1  
 c) lepené pomocí RPF, orientace 2; d) lepené pomocí PUR, orientace 2

Z homogenních kombinací (buk, smrk, olše) na tento proces reaguje nejvíce buk, nejméně pak smrk. K podobným výsledkům HRR došli i Repič et al. (2023), kteří testovali požární vlastnosti pro různé úpravy bukového dřeva mineralizací. Nicméně, v případě neošetřeného bukového dřeva je vznik druhého vrcholu razantní a HRR dosahuje 200 % prvního vrcholu. Na druhou stranu jak zjistili Martinka et al. (2014), kteří testovali smrkové dřevo, vykazuje smrk nejvyšší hodnoty HRR při prvním vrcholu, zatímco druhý vrchol již dosahuje jen polovičních hodnot maxima.

U nehomogenních symetrických kombinací je druhý vrchol charakteristický prudkým nárůstem uvolněného tepla, které je zapříčiněno termickou dekompozicí bukového dřeva v povrchové vrstvě, viz obr. 65.



Obr. 65 Zuhelnatěná horní buková lamela  
K5 RPF (vlevo) a K2 PUR (vpravo)

To je způsobeno přeměnou větších molekul celulózy, hemicelulóz a ligninu na menší molekuly, které působí jako katalyzátor pro degradaci dalších složek dřeva (Čermák et al., 2019). Po odhoření vrstvy buku začíná proces pyrolýzy ve vrstvě vnitřních lamel, které se množstvím uvolněného tepla v průběhu času přibližují hodnotám, jako v případě homogenní kombinace pro danou dřevinu. Nicméně, stále probíhá proces žhnutí zuhelnatěné vrstvy buku, který dále přispívá emisí tepla (MacLeod et al., 2023).

U nehomogenních asymetrických kombinací (K1 a K4) je nárůst druhého vrcholu pozvolnější, přibližující se dřevině použité v horních vrstvách, nicméně s narůstajícím časem se začíná HRR zvyšovat z důvodu dekompozice bukového dřeva. Rozdíl mezi hořením jehličnatých a listnatých dřevin je v tomhle případě znatelný, přičemž jehličnaté dřeviny vykazují rychlejší nárůst zejména druhého vrcholu (Nakrani et al., 2023).

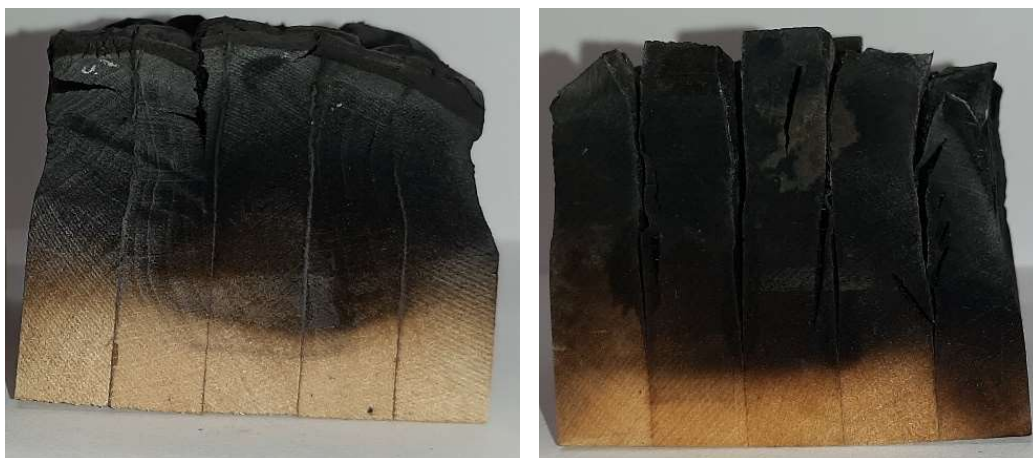


V případě pokračování procesu hoření by se pravděpodobně mohl objevit třetí vrchol, podobně jako prudký nárůst u druhého vrcholu symetrických nehomogenních kombinací.

Pozorované rozdíly v chování při hoření jsou podle Shapchenkové et al. (2022) přisuzovány rozdílnému chemickému složení, které je vlastní různým druhům dřeva. Podle jejich zjištění se rozklad dřeva skládá ze tří odlišných fází. V počáteční fázi nastává hemicelulóz a těkavých extraktivních látek, což je fáze, ve které má bukové dřevo dominantní postavení díky vyššímu obsahu hemicelulóz. Tato převaha výrazně ovlivňuje eskalaci uvolněného tepla pozorovanou v homogenních a symetrických nehomogenních kombinacích. Druhá fáze zahrnuje rozklad celulózy, přičemž bukové dřevo vykazuje nižší tepelnou stabilitu celulózy ve srovnání s olšovým dřevem. Třetí fáze zahrnuje rozklad ligninu, kde olše opět vykazuje vyšší tepelnou stabilitu než bukové dřevo.

Naproti tomu Richter et al. (2019) naznačují, že jehličnaté dřevo obsahuje vyšší podíl ligninu, celulózy a extraktivních látek, zejména pryskyřic, ve srovnání s listnatými dřevinami, což ovlivňuje počáteční fázi pyrolýzy, kdy dochází k rozkladu extraktivních látek. Následně však dochází k rovnoměrnějšímu rozkladu těchto složek dřeva, a to především díky vyšší tepelné stabilitě celulózy a ligninu přítomných ve smrkovém dřevě.

V případě orientace 2, tedy působení tepelného toku na lepené hrany je průběh podobný, nicméně stabilnější než v případě působení na horní plochu vzorku. Velký vliv zde má použité adhesivum, přičemž PUR adhesivum vykazuje vyšší počáteční hodnoty HRR zejména z důvodu delaminace lepené spáry, zatímco vzorky lepené RPF podléhaly větší měrou trhlinami ve dřevě než v lepené spáře. Tento efekt je nejzřetelnější zejména u kombinací s olší, kde došlo k delaminaci téměř celé lepené spáry vzorku, viz obr. 66.



Obr. 66 Olšové dřevo lepené pomocí RPF (vlevo) a PUR (vpravo), orientace 2

Podle Yanga et al. (2009) navíc glulam lepený resorcinolovým lepidlem vystavený tepelnému toku z boku vykazuje menší míru zuhelnatění, než z plochy, což i v našem případě odpovídá rozdílům, mezi grafy 63c a 63d.

Při lepení dřeva je volba lepidla klíčovým faktorem, přičemž tepelná stabilita lepidel je hlavním faktorem určujícím pevnost spoje. Tepelná stabilita lepidel je klíčovým atributem ovlivňujícím pevnost spoje, zejména za různých teplotních podmínek. Polyuretanová (PUR) lepidla mohou vykazovat vynikající tepelnou stabilitu, zejména pokud jsou vystavena mírným teplotám. Podle zjištění Na et al. (2005) je tepelná stabilita PUR lepidel závislá především na složení lepidla, přičemž je zdůrazněna klíčová role poměru NCO/OH. Při vystavení požáru a vysokým teplotám vykazují PUR lepidla obecně příznivé vlastnosti požární odolnosti ve srovnání s různými jinými typy lepidel (Chattopadhyay a Webster, 2009). Při působení tepelného toku však mohou PUR lepidla měknout nebo u nich dochází ke snížení pevnosti spoje.

Naproti tomu resorcinol-fenolformaldehydová (RPF) lepidla vykazují mimořádně vysokou tepelnou stabilitu a jsou schopna odolávat vyšším teplotám ve srovnání s mnoha jinými druhy lepidel. Tato lepidla si zachovávají pevnost spoje a strukturální integritu i při značném tepelném zatížení (Bernaczyk et al., 2023). Lepidla RPF vykazují silnou odolnost proti měknutí, tavení nebo odlupování při vystavení vysokým teplotám, což je činí vhodnými pro aplikace, kde je kritická požární odolnost a tepelná stabilita, jak zjistili Okuni a Bradford (2020) při modelování požárních charakteristik CLT.

To potvrzuje je zjištění Hartiga a Hallera (2023), kteří lepili smrkové, bukové a topolové dřevo pomocí PUR a fenol formaldehydového lepidla. Navíc, topolové dřevo, velmi blízké hustotou olši mělo podobný průběh jako olše, kdy druhý vrchol dosahoval hodnot HRR jako u prvního vrcholu.

Delaminace v lepené spáře je velký problém i v případě orientace tepelného toku shora na plochu (orientace 1), přičemž vzorky lepené RPF vykazovaly jen částečnou delaminaci první lepené spáry, a to vždy do max. 25 % z plochy lepené spáry. Mnohem častější byl výskyt trhlin ve dřevě, přičemž častější byl výskyt trhlin napříč vláken, než podél, což potvrzují i . U PUR adhesiva pak bylo pravidlem, že první dvě lepené spáry ve směru tepelného toku prošly kompletní delaminací, a tedy odhalení původního nepoškozeného materiálu, který dále přispíval svou pyrolýzou do procesu hoření, viz obr. 67.



Obr. 67 Bukové dřevo lepené pomocí RPF (vlevo) a PUR (vpravo), orientace 1

Navíc, PUR adhesiva vykazují zvýšenou míru zuhelnatování a úbytku hmoty než RPF adhesiva, což potvrzují i Brandon a Dagenais (2017). Průběh delaminace je nejvíce patrný na buku (Obr. 63b), kdy po 800s došlo k totální delaminaci povrchu první lepené spáry a započeti pyrolýzy další vrstvy. Efekt delaminace testovali i Emberley et al. (2017b) na křížem lepeném dřevě ze smrku, kdy po delaminaci první spáry a odhalení nepoškozeného materiálu druhé spáry došlo k rapidnímu nárůstu HRR.

Pro komplexní posouzení požárních vlastností materiálu je třeba znát i další charakteristiky, které jsou uvedeny v Tab. 47. Z nich je patrné, že všechny kombinace začaly hořet ustáleným plamenem v rozmezí 1. až 2. minuty od počátku vystavení vzorku tepelným tokem. Mezi kombinacemi a orientacemi vzorků nebyl zaznamenán statisticky významný rozdíl v čase začátku hoření plamenem (TTI). Ten je totiž dán přímou úměrou k rychlosti nárůstu tepelného toku (HFIR) (Ji et al., 2006).

Podobná situace panuje i u maximálních hodnot rychlosti uvolňování tepla (pHRR), kde mezi lepidly není statisticky významný rozdíl, ovšem vliv orientace má zásadní vliv na množství uvolněného tepla zejména u olše a kombinací obsahující olši. Hustota dřeva v tomhle případě hraje velkou roli, jelikož s nižší hustotou se zvětšuje pórovitost, s čímž je spojená nižší tepelná vodivost a vznik lokální akumulace tepla jehož výsledkem je zvýšená rychlost šíření plamene (Bartlett et al., 2019). Čas, za který dosáhne HRR svého vrcholu je pak charakteristický dvěma intervaly, zejména první interval v okolí 120. sekundy, kdy začíná tvorba zuhelnatěné vrstvy a druhý interval v okolí 600. sekundy, přičemž zde probíhá vznik nových trhlin, ze kterých vyvěrají pyrolýzní plyny, které nadále živí proces hoření.

Tabulka 47 Hodnoty požárních vlastností kombinací

Kombinace- adhesivum- orientace	TTI [s]	pHRR [kW/m <sup>2</sup> ]	Čas při pHRR [s]	EHC [MJ/kg]	MARHE [kW/m <sup>2</sup> ]
Buk-PUR-1	123	53,6	425	3,2	42,6
Buk-PUR-2	99	59,2	400	3,0	49,4
Buk-RPF-1	95	58,6	620	3,2	46,0
Buk-RPF-2	118	60,0	115	3,2	41,6
Olše-PUR-1	88	39,5	640	3,1	34,3
Olše-PUR-2	74	73,4	505	4,4	55,1
Olše-RPF-1	113	43,9	605	3,1	34,6
Olše-RPF-2	91	53,5	470	3,6	42,4
Smrk-PUR-1	93	56,6	125	2,5	25,2
Smrk-PUR-2	80	47,5	105	3,0	31,1
Smrk-RPF-1	107	38,1	135	3,3	30,9
Smrk-RPF-2	103	44,2	120	3,1	28,5
K1-PUR-1	106	48,9	130	2,6	34,2
K1-PUR-2	92	74,6	685	3,4	57,7
K1-RPF-1	95	51,1	345	3,3	39,8
K1-RPF-2	96	68,4	770	4,4	55,8
K2-PUR-1	98	69,5	610	3,5	43,6
K2-PUR-2	83	63,9	585	3,6	51,0
K2-RPF-1	104	70,1	615	3,4	44,9
K2-RPF-2	101	53,7	580	3,5	43,2
K3-PUR-1	92	73,7	650	3,4	46,7
K3-PUR-2	99	54,4	530	3,1	43,9
K3-RPF-1	103	69,5	600	2,8	41,9
K3-RPF-2	104	44,8	525	3,0	36,9
K4-PUR-1	108	49,7	130	2,9	36,6
K4-PUR-2	121	52,0	450	2,9	41,0
K4-RPF-1	97	47,8	800	3,4	39,8
K4-RPF-2	110	50,4	130	2,4	33,8
K5-PUR-1	91	66,6	630	2,9	45,6
K5-PUR-2	125	54,5	525	3,0	37,1
K5-RPF-1	108	70,8	570	3,5	43,6
K5-RPF-2	109	46,1	305	3,5	39,8

kde *TTI* je čas do vzplanutí [s], *pHRR* je maximální hodnota rychlosti uvolňování tepla (HRR) [kW/m<sup>2</sup>], *EHC* je efektivní spalné teplo [MJ/kg], a *MARHE* je maximální hodnota z průměrné hodnoty uvolňování tepla [kW/m<sup>2</sup>].

## 6. Závěr

Disertační práce se zabývá návrhem kombinovaného lepeného lamelového dřeva a vlivem fyzikálních faktorů ovlivňujících vlastnosti lepených nosníků, zejména teplotou a jejím cyklickým působením. Kombinované lepené dřevo se jeví jako vhodnou alternativou k lepeným nosníkům z jednoho druhu dřeva.

Vhodným umístěním dřeva buku, olše a smrku je možné dosáhnout zvýšení mechanických vlastností dřeva, zejména při osazení vnějších lamel bukem, při zachování středových lamel z olše (K1) nebo smrku (K5). Kombinace dřevin rovněž umožňuje asymetrické osazení pevnějších lamel, které se prokázaly v rámci kombinací K1 a K4 jako kombinace dobře snášející normálové tahové i smykové síly, což potvrzuje hypotézu práce že vhodným umístěním jednotlivých lamel lze zvýšit ohybové vlastnosti nosníků.

Samotná kombinace dřevin ovlivňuje i průměrnou hustotu lepených nosníků, přičemž z výsledků experimentálního testování je patrné zásadní zvýšení modulu pružnosti v případě kombinace dřevin. Tuto změnu ovlivňuje zásadním způsobem ohybová pevnost dřeviny ve vnějších vrstvách, v tomto případě bukové dřevo. Naopak příliš nezáleží na druhu dřeviny ve vnitřních vrstvách nosníku. Rozdíl v symetrických kombinacích mezi vnitřními vrstvami z olše (K1) nebo smrku (K5) nebyly statisticky významné. Tyto zjištění rovněž vede k potvrzení jedné z hypotéz práce, a to že listnaté dřeviny jsou vhodnou alternativou jehličnatým dřevinám při použití v lepeném lamelovém dřevě.

Ve snaze ušetřit čas a prostředky se jeví perspektivní použití modelů, které byly použity i v této práci. Přesnost modelovaných problémů se navíc stále zvyšuje, ostatně z analytického modelu uvedeného v této práci lze s dostatečnou přesností (odchylka do 5%) zjistit umístění neutrální osy nosníku. Taktéž z numerického modelu je možné vyčíst předpokládané chování nosníku při zatížení a při průměrné odchylce 9,6 % od reálných hodnot průhybu jsou modely dostatečně přesným nástrojem pro návrh nových kombinací.

Důležitý faktor, doposud téměř přehlížený ale ovlivňující vlastnosti lepených nosníků, je teplota a cyklické změny teplot. Vliv teplotního cyklu sice nemá významný vliv na změnu hustoty (do 5 %), jelikož změny hustoty byly vyhodnoceny jako statisticky nevýznamné, ale teplotní cykly mají významný vliv na modul pružnosti lepených nosníků z jednotlivých druhů dřevin, zejména homogenních kombinací z buku a smrku.

U kombinací dřevin je vliv cyklické změny teploty menší než u homogenních kombinací ale není statisticky významný. Cyklické teploty také ovlivňují ohybovou pevnost, zejména u homogenní bukové kombinace. U ostatních kombinací nedochází k tak velkým změnám. Další mechanickou vlastností, která je silně ovlivněna teplotou a jejím cyklickým působením je smyková pevnost. Nejvýraznější efekt zvýšení smykové pevnosti nastal při mrazení na  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kdy dosáhla homogenní buková kombinace nárůstu pevnosti až o 28 %, což potvrzuje jednu z hypotéz práce, a to že teplota má vliv na mechanické vlastnosti lepeného dřeva. Při zvýšené teplotě došlo rovněž k nárůstu smykové pevnosti, ale větší vliv mělo snížení obsahu vlhkosti ve dřevě, než teplota.

Součástí práce bylo rovněž zjišťování základních požárních charakteristik, zejména rychlost úbytku hmoty (MLR) a rychlost uvolňování tepla (HRR) při dvou orientacích působení tepelného toku, a to shora na plochu a na lepenou hranu.

Nejvyšších hodnot HRR i MLR dosahovaly kombinace s bukovým dřevem v horní lamele což negativním způsobem vyvažuje přednosti po stránce mechanických vlastností. Olše, ačkoliv by z hlediska mechanických vlastností mohla nahradit smrk, po stránce požárních charakteristik vykazuje velkou dynamiku při hoření zejména při působení požáru na lepenou hranu, což by mohlo výhledově znesnadnit širší použití olše v dřevěných nosných konstrukcích.

Použitá lepidla navíc ovlivňují chování lepeného dřeva vystavenému teplotnímu toku. PUR lepidlo vykazovalo kompletní delaminaci v prvních dvou lepených spárách, které se nejvíce projevilo u homogenní kombinace z buku.

## **Přínosy pro vědu**

Přínosem této disertační práce v oblasti vědy a výzkumu je především komplexní pojetí sledovaných vlastností lepeného lamelového dřeva. Z pohledu jednotlivých vlastností již probíhají výzkumy řadu let, avšak až doposud nebylo zjišťováno na stanovených kombinacích lepeného dřeva společné působení mechanických, teplotních, vlhkostních a požárních charakteristik. Řadu těchto vlastností je navíc s nástupem moderní výpočetní techniky možné nasimulovat v modelovacích programech. Tyto simulace a modely umožňují na základě okrajových podmínek nadefinovat chování jednotlivých proměnných, či případně jejich spolupůsobení.

V práci se proto nacházejí dva modelové případy, které rozšiřují možnosti navrhování konstrukčních prvků z lepeného lamelového dřeva. Hlavní modelovanou charakteristikou byl zvolen modul pružnosti, který při návrhu konstrukčních prvků hraje klíčovou roli. Modelované charakteristiky však vždy podléhají jisté míře zkreslení vlivem zjednodušení okrajových podmínek modelu. Proto bylo třeba modely verifikovat experimentálním měřením, přičemž s průměrnou odchylkou do 10 % od naměřených hodnot nabízejí použitelný nástroj pro designování možných kombinací lepeného dřeva.

Experimentálním měřením byly rovněž potvrzeny vlivy fyzikálních faktorů ovlivňující mechanické vlastnosti lepeného dřeva. Zejména teplota a vlhkost a jejich synergické působení je již známé řadu let, nicméně kombinací těchto faktorů s faktorem použitého adhesiva a kombinací dřevin, bylo rozšířeno poznání společného působení těchto vlivů. Vliv použité dřeviny v tomhle případě hraje klíčovou roli.

Práce rovněž rozšiřuje a potvrzuje poznání mechanických vlastností lepeného dřeva, které se v současné době projevují především v odvětvích zpracovávajících kovové materiály, případně kompozity. Umístěním odolnějšího dřeva do vnějších lamel nosníků lze zajistit zvýšení mechanické odolnosti nosníku. Navíc, při asymetrických kombinacích dřevin je možné optimalizovat působení sil v nosníku a tedy vyhovět požadavkům praxe.

Komplexnost této práce prohlubuje i znalosti o požární ochraně, zejména vliv kombinace dřevin na dynamiku požáru a rychlost hoření konstrukce. Ta je klíčová jak pro navrhování konstrukcí, tak i pro samotný zásah záchranných složek. Velmi podstatný vliv zaujímají použítá adhesiva při lepení konstrukčních prvků, jelikož při špatně zvoleném adhesivu může v případě požáru nastat delaminace v lepené spáře, což může způsobit kolaps celé konstrukce.

## Přínosy pro praxi

Praktické přínosy práce spočívají především ve vývoji alternativního materiálu vhodného pro použití v dřevěných konstrukcích. Kombinované lepené lamelové dřevo nabízí celou řadu výhod oproti klasickému lepenému dřevu z jedné dřeviny. Mezi tyto výhody patří zejména fakt, že při zachování stejného příčného průřezu nosníku dochází ke zvýšení mechanických vlastností nutných pro přenášení namáhání z konstrukce. Velmi slibně se v tomto ohledu jeví symetrické nehomogenní kombinace K2 a K5 (bukové vnější lamely a střed z olše, resp. smrku).

Ty by při případném praktickém uplatnění v praxi nevyžadovaly přílišný zásah do technologických postupů výrobce, jelikož je třeba si dávat pozor pouze na první a poslední lamelu nosníku, která je z jiného materiálu než středové lamely. Jednoduchost výroby bez složitého vlepování dalších podpůrných prvků se promítá do výsledné ceny produktu, což činí kombinované lepené lamelové dřevo atraktivní alternativou ke stávající nabídce lepených programů.

Pravděpodobně největším praktickým přínosem je pak známý poměr „cena × výkon“, kdy při mírném navýšení ceny nosníku za materiál dochází k zásadnímu zvýšení mechanických vlastností. Například mezi homogenním smrkovým nosníkem a kombinací K5 je evidentní nárůst modulu pružnosti o 14-34 % v závislosti na použitém lepidle a to vše při zachování přírodního vzhledu dřevěného nosníku bez nutnosti výztuže jinými materiály, například ocelovými pláty, nebo polymerními tkaninami. Výpočet samozřejmě vychází z naměřených hodnot a pro praktické použití by se musely dále připočítat opravné normativní koeficienty.

Z hlediska požární ochrany konstrukcí však buk a kombinace s bukem vykazují zvýšení dynamiky rychlosti požáru. Dřevo, byť rozdílných dřevin, stále vykazuje podobné požární charakteristiky a ochrana dřevěných konstrukcí před požárem je klíčovým faktorem pro rozvoj a rozšíření dřevěných konstrukcí ve stavebnictví. Přínosem této práce je zejména zjištění, že velmi záleží na použitém lepidle, jelikož PUR lepidla, ze kterých sice neuniká žádný volný formaldehyd, mají ale větší tendenci k delaminaci, než léty prověřené fenol-formaldehydová lepidla.

Z výše zmíněného je patrné, že vývoj nových materiálů na bázi dřeva použitelných v konstrukcích je komplexní problém hledající kompromis mezi normativními požadavky, vědeckým ověřením vlastností na jedné straně a cenou, jednoduchostí výroby a odolností na straně druhé.



## Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1 Oblasti adheze a koheze lepeného spoje.....	13
Obr. 2 Reakce isokyanátu za vzniku uretanových vazeb a oxidu uhličitého.....	20
Obr. 3 Snímek lepené spáry smrkového dřeva vyplněného PUR lepidlem.....	21
Obr. 4 Reakce vzniku fenol-formaldehydového lepidla.....	23
Obr. 5 Snímek lepené spáry smrkového dřeva vyplněného PF lepidlem.....	25
Obr. 6 Podélný řez a příčný řez olšovým dřevem.....	34
Obr. 7 Podélný řez a příčný řez bukovým dřevem.....	36
Obr. 8 Podélný řez a příčný řez smrkovým dřevem.....	37
Obr. 9 Lepené rostlé dřevo a délkově napojované dřevo (KVH).....	39
Obr. 10 Křížem vrstvené dřevo (CLT).....	39
Obr. 11 Lepené lamelové dřevo (Glulam).....	40
Obr. 12 Příklad skladby nosníku z kombinovaného lepeného lamelového dřeva.....	41
Obr. 13 Průběh normálových a smykových sil v kombinovaném lepeném nosníku.....	42
Obr. 14 Dřevobetonový nosný prvek.....	44
Obr. 15 Napětí v lepeném dřevě vlivem vlhkosti.....	47
Obr. 16 Rozdělení příčného průřezu nosníku vzhledem k vlhkosti.....	48
Obr. 17 Sorpční izotermy vybraných lepidel.....	49
Obr. 18 Vliv teploty na modul pružnosti.....	52
Obr. 19 Mechanické vlastnosti lepidel.....	54
Obr. 20 Vliv teploty na ohybovou pevnost.....	55
Obr. 21 Kirchhoffova teorie předpokladu o normálách.....	60
Obr. 22 Vrstvení laminátu.....	62
Obr. 23 Základní prvky metody konečných prvků.....	65
Obr. 24 Trojúhelník hoření.....	66
Obr. 25 Tetraedr hoření.....	67
Obr. 26 Přehled druhů změny skupenství u polymerních látek.....	67
Obr. 27 Odhořívání dřeva v čase.....	69
Obr. 28 Pyrolýza dřeva.....	70
Obr. 29 Energetická bilance hoření.....	71
Obr. 30 Deformace geometrie dřeva při hoření.....	73
Obr. 31 Výpočetní metody podle ČSN EN 1995-1-2 (2006).....	74
Obr. 32 Šíření plamene pod různými úhly.....	76
Obr. 33 Vztah mezi třídami reakce na požár.....	78
Obr. 34 Mezní stavy požární odolnosti.....	78
Obr. 35 Výroba, požadavky a vrstvení lamel.....	83
Obr. 36 Kombinační klíč pro lepení kombinací dřevin.....	87
Obr. 37 Část vyrobených vzorků a jejich klimatizace.....	88
Obr. 38 Cyklické teplotní zatížení vzorků.....	89
Obr. 39 Uspořádání zkoušky pro měření modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu čtyřbodovým ohybem.....	90
Obr. 40 Průběh ohybové zkoušky.....	91
Obr. 41 Zkušební tělesa pro zkoušku smykové pevnosti.....	92
Obr. 42 Průběh sil nosníku.....	94
Obr. 43 Modelová síť vzorku a detail kubické 3D sítě.....	97
Obr. 44 Testovací zařízení pro kalorimetrickou zkoušku.....	99
Obr. 45 Zkušební těleso v hliníkové fólii s clonou.....	100
Obr. 46 Orientace zkušebních těles pro kalorimetrickou zkoušku.....	101
Obr. 47 Hustota lamel pro lepení nosníků při 12% vlhkosti.....	103

Obr. 48 Histogramy hustot klimatizovaných lamel s normálním rozdělením .....	104
Obr. 49 Změny hustoty v průběhu teplotního cyklování .....	105
Obr. 50 Hustota lepených nosníků na konci každého cyklu při 12% vlhkosti .....	107
Obr. 51 Hustota kombinací dřevin pro smykovou pevnost .....	109
Obr. 52 Modul pružnosti nosníků .....	116
Obr. 53 Korelace mezi modulem pružnosti nosníků a hustotou.....	118
Obr. 54 Korelace mezi modulem pružnosti nosníků a vlhkostí.....	118
Obr. 55 Ohybová pevnost nosníků .....	122
Obr. 56 Korelace mezi ohybovou pevností a hustotou.....	125
Obr. 57 Korelace mezi ohybovou pevností a vlhkostí.....	125
Obr. 58 Korelace mezi ohybovou pevností a modulem pružnosti.....	125
Obr. 59 Model nosníku .....	132
Obr. 60 Smyková pevnost lepených kombinací dřevin a různých lepidel.....	135
Obr. 61 Korelace mezi smykovou pevností a hustotou .....	137
Obr. 62 Korelace mezi smykovou pevností a hustotou .....	137
Obr. 63 Rychlost uvolňování tepla (HRR) lepených kombinací .....	141
Obr. 64 Rychlost úbytku hmoty (MLR) lepených kombinací .....	142
Obr. 65 Zuhelnatěná horní buková lamela.....	143
Obr. 66 Olšové dřevo lepené pomocí RPF a PUR, orientace 2 .....	144
Obr. 67 Bukové dřevo lepené pomocí RPF a PUR, orientace 1 .....	146
Tabulka 1 Procenta porušení dřeva ku smykové pevnosti.....	58
Tabulka 2 Faktory ovlivňující šíření plamene po pevných látkách .....	72
Tabulka 3 Návrhové rychlosti zuhelnatění $\beta_0$ .....	75
Tabulka 4 Třídy reakce na oheň .....	77
Tabulka 5 Mezní stavy konstrukcí.....	79
Tabulka 6 Normy pro stanovení reakce výrobků na oheň .....	80
Tabulka 7 Charakteristiky reakce stavebních výrobků na oheň .....	80
Tabulka 8 Porovnání listnatých dřevin s nízkou hustotou se smrkem.....	84
Tabulka 9 Porovnání listnatých dřevin s vyšší hustotou se smrkem .....	85
Tabulka 10 Vybrané dřeviny v materiálovém modelu .....	86
Tabulka 11 Charakteristické hodnoty vlastností.....	87
Tabulka 12 Moduly pružnosti vybraných dřevin.....	95
Tabulka 13 Hustota lamel pro lepení nosníků při 12% vlhkosti.....	103
Tabulka 14 Ověření normality pomocí Shapiro-Wilkova testu .....	104
Tabulka 15 ANOVA teplotních cyklů nosníků .....	106
Tabulka 16 Průměrné hodnoty hustoty lepených nosníků na konci každého cyklu.....	106
Tabulka 17 Porovnání změny hustot nosníků mezi cykly v procentech.....	107
Tabulka 18 Analýza rozptylů (ANOVA) hustot nosníků .....	108
Tabulka 19 Porovnání hustot nosníků vztažených k referenční dřevině v procentech.	108
Tabulka 20 Hodnoty hustot kombinací dřevin pro smykovou pevnost .....	110
Tabulka 21 Analýza rozptylů (ANOVA) hustot kombinací pro smykovou pevnost ...	110
Tabulka 22 Vlhkost nosníků v průběhu všech cyklů.....	111
Tabulka 23 ANOVA vlhkosti nosníků v průběhu cyklů .....	112
Tabulka 24 Hodnoty vlhkosti nosníků při testování .....	112
Tabulka 25 Hodnoty vlhkosti kombinací dřevin pro smykovou pevnost .....	113
Tabulka 26 ANOVA vlhkosti kombinací dřevin pro smykovou pevnost .....	113
Tabulka 27 Moduly pružnosti nosníků .....	115
Tabulka 28 Poměrná změna MOE .....	116
Tabulka 29 Porovnání modulu pružnosti nosníků mezi lepidly .....	117

Tabulka 30 ANOVA modulu pružnosti nosníků .....	117
Tabulka 31 Korelace mezi modulem pružnosti, hustotou a vlhkostí.....	117
Tabulka 32 Porovnání modulů pružnosti nosníků vztažených k referenční dřevině....	119
Tabulka 33 Ohybová pevnost nosníků .....	122
Tabulka 34 Poměrná změna MOR .....	123
Tabulka 35 Porovnání ohybové pevnosti nosníků mezi lepidly .....	123
Tabulka 36 ANOVA ohybové pevnosti nosníků.....	124
Tabulka 37 Korelace mezi ohybovou pevností, hustotou, vlhkostí a MOE .....	124
Tabulka 38 Porovnání ohybové pevnosti nosníků vztažených k referenční dřevině....	126
Tabulka 39 Analytický model pozice neutrální osy ( $y_n$ ) a modulu pružnosti.....	129
Tabulka 40 Výsledky numerického modelu .....	131
Tabulka 41 Výsledky smykové pevnosti kombinací .....	134
Tabulka 42 Poměrná změna smykové pevnosti .....	135
Tabulka 43 Porovnání smykové pevnosti kombinací mezi lepidly .....	136
Tabulka 44 ANOVA smykové pevnosti kombinací .....	136
Tabulka 45 Korelace smykové pevnosti na hustotě a vlhkosti.....	137
Tabulka 46 Porovnání smykové pevnosti kombinací ku referenční dřevině .....	138
Tabulka 47 Hodnoty požárních vlastností kombinací .....	147

## Seznam zkratek

Zkratka	Jednotka	Anglický název	Český název
( <i>E-I</i> )	[-]	Wood stiffness	Tuhost dřeva
1C PUR	[-]	One component polyurethane	Jednokomponentní polyuretan
2C PUR	[-]	Two component polyurethane	Dvousložkový polyuretan
ANOVA	[-]	Analysis of variance	Analýza rozptylů
ARHE	[kW/m <sup>2</sup> ]	Average rate of heat emission	Průměrná rychlost uvolňování tepla
BNV	[%]	Fibre saturation point	Bod nasycení vláken
BSH	[-]	[DE] Brettschichtholz	Lepené lamelové dřevo
CFRP	[-]	Carbon fiber reinforced polymer	Polymer vyztužený uhlíkovými vlákny
CLT	[-]	Cross laminated timber	Křížem vrstvené dřevo
DMF	[-]	N,N-dimethylformamide	N,N-dimethylformamid
DSC	[-]	Differential scanning calorimetry	diferenční skenovací kalorimetrie
DTA	[-]	Differential thermal analysis	Diferenciální termická analýza
DTG	[-]	Derivative Thermogravimetry	Diferenciální termogravimetrie
E	[MPa]	Young's modulus of elasticity	Youngův modul pružnosti
E <sub>0,mean</sub>	[MPa]	Mean modulus of elasticity	Průměrný modul pružnosti
EC5	[-]	Eurocode five (EN 1995)	Eurokód pět (ČSN EN 1995)
EHC	[MJ/kg]	Effective heat of combustion	Efektivní spalné teplo
EP	[-]	Epoxide	Epoxid
EPI	[-]	Emulgated polymerized isocyanate	Emulgovaný polymerizovaný izokyanát
FEA	[-]	Finite element analysis	Analýza konečných prvků
FEM	[-]	Finite element method	Metoda konečných prvků (MKP)
FIGRA	[W/s]	Fire growth rate index	index rychlosti růstu požáru
FRP	[-]	Fiber reinforced polymer	Vlákny vyztužený polymer
<i>f<sub>v</sub></i>	[MPa]	Shear strength	Pevnost ve smyku
G	[MPa]	Shear modulus	Smykový modul pružnosti
GCC	[-]	Glulam concrete composite	Dřevobetonové lepené lamelové dřevo
GLT	[-]	Glued laminated timber (Glulam)	Lepené lamelové dřevo
HCF	[-]	High cycle fatigue	Únavový cyklus s velkým počtem cyklů
HFIR	[kW/m <sup>2</sup> s]	Heat flux increase rate	Rychlost nárůstu tepelného toku
HRR	[kW/m <sup>2</sup> ]	Heat release rate	Rychlost uvolňování tepla
KVH	[-]	[DE] Konstruktionsvollholz	Konstrukční dřevo délkově spojované zubovitým spojem
LCF	[-]	Low cycle fatigue	Únavový cyklus s nízkým počtem cyklů
LFS	[cm/s]	Laminar flame speed	Boční šíření plamene
LIFT	[-]	Lateral ignition and spread of flame test	Zkouška bočního vzplanutí a šíření plamene
LVL	[-]	Laminated veneer lumber	Vrstvené dýhové dřevo
<i>M</i>	[Nm]	Bending moment	Ohybová moment
MARHE	[kW/m <sup>2</sup> ]	Maximum of AHRE	Maximální hodnota AHRE
MCC	[-]	Micro Combustion Calorimetry	Kalorimetrie v mikroměřítku
MDF	[-]	Medium density fiberboard	Dřevovláknitá deska se střední hustotou
MF	[-]	Melamine-formaldehyde	Melamin-formaldehyd
MH	[%]	limit of hygroscopicity	Mez hygroscopicity
MLR	[g/s]	Mass loss rate	Rychlost úbytku hmoty
MNBS	[%]	Cell wall saturation limit	Mez nasycení buněčné stěny
MOE	[MPa]	Modulus of elasticity	Ohybový modul pružnosti
MOR	[MPa]	Modulus of rupture	Ohybová pevnost
MUF	[-]	Melamine urea formaldehyde	Melamin- močovino formaldehyd
<i>N</i>	[N]	Normal force	Normálová síla
OSB	[-]	Oriented strand board	Deska z orientovaných třísek
PDE	[-]	Partial differential equation	Parciální diferenciální rovnice
PF	[-]	Phenol-formaldehyde	Fenol formaldehyd
pHRR	[kW/m <sup>2</sup> ]	Peak value of HRR	Maximální hodnota HRR
pMDI	[-]	Polymerized 4,4-methylen-diphenyl diisocyanate	polymerizovaný 4,4-metylen-difenyl diisokyanát
PUR	[-]	Polyurethane	Polyuretan

Zkratka	Jednotka	Anglický název	Český název
PVAc	[-]	Polyvinyl acetate	Polyvinylacetát
RH	[%]	Relative humidity	Relativní vlhkost vzduchu
RPF	[-]	Resorcinol-phenol formaldehyde	Resorcinol-fenolformaldehyd
$S_2$	[-]	Cell wall layer	Vrstva buněčné stěny
SBI	[-]	Single Burning Item	Test jednoduché hořící jednotky
SC	[-]	Service class (according to EC5)	Servisní třídy použitelnosti (podle EC5)
SMOGRA	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	Smoke growth rate index	Index rychlosti vývinu kouře
S-N	[-]	Stress-Life Fatigue analysis	Napět'ově – časová analýza cyklické únavy materiálu
SVR	[%]	Equilibrium moisture content (EMC)	Stav vlhkostní rovnováhy
$T_g$	[°C]	Glass temperature	Teplota skelného přechodu
TGA	[-]	Thermogravimetric analysis	Termogravimetrická analýza
THR	[MJ/m <sup>2</sup> ]	Total heat released	Celkové uvolněné teplo
$T_{sf}$	[°C]	Stress-free temperature	Beznapět'ová teplota
TSP	[m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	Total smoke production	Celková produkce kouře
TSS	[MPa]	Tensile shear strength	Smyková pevnost při tahovém namáhání
UF	[-]	Urea-formaldehyde	Močovino-formaldehyd
VOC	[-]	Volatile organic compound	Těkavé organické sloučeniny
$\nu$	[-]	Poisson's ratio	Poissonovo číslo
$\rho_{mean}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Mean density	Průměrná střední hustota
$\sigma_{B0,char}$	[MPa]	Characteristic value of bending strength	Charakteristická pevnost v ohybu
$\sigma_c$	[MPa]	Compression strength	Pevnost v tlaku
$\sigma_0$	[MPa]	Normal stress	Normálové napětí

## Seznam publikací

- Kytka, Tomáš**, Miroslav Gašparík, Lukáš Sahula, David Novák, Elham Karami, Sumanta Das, and Martin Sviták. (2024). "Predicted and Experimental Bending Behaviour of Glulam Bonded by RPF Adhesive" *Materials* 17, no. 2: 514. <https://doi.org/10.3390/ma17020514>
- Kytka Tomáš**, Miroslav Gašparík, David Novák, Lukáš Sahula, Elham Karami, Sumanta Das. (2024). "Burning Properties of Combined Glued Laminated Timber" *Fire* 7, no. 1: 30. <https://doi.org/10.3390/fire7010030>
- Das Sumanta, Gašparík Miroslav, Sethy Anil Kumar, Niemz Peter, Lagaňa Rastislav, **Kytka Tomáš**, Sviták Martin, Kamboj Gourav. (2023). Suitability of Aspen (*Populus tremula* L.) for cross-laminated timber (CLT). *Wood research*. 68(3). 502-520. DOI: [10.37763/wr.1336-4561/68.3.502520](https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/68.3.502520)
- Das Sumanta, Gašparík Miroslav, Sethy Anil Kumar, Niemz Peter, Lagaňa Rastislav, Langová Nadežda, Mahapatra Manaswini, **Kytka Tomáš**, Kamboj Gourav, Rezaei Fatemeh. (2023). Bending and rolling shear performance of homogeneous poplar and hybrid maple-poplar cross laminated timber. *Composite Structures*. V recenzním řízení.
- Das Sumanta, Gašparík Miroslav, Sethy Anil Kumar, **Kytka Tomáš**, Kamboj Gourav, Rezaei Fatemeh. (2023). Bonding performance of mixed species cross laminated timber from poplar (*Populus nigra* L.) and maple (*Acer platanoides* L.) glued with melamine and PUR adhesive. *Journal of Building Engineering*. 68, 106159. [10.1016/j.jobbe.2023.106159](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106159)
- Kytka Tomáš**, Gašparík Miroslav, Sahula Lukáš, Karami Elham, Teterin Danil, Novák David, Das Sumanta, Kvičková Sarvašová Monika. (2022). Bending characteristics of glued laminated timber depending on the alternating effects of freezing and heating. *Construction and Building Materials*, 350, 128916. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128916>
- Gašparík Miroslav, Rezaei Fatemeh, Karami Elham, Das Sumanta, **Kytka Tomáš**, Vlk Lukáš, Ditommaso Gianluca. (2022). The effect of alternating freezing and high temperatures on the tensile-shear strength of glued Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) and European larch (*Larix decidua* Mill.) wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 1-8. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01853-z>

- Gašparík Miroslav, Karami Elham, **Kytka Tomáš**, Das Sumanta, Houska Tomáš. (2023). The influence of freezing on the nail withdrawal capacity of Norway Spruce and European Larch wood. *European Journal of Wood and Wood Products* <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01898-0>
- Gašparík Miroslav, Karami Elham, Rezaei Fatemeh, **Kytka Tomáš**, Das Sumanta, Lesáková Doubravka. (2022). The Influence of Alternating Lower and Higher Temperatures on the Bending Characteristics of Glued Norway Spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) and European Larch (*Larix decidua* Mill.) *Wood. Forests*, 13(3), 364. <https://doi.org/10.3390/f13030364>
- Gašparík Miroslav, Karami Elham, Sethy Anil Kumar, Das Sumanta, **Kytka Tomáš**, Paukner Filip, Gaff Milan. (2021). Effect of freezing and heating on the screw withdrawal capacity of Norway spruce and European larch wood. *Construction and Building Materials*, 303, 124457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124457>
- Sahula Lukáš, **Kytka Tomáš**, Novák David, Borůvka Vlastimil, Šedivka Přemysl. Chemická modifikace jádrového dřeva dubu pro aplikaci konstrukčního adhesiva. 62nd student scientific international conference. 25th may 2022. Technical university in Zvolen, Slovak Republic. Pp.150-160. ISBN 978-80-228-3315-8.
- Sahula Lukáš, Šedivka Přemysl, Żóltowska Sonia, **Kytka Tomáš**, Borůvka Vlastimil. 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 <https://doi.org/10.35511/978-963-334-446-0>
- Kytka Tomáš**, Sahula Lukáš, Gašparík Miroslav, Novák David. The effect of exposure and wood species on the tensile-shear strength of the glued joint with pur adhesives. 63nd student scientific international conference. 18th may 2023. Technical university in Zvolen, Slovak Republic. Pp.74-83. ISBN 978-80-228-3365-3.

## Seznam použitých zdrojů

- Abdelwahab, N.A., Nassar, M.A., 2011. Preparation, optimisation and characterisation of lignin phenol formaldehyde resin as wood adhesive. *Pigment Resin Technol.* 40, 169–174. <https://doi.org/10.1108/03699421111130432>
- Adibaskoro, T., Makowska, M., Rinta-Paavola, A., Fortino, S., Hostikka, S., 2021. Elastic Modulus, Thermal Expansion, and Pyrolysis Shrinkage of Norway Spruce Under High Temperature. *Fire Technol.* 57, 2451–2490. <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01123-z>
- Adolf, D.B., Chambers, R.S., 2007. A thermodynamically consistent, nonlinear viscoelastic approach for modeling thermosets during cure. *J. Rheol.* 51, 23–50. <https://doi.org/10.1122/1.2360670>
- Afshari, Z., Malek, S., 2022. Moisture transport in laminated wood and bamboo composites bonded with thin adhesive layers – A numerical study. *Constr. Build. Mater.* 340, 127597. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127597>
- Ahmad, Z., Ansell, M., Smedley, D., Tahir, P.M., 2012. Creep Behavior of Epoxy-Based Adhesive Reinforced with Nanoparticles for Bonded-In Timber Connection. *J. Mater. Civ. Eng.* 24, 825–831. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000453](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000453)
- Aicher, S., Ohnesorge, D., 2011. Shear strength of glued laminated timber made from European beech timber. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 69, 143–154. <https://doi.org/10.1007/s00107-009-0399-9>
- Aicher, S., Reinhardt, H.-W., 2007. Delamination properties and shear strength of glued beech wood laminations with red heartwood. *Holz Als Roh- Werkst.* 65, 125–136. <https://doi.org/10.1007/s00107-006-0135-7>
- Aicher, S., Stapf, G., 2014. Glulam from European White Oak: Finger Joint Influence on Bending Size Effect, in: Aicher, S., Reinhardt, H.-W., Garrecht, H. (Eds.), *Materials and Joints in Timber Structures*, RILEM Bookseries. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 641–656. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5\\_58](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5_58)
- Aires, A., 2020. *Tannins: Structural Properties, Biological Properties and Current Knowledge*. 148p. Intechopen. ISBN 978-1-78984-797-0.
- Albert, L., Hofmann, T., Németh, Zs.I., Rétfalvi, T., Koloszar, J., Varga, Sz., Csepregi, I., 2003. Radial variation of total phenol content in beech (*Fagus sylvatica* L.) wood with and without red heartwood. *Holz Als Roh- Werkst.* 61, 227–230. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0381-x>
- Alhawamdeh, B., Shao, X., 2021. Fatigue performance of wood frame roof-to-wall connections with elastomeric adhesives under uplift cyclic loading. *Eng. Struct.* 229, 111602. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111602>
- Ali, S., Hussain, D.Ir.Dr.S.A., Mohd Tohir, M.Z., 2019. Fire Test and Effects of Fire Retardant on the Natural Ability of Timber: A Review. *Pertanika J. Sci. Technol.* 27.
- Ali, Y.A.Z., 2018. Flexural behavior of FRP strengthened concrete-wood composite beams. *Ain Shams Eng. J.* 9, 3419–3424. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.06.003>
- Aljanabi, M., Hunain, M., Alnomani, S., 2021. Experimental and Theoretical Studies of Last Ply Failure Analysis on the Laminate Polymer Composite Materials with Different Orientation and Stacking Sequence of Fibers Based on Classical Laminate Theory. *Kerbala J. Eng. Sci.* 1, 170–190.



- Alteyrac, J., Cloutier, A., Ung, C.-H., Zhang, S.Y., 2006. Mechanical Properties in Relation to Selected Wood Characteristics of Black Spruce. *Wood Fiber Sci.* 229–237.
- Ammann, S., Obersriebnig, M., Konnerth, J., Gindl-Altmutter, W., Niemz, P., 2014. Comparative adhesion analysis at glue joints in European beech and Norway spruce wood by means of nanoindentation. *Int. J. Adhes. Adhes.* 50, 45–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.12.023>
- Anca-Couce, A., Zobel, N., Berger, A., Behrendt, F., 2012. Smouldering of pine wood: Kinetics and reaction heats. *Combust. Flame* 159, 1708–1719. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.11.015>
- Angst, V., Malo, K.A., 2012. The effect of climate variations on glulam —an experimental study. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 70, 603–613. <https://doi.org/10.1007/s00107-012-0594-y>
- Angst-Nicollier, V., 2012. Moisture induced stresses in glulam: effect of cross section geometry and screw reinforcement. *Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for konstruksjonsteknikk. Doktoravhandling ved NTNU, 1503-8181; 2012:139.*
- Aratake, S., Morita, H., Arima, T., 2011. Bending creep of glued laminated timber (glulam) using sugi (*Cryptomeria japonica*) laminae with extremely low Young's modulus for the inner layers. *J. Wood Sci.* 57, 267–275. <https://doi.org/10.1007/s10086-011-1175-0>
- Aseeva, R., Serkov, B., Sivenkov, A., 2016. *Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings*, Softcover reprint of the original 1st ed. 2014 edition. ed. Springer.
- Assor, C., Placet, V., Chabbert, B., Habrant, A., Lapierre, C., Pollet, B., Perré, P., 2009. Concomitant Changes in Viscoelastic Properties and Amorphous Polymers during the Hydrothermal Treatment of Hardwood and Softwood. *J. Agric. Food Chem.* 57, 6830–6837. <https://doi.org/10.1021/jf901373s>
- ASTM D3737, 2018. *Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Structural Glued Laminated Timber (Glulam)*. American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken.
- Atiku, F.A., Lea-Langton, A.R., Bartle, K.D., Jones, J.M., Williams, A., Burns, I., Humphries, G., 2017. Some Aspects of the Mechanism of Formation of Smoke from the Combustion of Wood. *Energy Fuels* 31, 1935–1944. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02639>
- Awoyemi, L., Femi-Ola, T.O., Aderibigbe, E.Y., 2010. Pre-freezing as a pre-treatment for thermal modification of wood. Part 2: surface properties and termite resistance. *J. Indian Acad. Wood Sci.* 7, 19–24. <https://doi.org/10.1007/s13196-010-0004-1>
- Ayrilmis, N., Buyuksari, U., As, N., 2010. Bending strength and modulus of elasticity of wood-based panels at cold and moderate temperatures. *Cold Reg. Sci. Technol.* 63, 40–43. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.05.004>
- Babrauskas, V., 2016. Heat Release Rates, in: Hurley, M.J., Gottuk, D., Hall, J.R., Harada, K., Kuligowski, E., Puchovsky, M., Torero, J., Watts, J.M., Wieczorek, C. (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer, New York, NY, pp. 799–904. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0\\_26](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_26)
- Bachtiar, E.V., Clerc, G., Brunner, A.J., Kaliske, M., Niemz, P., 2017. Static and dynamic tensile shear test of glued lap wooden joint with four different types of adhesives. *Holzforschung* 71, 391–396. <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0154>

- Bader, T.K., Ormarsson, S., 2023. Modeling the Mechanical Behavior of Wood Materials and Timber Structures, in: Niemz, P., Teischinger, A., Sandberg, D. (Eds.), Springer Handbook of Wood Science and Technology, Springer Handbooks. Springer International Publishing, Cham, pp. 507–568. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4_10)
- Bahtiar, E.T., Nugroho, N., Rahman, M.M., Arinana, Kartika Sari, R., Wirawan, W., Hermawan, D., 2017. Estimation the remaining service-lifetime of wooden structure of geothermal cooling tower. *Case Stud. Constr. Mater.* 6, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.001>
- Balász, I., Pešek, O., Bukovská, P., 2020. Hardwood - Softwood Combination in Glued Laminated Timber Cross-Section. <https://doi.org/10.35181/tces-2020-0002>
- Baranski, J., Chuchala, D., Orłowski, K., Muzinski, T., 2014. The influence of drying parameters on wood properties. *Ann. Wars. Univ. Life Sci.-SGGW For. Wood Technol.* 86.
- Barber, D., 2015. Tall Timber Buildings: What's Next in Fire Safety ? *Fire Technol.* 51, 1279–1284. <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0497-7>
- Barbero, E.J., 2011. Introduction to Composite Materials Design, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781439894132>
- Bardak, S., Tiryaki, S., Nemli, G., Aydın, A., 2016. Investigation and neural network prediction of wood bonding quality based on pressing conditions. *Int. J. Adhes. Adhes.* 68, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.02.010>
- Bartlett, A.I., Hadden, R.M., Bisby, L.A., 2019. A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. *Fire Technol.* 55, 1–49. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0787-y>
- Beaud, F., Niemz, P., Pizzi, A., 2006. Structure–property relationships in one-component polyurethane adhesives for wood: Sensitivity to low moisture content. *J. Appl. Polym. Sci.* 101, 4181–4192. <https://doi.org/10.1002/app.24334>
- 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, 6173. <https://doi.org/10.3390/ma16186173>
- Bert, C.W., 1989. Classical Lamination Theory, in: Pendleton, R.L., Tuttle, M.E. (Eds.), *Manual on Experimental Methods for Mechanical Testing of Composites*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 11–16. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-1129-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-009-1129-1_3)
- Bhavikatti, S.S., 2005. Finite element analysis. New Age International.334p. ISBN 812241589X, 9788122415896
- Bibalani, G.H., Bazhrang, Z., Mohsenifar, H., Joodi, L., 2008. The side roots pulling effect of alder (*Alnus glutinosa*) on river bank soil strong in North Iran. *International Journal of Botany* 2008.
- 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. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 78, 449–459. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01520-1>
- 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. *Int. J. Adhes. Adhes.* 91, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.03.001>
- Bodig, J., Jayne, B.A., 1982. *Mechanics of Wood and Wood Composites*, First Edition. ed. Van Nostrand Reinhold, New York. 712p. ISBN 9780442008222

- Böger, T., Sanchez-Ferrer, A., Richter, K., 2022. Hydroxymethylated resorcinol (HMR) primer to improve the performance of wood-adhesive bonds – A review. *Int. J. Adhes. Adhes.* 113, 103070. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.103070>
- Borrega, M., Kärenlampi, P.P., 2011. Cell Wall Porosity in Norway Spruce Wood as Affected by High-Temperature Drying. *Wood Fiber Sci.* 206–214.
- Borůvka, V., Novák, D., Šedivka, P., 2020. Comparison and Analysis of Radial and Tangential Bending of Softwood and Hardwood at Static and Dynamic Loading. *Forests* 11, 896. <https://doi.org/10.3390/f11080896>
- Bowyer, J., Bratkovich, S., Howe, J., Fernholz, K., Frank, M., Hanessian, S., Groot, H., 2016. Modern tall wood buildings: opportunities for innovation. Dovetailpartners, inc, Minneapolis, MN, USA.
- Brandmair, A., Clauß, S., Haß, P., Niemz, P., 2012. Verklebung von Laubhölzern mit 1K-PUR-Klebstoffen für den Holzbau. *Bauphysik* 34, 210–216. <https://doi.org/10.1002/bapi.201200025>
- Brandon, D., Dagenais, C., 2017. Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 5 – Experimental Study of Delamination of Cross Laminated Timber (CLT) in Fire.
- Brandon, D., Östman, B., 2016. Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 1 - Literature Review. Fire Protection Research Foundation, USA.
- Brožovský, J., Materna, A., 2012. Základy matematické teorie pružnosti. VŠB-TUO a Západočeská univerzita v Plzni. Ostrava. 2012.
- Brunone, F., Cucuzza, M., Imperadori, M., Vanossi, A., 2021. A New Taxonomic Perspective on Wood-Based Technologies for the Transformation of the AEC Sector, in: *Wood Additive Technologies, Springer Tracts in Civil Engineering.* Springer International Publishing, Cham, pp. 15–34. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78136-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78136-1_2)
- Burawska-Kupniewska, I., Mańkowski, P., Krzosek, S., 2021. Mechanical Properties of Machine Stress Graded Sawn Timber Depending on the Log Type. *Forests* 12, 532. <https://doi.org/10.3390/f12050532>
- Čabalová, I., Bélik, M., Kučerová, V., Jurczyková, T., 2021. Chemical and Morphological Composition of Norway Spruce Wood (*Picea abies*, L.) in the Dependence of Its Storage. *Polymers* 13, 1619. <https://doi.org/10.3390/polym13101619>
- Cabral, J.P., Kafle, B., Subhani, M., Reiner, J., Ashraf, M., 2022. Densification of timber: a review on the process, material properties, and application. *J. Wood Sci.* 68, 20. <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02028-3>
- Calams, S., 2020. What is fire made of? FireRescue1.[online]. dostupné z: <https://www.firerescue1.com/firefighter-training/articles/what-is-fire-made-of-8GVclowtNF9mOGPm/> (navštíveno 11.8.23).
- Campean, M., Ispas, M., Porojan, M., 2008. Considerations on Drying Frozen Spruce Wood and Effects upon Its Properties. *Dry. Technol.* 26, 596–601. <https://doi.org/10.1080/07373930801946411>
- Čapka, R., 2023. Nové limity pro emise formaldehydu – poloviční hodnoty evropské klasifikace E1 - Drevmag.com. [online]. dostupné z: <https://drevmag.com/cs/2023/08/09/nove-limity-pro-emise-formaldehydu-polovicni-hodnoty-evropske-klasifikace-e1/> (navštíveno 9.24.23).
- Carll, C., Wiedenhoef, A., 2023. Moisture-Related Properties of Wood and the Effects of Moisture on Wood and Wood Products.
- Carrera, E., Giunta, G., Petrolo, M., 2011. *Beam Structures: Classical and Advanced Theories.* John Wiley & Sons. 204p. ISBN: 978-0-470-97200-7

- Caudullo, G., Tinner, W., de Rigo, D., 2016. *Picea abies* in Europe: distribution, habitat, usage and threats In: San-Miguel-Ayanz, J.; de Rigo, D.; Caudullo, G.; Houston Durrant, T.; Mauri, A. (eds.) *European Atlas of Forest Tree Species* (pp. 114-116). Luxembourg: ISBN:978-92-79-52833-0.
- Čermák, P., Dejmál, A., Paschová, Z., Kymäläinen, M., Dömény, J., Brabec, M., Hess, D., Rautkari, L., 2019. One-sided surface charring of beech wood. *J. Mater. Sci.* 54, 9497–9506. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03589-3>
- Chattopadhyay, D.K., Webster, D.C., 2009. Thermal stability and flame retardancy of polyurethanes. *Prog. Polym. Sci.* 34, 1068–1133. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.06.002>
- Chen, W.F., Lui, E.M., 2005. *Handbook of Structural Engineering*. CRC Press. 1764p. ISBN: 9780849315695
- Chen, Y., Shen, J., Wang, W., Lin, L., Lv, R., Zhang, S., Ma, J., 2023. Demethylation of lignin with mild conditions and preparation of green adhesives to reduce formaldehyde emissions and health risks. *Int. J. Biol. Macromol.* 242, 124462. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124462>
- Cheng, F., Hu, Y., 2011. Nondestructive test and prediction of MOE of FRP reinforced fast-growing poplar glulam. *Compos. Sci. Technol.* 71, 1163–1170. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.04.007>
- Chiniforush, A.A., Akbarnezhad, A., Valipour, H., Malekmohammadi, S., 2019. Moisture and temperature induced swelling/shrinkage of softwood and hardwood glulam and LVL: An experimental study. *Constr. Build. Mater.* 207, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.114>
- Christjanson, P., Pehk, T., Paju, J., 2010. Structure and curing mechanism of resol phenol-formaldehyde prepolymer resins. *Proc. Est. Acad. Sci. - Proc Est Acad Sci* 59. <https://doi.org/10.3176/proc.2010.3.05>
- Chrobak, J., Howska, J., Chrobok, A., 2022. Formaldehyde-Free Resins for the Wood-Based Panel Industry: Alternatives to Formaldehyde and Novel Hardeners. *Molecules* 27, 4862. <https://doi.org/10.3390/molecules27154862>
- Claessens, H., Oosterbaan, A., Savill, P., Rondeux, J., 2010. A review of the characteristics of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) and their implications for silvicultural practices. *For. Int. J. For. Res.* 83, 163–175. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpp038>
- Clauß, S., Gabriel, J., Karbach, A., Matner, M., Niemz, P., 2011a. Influence of the adhesive formulation on the mechanical properties and bonding performance of polyurethane prepolymers 65, 835–844. <https://doi.org/10.1515/HF.2011.095>
- Clauß, S., Joscak, M., Niemz, P., 2011b. Thermal stability of glued wood joints measured by shear tests. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 69, 101–111. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0411-4>
- Clerc, G., Brülisauer, M., Affolter, S., Volkmer, T., Pichelin, F., Niemz, P., 2017. Characterization of the ageing process of one-component polyurethane moisture curing wood adhesive. *Int. J. Adhes. Adhes.* 72, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.09.008>
- Clerc, G., Brunner, A.J., Josset, S., Niemz, P., Pichelin, F., Van de Kuilen, J.W.G., 2019. Adhesive wood joints under quasi-static and cyclic fatigue fracture Mode II loads. *Int. J. Fatigue* 123, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.008>
- Cognard, P., 2006. *Handbook of Adhesives and Sealants: General Knowledge, Application of Adhesives, New Curing Techniques*. Elsevier. 512p. ISBN: 978-0080447087

- Concu, G., 2017. Wood in Civil Engineering. InTechOpen. 248p.  
ISBN: 978-9535129851
- Construct, 2020. Trámy Glulam | Construct [online]. dostupné z:  
<https://www.construct.ee/cs/tramy-glulam> (navštíveno 11.15.23).
- Crocetti, R., Gustafsson, P.J., Danielsson, H., Emilsson, A., Ormarsson, S., 2010.  
Experimental and numerical investigation on the shear strength of glulam.  
Presented at the International Council for Research and Innovation in Building  
and construction, Nelson, New Zealand, University of Canterbury.
- ČSN 73 0802, 2009. Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty. Czech  
Standardization Agency, Prague, Czech Republic.
- ČSN EN 205, 2003. Adhesives – Wood adhesives for non-structural applications –  
Determination of tensile shear strength of lap joints. Office for Standardization  
and Measurement, Prague, Czech Republic.
- ČSN EN 302-1, 2013. Adhesives for load-bearing timber structures - Test methods -  
Part 1: Determination of longitudinal tensile shear strength. Czech  
Standardization Agency, Prague, Czech Republic.
- ČSN EN 338, 2016. Structural timber - Strength classes. Czech Standardization  
Agency, Prague, Czech Republic.
- ČSN EN 408 + A1, 2012. Timber structures – Structural timber and glued laminated  
timber – Determination of some physical and mechanical properties. Czech  
Standardization Agency, Prague, Czech Republic.
- ČSN EN 1995-1-1, 2006. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General -  
Common rules and rules for buildings. Czech Standardization Agency, Prague,  
Czech Republic.
- ČSN EN 1995-1-2, 2006. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General -  
Structural fire design. Czech Standardization Agency, Prague, Czech Republic.
- ČSN EN 13501-2, 2023. Fire classification of construction products and building  
elements - Part 2: Classification using test data from resistance fire tests,  
excluding ventilation services. Czech Standardization Agency, Prague, Czech  
Republic.
- ČSN EN 13823, 2022. Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stavební  
výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého  
hořícího předmětu. Czech Standardization Agency, Prague, Czech Republic.
- ČSN EN 14080, 2013. Timber structures – Glued laminated timber and glued solid  
timber – Requirements. Czech Standardization Agency, Prague, Czech  
Republic.
- ČSN EN 15425, 2017. Adhesives - One component polyurethane for load bearing  
timber structures - Classification and performance requirements. Czech  
Standardization Agency, Prague, Czech Republic.
- ČSN EN ISO 527-1, 2020. Plastics - Determination of tensile properties - Part 1:  
General principles. Czech Standardization Agency, Prague, Czech Republic.
- ČSN EN ISO 527-2, 2012. Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test  
conditions for moulding and extrusion plastics. Czech Standardization Agency,  
Prague, Czech Republic.
- ČSN EN ISO 9239-1, 2010. Zkoušení reakce podlahových krytin na oheň – Část 1:  
Stanovení chování při hoření užitím zdroje sálavého tepla. Czech  
Standardization Agency, Prague, Czech Republic.
- ČSN EN ISO 11925-2, 2020. Zkoušení reakce na oheň – Zápalnost stavebních výrobků  
vystavených přímému působení plamene – Část 2: Zkouška malým zdrojem  
plamene. Czech Standardization Agency, Prague, Czech Republic.

- Cuevas, J., Torero, J.L., Maluk, C., 2021. Flame extinction and burning behaviour of timber under varied oxygen concentrations. *Fire Saf. J., Fire Safety Science: Proceedings of the 13th International Symposium* 120, 103087. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103087>
- Custódio, J., Broughton, J., Cruz, H., 2009. A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. *Int. J. Adhes. Adhes.* 29, 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.03.002>
- da Silva, L.F.M., Adams, R.D., 2008. Effect of temperature on the mechanical and bonding properties of a carbon-reinforced bismaleimide. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Mater. Des. Appl.* 222, 45–52. <https://doi.org/10.1243/14644207JMDA142>
- Dahle, G., James, K., Kane, B., Grabosky, J., Detter, A., 2017. A Review of Factors That Affect the Static Load-Bearing Capacity of Urban Trees. *Arboric. Urban For.* 43, 89–106. <https://doi.org/10.48044/jauf.2017.009>
- Danielski, I., Fröling, M., 2015. Diagnosis of Buildings' Thermal Performance - A Quantitative Method Using Thermography Under Non-steady State Heat Flow. *Energy Procedia, Sustainability in Energy and Buildings: Proceedings of the 7th International Conference SEB-15* 83, 320–329. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.186>
- Das, A.K., Islam, Md.N., Faruk, Md.O., Ashaduzzaman, Md., Dungani, R., 2020. Review on tannins: Extraction processes, applications and possibilities. *South Afr. J. Bot.* 135, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.08.008>
- De Almeida, D.H., Schmitt Cavalheiro, R., Borges De Macêdo, L., Calil Neto, C., Luis Christoforo, A., Calil Junior, C., Antonio Rocco Lahr, F., 2014. Evaluation of Quality in the Adhesion of Glued Laminated Timber (Glulam) of Paricá and Lyptus Wood Species. *Int. J. Mater. Eng.* 4, 114–118. <https://doi.org/10.5923/j.ijme.20140403.07>
- de Castro San Román, J., 2005. Experiments on Epoxy, Polyurethane and ADP Adhesives. Composite Construction Lab, École polytechnique fédérale de Lausanne.
- de Oliveira, R.G.E., Gonçalves, F.G., Segundinho, P.G. de A., Oliveira, J.T. da S., Paes, J.B., Chaves, I.L.S., Brito, A.S., de Oliveira, R.G.E., Gonçalves, F.G., Segundinho, P.G. de A., Oliveira, J.T. da S., Paes, J.B., Chaves, I.L.S., Brito, A.S., 2020. Analysis of glue line and correlations between density and anatomical characteristics of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* glulam. *Maderas Cienc. Tecnol.* 22, 495–504. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000408>
- Demirbas, A., 2016. Conversion of black alder (*Alnus glutinosa* L.) in supercritical solvents. *Energy Sources Part Recovery Util. Environ. Eff.* 38, 1393–1399. <https://doi.org/10.1080/15567036.2014.949918>
- Dewi, S.M., Soehardjono, A., 2018. Performance of glue laminated timber beams composed of sengon wood (*Albizia falcatara*) and coconut wood (*Cocos nucifera*) with nylon-threads reinforcement. *MATEC Web Conf.* 195, 02029. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819502029>
- Dhakal, P.J.M., Rajesh P. (Ed.), 2020. Progress in Mechanics of Structures and Materials: Proceedings of the 19th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM19), Christchurch, New Zealand, 29 November - 1 December 2006. CRC Press, London. <https://doi.org/10.1201/9781003060888>

- Di Blasi, C., 2008. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Prog. Energy Combust. Sci.* 34, 47–90.  
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.12.001>
- Di Blasi, C., Branca, C., Santoro, A., Gonzalez Hernandez, E., 2001. Pyrolytic behavior and products of some wood varieties. *Combust. Flame* 124, 165–177.  
[https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(00\)00191-7](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(00)00191-7)
- Dietsch, P., Franke, S., Franke, B., Gamper, A., Winter, S., 2015. Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. *J. Civ. Struct. Health Monit.* 5, 115–127. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0082-7>
- Dillard, D.A., 2010. *Advances in Structural Adhesive Bonding*. Elsevier. 658p. ISBN: 9781845698058
- Ding, W.-D., Koubaa, A., Chaala, A., Belem, T., Krause, C., 2008. Relationship between wood porosity, wood density and methyl methacrylate impregnation rate. *Wood Mater. Sci. Eng.* 3, 62–70.  
<https://doi.org/10.1080/17480270802607947>
- Dorieh, A., Ayilimis, N., Farajollah Pour, M., Ghafari Movahed, S., Valizadeh Kiamahalleh, M., Shahavi, M.H., Hatefnia, H., Mehdiinia, M., 2022. Phenol formaldehyde resin modified by cellulose and lignin nanomaterials: Review and recent progress. *Int. J. Biol. Macromol.* 222, 1888–1907.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.279>
- Drake, G., Berry, M., Schroeder, D., 2015. Effect of cold temperatures on the shear behavior of glued laminated beams. *Cold Reg. Sci. Technol.* 112, 45–50.  
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.01.002>
- Drysdale, D., 2011. *An Introduction to Fire Dynamics*, 3rd. ed. John Wiley & Sons, Ltd. 576p. ISBN: 978-0-470-31903-1
- Du, H., Yuan, S., Liu, P., Hu, X., Han, G., 2022. Experimental and Finite Element Study on Bending Performance of Glulam-Concrete Composite Beam Reinforced with Timber Board. *Materials* 15, 7998.  
<https://doi.org/10.3390/ma15227998>
- Dunky, M. (Ed.), 2017. *Adhesives in the Wood Industry*, in: *Handbook of Adhesive Technology*. CRC Press. 658p. ISBN: 9781315120942.
- Eckelman, C.A., 1999. *A Brief Survey of Wood Adhesives*. Purdue University Cooperative Extension Service, West Lafayette.
- Ecohousemart, 2023. Cross Laminated Timber. Advantages | EcoHouseMart. [online]. dostupné z: <https://ecohousemart.com/what-is-cross-laminated-timber/> (navštíveno 11.15.23).
- Ehrhart, T., Steiger, R., Lehmann, M., Frangi, A., 2020. European beech (*Fagus sylvatica* L.) glued laminated timber: lamination strength grading, production and mechanical properties. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 78, 971–984.  
<https://doi.org/10.1007/s00107-020-01545-6>
- Eitelberger, J., Hofstetter, K., 2011. Prediction of transport properties of wood below the fiber saturation point – A multiscale homogenization approach and its experimental validation: Part I: Thermal conductivity. *Compos. Sci. Technol.* 71, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.11.007>
- Emberley, R., Do, T., Yim, J., Torero, J.L., 2017a. Critical heat flux and mass loss rate for extinction of flaming combustion of timber. *Fire Saf. J., Fire Safety Science: Proceedings of the 12th International Symposium* 91, 252–258.  
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.008>
- Emberley, R., Inghelbrecht, A., Yu, Z., Torero, J.L., 2017b. Self-extinction of timber. *Proc. Combust. Inst.* 36, 3055–3062. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.077>

- Ermakov, V., Stepanova, E., 2020. Moisture content and its influence on glued timber structures. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 869, 052015.  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/5/052015>
- Evans, J.D., 1996. *Straightforward statistics for the behavioral sciences*, Straightforward statistics for the behavioral sciences. Thomson Brooks/Cole Publishing Co, Belmont, CA, US.
- Falkner, H., Teutsch, M., 2006. Die Tragfähigkeit verleimter Brettschichtholzbinder in Abhängigkeit von der Temperatureinwirkung. *Bautechnik* 83, 391–393.  
<https://doi.org/10.1002/bate.200610032>
- Faris, A.H., 2021. Fillers in Wood Adhesives, in: *Fillers*. IntechOpen.  
<https://doi.org/10.5772/intechopen.92150>
- Ferrier, E., Labossière, P., Neale, K.W., 2012. Modelling the bending behaviour of a new hybrid glulam beam reinforced with FRP and ultra-high-performance concrete. *Appl. Math. Model.* 36, 3883–3902.  
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.11.062>
- Fink, J.K., 2017. *Reactive Polymers: Fundamentals and Applications: A Concise Guide to Industrial Polymers*, 3rd edition. ed. William Andrew, Amsterdam Netherlands ; Boston [MA]. ISBN: 9780128145098.
- Frangi, A., Fontana, M., Mischler, A., 2004. Shear behaviour of bond lines in glued laminated timber beams at high temperatures. *Wood Sci. Technol.* 38, 119–126.  
<https://doi.org/10.1007/s00226-004-0223-y>
- Franke, B., Franke, S., Schiere, M., Müller, A., 2019. Moisture content and moisture-induced stresses of large glulam members: laboratory tests, in-situ measurements and modelling. *Wood Mater. Sci. Eng.* 14, 243–252.  
<https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1551930>
- Fredriksson, M., Cool, J., Duchesne, I., Belley, D., 2017. Knot detection in computed tomography images of partially dried jack pine (*Pinus banksiana*) and white spruce (*Picea glauca*) logs from a Nelder type plantation. *Can. J. For. Res.* 47, 910–915. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0423>
- Frese, M., Blaß, H.J., 2007. Characteristic bending strength of beech glulam. *Mater. Struct.* 40, 3–13. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9117-9>
- Frese, M., Blaß, H.J., 2006. Die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Buche (*Fagus silvatica*L.). *Holz Als Roh- Werkst.* 64, 433–443.  
<https://doi.org/10.1007/s00107-006-0144-6>
- Frihart, C., 2023. Why Do Some Wood-Adhesive Bonds Respond Poorly To Accelerated Moisture- Resistant Tests?
- Frihart, C.R., 2009. Adhesive Groups and How They Relate to the Durability of Bonded Wood. *J. Adhes. Sci. Technol.* 23, 601–617.  
<https://doi.org/10.1163/156856108X379137>
- Frihart, C.R., Konnerth, J., Frangi, A., Gottlöber, C., Jockwer, R., Pichelin, F., 2023. Joining and Reassembling of Wood, in: *Springer Handbook of Wood Science and Technology*. Springer, pp. 707–791. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4_14).
- Friquin, K.L., 2011. Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. *Fire Mater.* 35, 303–327.  
<https://doi.org/10.1002/fam.1055>
- Gamble, C.E., Schopf, M., 2010. Heat Transfer Fluid Leaks: Break the Fire Triangle. *Chemical engineering*. Solutia Inc. [online]. dostupné z: <https://www.chemengonline.com/heat-transfer-fluid-leaks-break-the-fire-triangle/?printmode=1>. (navštíveno 2.5.2024).



- Gehri, E., 1985. Verbindungstechniken mit hoher leistungsfähigkeit—Stand und entwicklung. *Holz Als Roh- Werkst.* 43, 83–88.  
<https://doi.org/10.1007/BF02607032>
- George, Ş.A., Constantin, N., 2013. Algorithms Applied In Flame Temperature Calculation. *Annals. Computer Science Series.* 11th Tome 1st Fasc.
- Gindl, W., Schöberl, T., 2004. The significance of the elastic modulus of wood cell walls obtained from nanoindentation measurements. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 35, 1345–1349. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.04.002>
- Glass, S., Zelinka, S., 2021. Moisture relations and physical properties of wood. In *Forest Products Laboratory. 2021. 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. 543 p.
- Gollner, M.J., Miller, C.H., Tang, W., Singh, A.V., 2017. The effect of flow and geometry on concurrent flame spread. *Fire Saf. J., Fire Safety Science: Proceedings of the 12th International Symposium* 91, 68–78.  
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.007>
- Gollob, L., Wellons, J.D., 1990. Wood Adhesion, in: Skeist, I. (Ed.), *Handbook of Adhesives.* Springer US, Boston, MA, pp. 598–610. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0671-9\\_36](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0671-9_36)
- Gong, J., Yang, L., 2022. A Review on Flaming Ignition of Solid Combustibles: Pyrolysis Kinetics, Experimental Methods and Modelling. *Fire Technol.*  
<https://doi.org/10.1007/s10694-022-01339-7>
- Gong, X., Meng, Y., Lu, J., Tao, Y., Cheng, Y., Wang, H., 2022. A Review on Lignin-Based Phenolic Resin Adhesive. *Macromol. Chem. Phys.* 223, 2100434.  
<https://doi.org/10.1002/macp.202100434>
- Gorbett, G.E., Kozhumal, S.P., 2023. Fire Fundamentals, in: Meacham, B.J., McNamee, M. (Eds.), *Handbook of Fire and the Environment: Impacts and Mitigation, The Society of Fire Protection Engineers Series.* Springer International Publishing, Cham, pp. 55–100. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-94356-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-94356-1_3)
- Gravit, M., Simonenko, Y., Larionov, A., 2019. Method single burning item (SBI) for fire hazard of wood constructions. *E3S Web Conf.* 91, 02049.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199102049>
- Green, D.W., Evans, J.W., 2003. Effect of Low Relative Humidity on Properties of Structural Lumber Products. *Wood Fiber Sci.* 247–265.
- Gu, H., Zink-Sharp, A., 2005. Geometric model for softwood transverse thermal conductivity. Part I. *Wood Fiber Sci.* 699–711.
- Halama, R., Adámková, L., Fojtík, F., Frýdešek, K., Šofer, M., Rojíček, J., Fusek, M., 2011. Pružnost a pevnost. *Vysoká škola báňská–Technická univerzita Ostrava a Západočeská univerzita v Plzni.*
- Hanewinkel, M., Cullmann, D.A., Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Zimmermann, N.E., 2013. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nat. Clim. Change* 3, 203–207. <https://doi.org/10.1038/nclimate1687>
- Hanhijarvi, A., Ranta-Maunus, A., Turk, G., 2005. Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques. *Vtt Publ.* 568.
- Hartig, J., Haller, P., 2023. Investigations On Multifunctional Timber Elements Impregnated With Paraffinic Phase Change Materials, in: *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023).* Presented at the World Conference on Timber Engineering 2023 (WCTE2023), World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), Oslo, Norway, pp. 621–628.  
<https://doi.org/10.52202/069179-0085>

- Hassani, M.M., Wittel, F.K., Ammann, S., Niemz, P., Herrmann, H.J., 2016. Moisture-induced damage evolution in laminated beech. *Wood Sci. Technol.* 50, 917–940. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0821-5>
- Hassegawa, M., Savard, M., Lenz, P.R.N., Duchateau, E., Gélinas, N., Bousquet, J., Achim, A., 2020. White spruce wood quality for lumber products: priority traits and their enhancement through tree improvement. *For. Int. J. For. Res.* 93, 16–37. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz050>
- Hasslacher Norica Timber, 2023. Glued solid timber DUO/TRIO. [online]. dostupné z: <https://www.hasslacher.com/laminated-beams-duo-trio> (navštíveno 11.15.23).
- Hein, P.R.G., Brancheriau, L., 2018. Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of Eucalyptus specimens. *Maderas Cienc. Tecnol.* 20, 333–342. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005003401>
- Heinze, T., 2016. Cellulose: Structure and Properties, in: Rojas, O.J. (Ed.), *Cellulose Chemistry and Properties: Fibers, Nanocelluloses and Advanced Materials, Advances in Polymer Science*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–52. [https://doi.org/10.1007/12\\_2015\\_319](https://doi.org/10.1007/12_2015_319)
- Hejtmánek, P., Najmanová, H., Pokorný, M., 2016. Požární odolnost stavebních konstrukcí. TZB-Info. [online]. dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/13655-pozarni-odolnost-stavebnich-konstrukci> (navštíveno 11.11.23).
- Hernández, R.E., Passarini, L., Koubaa, A., 2014. Effects of temperature and moisture content on selected wood mechanical properties involved in the chipping process. *Wood Sci. Technol.* 48, 1281–1301. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0673-9>
- Herzele, S., van Herwijnen, H.W.G., Griesser, T., Gindl-Altmutter, W., Rößler, C., Konnerth, J., 2020. Differences in adhesion between 1C-PUR and MUF wood adhesives to (ligno)cellulosic surfaces revealed by nanoindentation. *Int. J. Adhes. Adhes.* 98, 102507. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102507>
- Hietz, P., Rosner, S., Scheicher, K., 2023. The three-dimensional structure of wood enables horizontal water transport needed to conduct water around lesions. *Sci. Rep.* 13, 15057. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41817-8>
- Hietz, P., Valencia, R., Joseph Wright, S., 2013. Strong radial variation in wood density follows a uniform pattern in two neotropical rain forests. *Funct. Ecol.* 27, 684–692. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12085>
- Hillis, W.E., 1984. High temperature and chemical effects on wood stability. *Wood Sci. Technol.* 18, 281–293. <https://doi.org/10.1007/BF00353364>
- Horáček, P., 2008. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 124s. ISBN: 80-7157-347-7.
- Hossain, M.J., Ghosh, R.K., Das, A.K., Nath, S.C., Islam, Md.R., Akhter, S., Rahman, Md.S., 2023. Investigation of the chemical profiles of seven wood species for their potential applications. *Wood Mater. Sci. Eng.* 18, 650–655. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2058413>
- Hsieh, T.-Y., Chang, F.-C., 2018. Effects of moisture content and temperature on wood creep. *Holzforschung* 72, 1071–1078. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0056>
- Huang, Z., Cooper, P., Wang, X., Wang, X.-M., Zhang, Y., Casilla, R., 2010. Effects of Conditioning Exposure on the pH Distribution Near Adhesive-Wood Bond Lines. *Wood Fiber Sci.* 219–228.

- Hung Anh, L.D., Pásztor, Z., 2021. An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *J. Build. Eng.* 44, 102604. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102604>
- Huss, J., Butler Manning, D., 2003. Natural Regeneration of Beech Forests in Europe. Germany: Approaches Problems, Recent Advances and Recommendations. *Nat-Man. Nat-Man Working Report No. 41.* 12p.
- IHS Markit, 2020. Sharing insights elevates their impact. *SP Glob.* [online]. dostupné z: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/amino-resins-chemical-economics-handbook.html> (navštíveno 9.19.23).
- ISO 5658-2, 2006. Reaction to fire tests - Spread of flame - Part 2: Lateral spread on building and transport products in vertical configuration. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO 5660-1, 2015. Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Iswanto, A.H., Simarmata, J., Fatriasari, W., Azhar, I., Sucipto, T., Hartono, R., 2017. Physical and Mechanical Properties of Three-layer Particleboards Bonded With UF and UMF Adhesives. *J. Korean Wood Sci. Technol.* 45, 787–796. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2017.45.6.787>
- Ivković, M., Gapare, W., Wu, H., Espinoza, S., Rozenberg, P., 2013. Influence of cambial age and climate on ring width and wood density in *Pinus radiata* families. *Ann. For. Sci.* 70, 525–534. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0290-z>
- Iždinský, J., Reinprecht, L., Sedliačik, J., Kúdela, J., Kučerová, V., 2021. Bonding of Selected Hardwoods with PVAc Adhesive. *Appl. Sci.* 11, 67. <https://doi.org/10.3390/app11010067>
- Jakob, M., Mahendran, A.R., Gindl-Altmatter, W., Bliem, P., Konnerth, J., Müller, U., Veigel, S., 2022. The strength and stiffness of oriented wood and cellulose-fibre materials: A review. *Prog. Mater. Sci.* 125, 100916. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100916>
- Janssens, M.L., 2005. Chapter 10 - Material flammability, in: Kutz, M. (Ed.), *Handbook of Environmental Degradation of Materials.* William Andrew Publishing, Norwich, NY, pp. 207–225. <https://doi.org/10.1016/B978-081551500-5.50012-4>
- Jäppinen, A., Beauregard, R., 2000. Comparing Grade Classification Criteria for Automatic Sorting of Norway Spruce Saw Logs. *Scand. J. For. Res.* 15, 464–471. <https://doi.org/10.1080/028275800750172718>
- Jeleč, M., Rajčić, V., 2018. Cross-laminated timber (CLT)—a state of the art report. *Gradjevinar* 70, 75–95.
- Ji, J., Cheng, Y., Yang, L., Guo, Z., Fan, W., 2006. An Integral Model for Wood Auto-ignition under Variable Heat Flux. *J. Fire Sci.* 24, 413–425. <https://doi.org/10.1177/0734904106062138>
- Jian, B., Cheng, K., Li, H., Ashraf, M., Zheng, X., Dauletbek, A., Hosseini, M., Lorenzo, R., Corbi, I., Corbi, O., Zhou, K., 2022. A Review on Strengthening of Timber Beams Using Fiber Reinforced Polymers. *J. Renew. Mater.* 10, 2073–2098. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.021983>
- Jiang, J., Li, P., Nisticò, N., 2019. Local and global prediction on stress-strain behavior of FRP-confined square concrete sections. *Compos. Struct.* 226, 111205. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111205>

- Jiang, J., Lu, J., Zhou, Y., Zhao, Y., Zhao, L., 2014. Compression Strength and Modulus of Elasticity Parallel to the Grain of Oak Wood at Ultra-low and High Temperatures. *BioResources* 9, 3571–3579. <https://doi.org/10.15376/biores.9.2.3571-3579>
- Jin, E., Chung, Y.-J., 2020. Fire risk assessment of cypress wood coated with metal oxide and metal silicate flame retardant using cone calorimeter. *J. Fire Sci.* 38, 504–521. <https://doi.org/10.1177/0734904120948215>
- Johansson, E., Johansson, D., Skog, J., Fredriksson, M., 2013. Automated knot detection for high speed computed tomography on *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* (L.) Karst. using ellipse fitting in concentric surfaces. *Comput. Electron. Agric.* 96, 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.06.003>
- Jones, R.M., 1999. *Mechanics of composite materials*, 2nd ed. ed. Taylor & Francis, Philadelphia, PA.
- Kačíková, D., Kačík, F., Čabalová, I., Ďurkovič, J., 2013. Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood. *Bioresour. Technol.* 144, 669–674. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.110>
- Kaiser, W., 2021. *Kunststoffchemie für Ingenieure*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG. 636p. ISBN: 978-3446446380.
- Kamke, F.A., Lee, J.N., 2007. Adhesive Penetration in Wood—a Review. *Wood Fiber Sci.* 205–220.
- Kamke, F.A., Nairn, J.A., 2023. 13 - Advances in structural wood products adhesive bonding, in: Dillard, D.A. (Ed.), *Advances in Structural Adhesive Bonding (Second Edition)*, Woodhead Publishing in Materials. Woodhead Publishing, pp. 417–455. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91214-3.00001-6>
- Kang, J.-H., Kondo, F., Katayama, Y., 2006. Human exposure to bisphenol A. *Toxicology* 226, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2006.06.009>
- Kantola, A., 2008. The structure of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) stems in relation to wood properties of sawn timber. *Diss. For.* 2008. <https://doi.org/10.14214/df.70>
- Karaszewski, Z., Mederski, P.S., Bembenek, M., Giefing, D.F., Sawicka, K., Gierszewska, M., 2015. Factors affecting the timber quality of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). *Ann. Wars. Univ. Life Sci.-SGGW For. Wood Technol.*
- Karlman, L., Mörling, T., Martinsson, O., 2005. Wood density, annual ring width and latewood content in larch and Scots pine. *Eurasian J. For. Res.* 8, 91–96.
- Kaufmann, H., Krötsch, S., Winter, S., 2022. Manual of Multistorey Timber Construction: Principles – Constructions – Examples, in: *Manual of Multistorey Timber Construction. DETAIL*. <https://doi.org/10.11129/9783955535827>
- Kawecki, B., Podgórski, J., 2018. Numerical model of glulam beam delamination in dependence on cohesive strength. *AIP Conf. Proc.* 1922, 050005. <https://doi.org/10.1063/1.5019059>
- Keey, R.B., Nijdam, J.J., 2002. Moisture Movement on Drying Softwood Boards and Kiln Design. *Dry. Technol.* 20, 1955–1974. <https://doi.org/10.1081/DRT-120015578>
- Khattabi, A., Steinhagen, P., 1993. Analysis of transient nonlinear heat conduction in wood using finite-difference solutions. *Holz Als Roh- Werkst.* 51, 272–278. <https://doi.org/10.1007/BF02629373>

- Kläusler, O., Bergmeier, W., Karbach, A., Meckel, W., Mayer, E., Clauß, S., Niemz, P., 2014a. Influence of N,N-dimethylformamide on one-component moisture-curing polyurethane wood adhesives. *Int. J. Adhes. Adhes.* 55, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.07.019>
- 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. *Int. J. Adhes. Adhes.* 44, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.01.015>
- Kläusler, O., Hass, P., Amen, C., Schlegel, S., Niemz, P., 2014b. Improvement of tensile shear strength and wood failure percentage of 1C PUR bonded wooden joints at wet stage by means of DMF priming. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 72, 343–354. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0786-8>
- Klement, I., Vilková, T., Uhrín, M., Barański, J., Konopka, A., 2019. Impact of high temperature drying process on beech wood containing tension wood. *Open Eng.* 9, 428–433. <https://doi.org/10.1515/eng-2019-0047>
- Knaggs, G., Xenopoulou, S., 2004. Guide to Irish hardwoods. Contents Foreword Timber Dry. Sched. Species Notes 4.
- Knapic, S., Louzada, J.L., Leal, S., Pereira, H., 2007. Radial variation of wood density components and ring width in cork oak trees. *Ann. For. Sci.* 64, 211–218. <https://doi.org/10.1051/forest:2006105>
- Knorz, M., 2015. Investigation of structurally bonded ash (*Fraxinus excelsior* L.) as influenced by adhesive type and moisture (PhD Thesis). Technische Universität München.
- Kollar, L.P., Springer, G.S., 2003. Mechanics of composite structures. Cambridge university press.480p. ISBN 1139439596, 9781139439596.
- Kollmann, F.F.P., Kuenzi, E.W., Stamm, A.J., 2012. Principles of Wood Science and Technology: II Wood Based Materials. Springer Science & Business Media. 703p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87931-9>. ISBN 978-3-642-87933-3.
- Kotlarewski, N.J., Belleville, B., Gusamo, B.K., Ozarska, B., 2016. Mechanical properties of Papua New Guinea balsa wood. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 74, 83–89. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0983-0>
- Krackler, V., Keunecke, D., Niemz, P., Hurst, A., 2011. Possible fields of hardwood application. *Wood Res* 56, 125–136.
- Krajnc, L., Farrelly, N., Harte, A.M., 2019. The effect of thinning on mechanical properties of Douglas fir, Norway spruce, and Sitka spruce. *Ann. For. Sci.* 76, 3. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0787-6>
- Krejsa, M., Lausová, L., Michalcová, V., 2012. Pružnost a plasticita. Technická univerzita Ostrava a Západočeská univerzita v Plzni.
- Kristak, L., Antov, P., Bekhta, P., Lubis, M.A.R., Iswanto, A.H., Reh, R., Sedliacik, J., Savov, V., Taghiyari, H.R., Papadopoulos, A.N., Pizzi, A., Hejna, A., 2023. Recent progress in ultra-low formaldehyde emitting adhesive systems and formaldehyde scavengers in wood-based panels: a review. *Wood Mater. Sci. Eng.* 18, 763–782. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2056080>
- Kúdela, J., Čunderlík, I., 2012. Bukové drevo - štruktúra, vlastnosti, použitie. Slovenská lesnícka a drevárska knižnica pri Technickej univerzite vo Zvolene, Zvolen.152s. ISBN 9788022823180.
- Kuka, E., Andersone, I., Kurnosova, N., Cirule, D., Andersons, B., Danieks, M., 2022. The potential of improving wood preservative penetration into glued wood products bonded with one-component polyurethane by discontinuous adhesive bondline design. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 80, 223–234. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01753-8>

- Kumar, R., Pizzi, A., 2019. Adhesives for wood and lignocellulosic materials, First edition. ed. John Wiley & Sons, Inc. ; Scrivener Publishing LLC, Hoboken, NJ, Salem, MA. ISBN: 9781119605669.
- Künniger, T., Clerc, G., Josset, S., Niemz, P., Pichelin, F., van de Kuilen, J.-W.G., 2019. Influence of humidity and frequency on the energy dissipation in wood adhesives. *Int. J. Adhes. Adhes.* 92, 99–104.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.05.003>
- Labuschagne, A., van Rensburg, N.F.J., van der Merwe, A.J., 2009. Comparison of linear beam theories. *Math. Comput. Model.* 49, 20–30.  
<https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.06.006>
- Lang, E.M., Bejo, L., Divos, F., Kovacs, Z., Anderson, R.B., 2003. Orthotropic Strength and Elasticity of Hardwoods in Relation to Composite Manufacture Part III: Orthotropic Elasticity of Structural Veneers. *Wood Fiber Sci.* 308–320.
- Laš, V., 2008. *Mechanika kompozitních materiálu*. Západočeská univerzita. Plzeň. ISBN 978-80-7043-689-9.
- Lee, W.-J., Hsiao, N.-C., Chen, Y.-C., 2023. Preparation of spherical phenol-formaldehyde beads from phenol-liquefied wood and the characteristics of carbonized materials. *J. Appl. Polym. Sci.* 140, e54236.  
<https://doi.org/10.1002/app.54236>
- Leggate, W., Shirmohammadi, M., McGavin, R.L., Chandra, K.A., Knackstedt, M., Knuefing, L., Turner, M., 2020. Influence of Wood's Anatomical and Resin Traits on the Radial Permeability of the Hybrid Pine (*Pinus elliottii* × *Pinus caribaea*) Wood in Australia. *BioResources* 15, 6851–6873.
- Lehringer, C., Gabriel, J., 2014. Review of Recent Research Activities on One-Component PUR-Adhesives for Engineered Wood Products, in: Aicher, S., Reinhardt, H.-W., Garrecht, H. (Eds.), *Materials and Joints in Timber Structures*, RILEM Bookseries. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 405–420.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5\\_37](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5_37)
- Li, J., Stoliarov, S.I., 2014. Measurement of kinetics and thermodynamics of the thermal degradation for charring polymers. *Polym. Degrad. Stab.*, Special Issue Based on the 14th European meeting on Fire Retardancy and Protection of Materials, held at Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Lille (U. Lille-1), France, July 2013 106, 2–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.022>
- Li, K., Hostikka, S., Dai, P., Li, Y., Zhang, H., Ji, J., 2017. Charring shrinkage and cracking of fir during pyrolysis in an inert atmosphere and at different ambient pressures. *Proc. Combust. Inst.* 36, 3185–3194.  
<https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.07.001>
- Li, W., Liu, C., Wang, X., Shi, J., Mei, C., Van den Bulcke, J., Van Acker, J., 2023. Understanding the impact of wood type and moisture on the bonding strength of glued wood. *Wood Mater. Sci. Eng.* 18, 303–313.  
<https://doi.org/10.1080/17480272.2021.2021448>
- Liang, Z., Lin, S., Huang, X., 2023. Smoldering ignition and emission dynamics of wood under low irradiation. *Fire Mater.* 47, 514–524.  
<https://doi.org/10.1002/fam.3107>
- Libralato, M., De Angelis, A., Saro, O., Qin, M., Rode, C., 2021. Effects of considering moisture hysteresis on wood decay risk simulations of building envelopes. *J. Build. Eng.* 42, 102444. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102444>

- Lin, S., Qin, Y., Huang, X., Gollner, M., 2023. Use of pre-charred surfaces to improve fire performance of wood. *Fire Saf. J.* 136, 103745. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103745>
- Liu, F., Yin, M., Xiong, B., Zheng, F., Mao, W., Chen, Z., He, C., Zhao, X., Fang, P., 2014. Evolution of microstructure of epoxy coating during UV degradation progress studied by slow positron annihilation spectroscopy and electrochemical impedance spectroscopy. *Electrochimica Acta* 133, 283–293. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.04.002>
- Liu, H., Gao, J., Chen, Y., 2015. Effects of pre-freezing prior to drying upon some physical and mechanical properties of Eucalyptus urophylla\times Eucalyptus grandis wood. *BioResources* 10, 6417–6427.
- Liu, Y., Guan, M., 2019. Selected physical, mechanical, and insulation properties of carbon fiber fabric-reinforced composite plywood for carriage floors. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 77, 995–1007. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01467-y>
- Lowden, L.A., Hull, T.R., 2013. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Sci. Rev.* 2, 4. <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-4>
- Lu, H.R., El Hanandeh, A., Gilbert, B.P., 2017. A comparative life cycle study of alternative materials for Australian multi-storey apartment building frame constructions: Environmental and economic perspective. *J. Clean. Prod.* 166, 458–473. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.065>
- Luedtke, J., Amen, C., van Ofen, A., Lehringer, C., 2015. 1C-PUR-bonded hardwoods for engineered wood products: influence of selected processing parameters. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 73, 167–178. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0875-8>
- Maćkowiak, P., Płaczek, D., Kotyk, M., 2018. Determination of design mechanical properties of adhesives in a tensile and compression test. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 393, 012027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012027>
- MacLeod, C.E., Law, A., Hadden, R.M., 2023. Quantifying the heat release from char oxidation in timber. *Fire Saf. J.* 138, 103793. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103793>
- Mannes, D., Sanabria, S., Funk, M., Wimmer, R., Kranitz, K., Niemz, P., 2014. Water vapour diffusion through historically relevant glutin-based wood adhesives with sorption measurements and neutron radiography. *Wood Sci. Technol.* 48, 591–609. <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0626-3>
- Mannes, D., Schmidt, J.-A., Niemz, P., Volkmer, T., 2012. Investigations on the influence of the adhesive type on the capillary water transport in wood parallel to the fibre direction. *Bauphysik* 34, 61–65.
- Marques, E.A.S., da Silva, L.F.M., Banea, M.D., Carbas, R.J.C., 2015. Adhesive Joints for Low- and High-Temperature Use: An Overview. *J. Adhes.* 91, 556–585. <https://doi.org/10.1080/00218464.2014.943395>
- Martinka, J., Hroncová, E., Chrebet, T., Balog, K., 2014. The influence of spruce wood heat treatment on its thermal stability and burning process. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 72, 477–486. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0805-9>
- Maulana, M.I., Lubis, M.A.R., Febrianto, F., Hua, L.S., Iswanto, A.H., Antov, P., Kristak, L., Mardawati, E., Sari, R.K., Zaini, L.H., Hidayat, W., Giudice, V.L., Todaro, L., 2022. Environmentally Friendly Starch-Based Adhesives for Bonding High-Performance Wood Composites: A Review. *Forests* 13, 1614. <https://doi.org/10.3390/f13101614>

- Melzerová, L., Šejnoha, M., Klapálek, P., 2014. Bending Tests and Simulations of GLT Beams. *Appl. Mech. Mater.* 611, 54–59.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.611.54>
- Menčík, J., 2019. *Aplikovaná mechanika materiálů*. Univerzita Pardubice, Pardubice. 195s. ISBN: 978-80-7560-226-8.
- Merline, D.J., Vukusic, S., Abdala, A.A., 2013. Melamine formaldehyde: curing studies and reaction mechanism. *Polym. J.* 45, 413–419.  
<https://doi.org/10.1038/pj.2012.162>
- Merryweather, G., Spearpoint, M.J., 2010. Flame spread measurements on wood products using the ASTM E 1321 LIFT apparatus and a reduced scale adaptation of the cone calorimeter. *Fire Mater.* 34, 109–136.  
<https://doi.org/10.1002/fam.1001>
- Michałowicz, J., 2014. Bisphenol A – Sources, toxicity and biotransformation. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 37, 738–758. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2014.02.003>
- Mihailović, V., Miric-Milosavljević, M., Djurković, M., Mladenović, G., Milosević, M., Trajković, I., 2022. Loading rate effects on MOE and MOR distributions in testing of small clear beech wood specimens. *BioResources* 17, 1818–1835.
- Miki, T., Sugimoto, H., Kojiro, K., Furuta, Y., Kanayama, K., 2012. Thermal behaviors and transitions of wood detected by temperature-modulated differential scanning calorimetry. *J. Wood Sci.* 58, 300–308. <https://doi.org/10.1007/s10086-012-1259-5>
- Mingeot, D., Husson, C., Mertens, P., Watillon, B., Bertin, P., Druart, P., 2016. Genetic diversity and genetic structure of black alder (*Alnus glutinosa* [L.] Gaertn) in the Belgium-Luxembourg-France cross-border area. *Tree Genet. Genomes* 12, 24.  
<https://doi.org/10.1007/s11295-016-0981-3>
- Missio, A.L., de Cademartori, P.H.G., Mattos, B.D., Santini, E.J., Haselein, C.R., Gatto, D.A., 2016. Physical and mechanical properties of fast-growing wood subjected to freeze-heat treatments. *BioResources* 11, 10378–10390.
- Mitchell, P.H., 2018. Calculating the Equilibrium Moisture Content for Wood Based on Humidity Measurements. *BioResources* 13, 171–175.
- Mittal, K.L. (Ed.), 2015. *Progress in Adhesion and Adhesives*, 1st edition. ed. Wiley-Scrivener, Salem. 512p. ISBN 978-1119162193.
- Mohd Yusof, N., Md Tahir, P., Muhammad Roseley, A.S., Lee, S.H., Abdul Halip, J., Mohammad Suffian James, R., Ashaari, Z., 2019. Bond integrity of cross laminated timber from *Acacia mangium* wood as affected by adhesive types, pressing pressures and loading direction. *Int. J. Adhes. Adhes.* 94, 24–28.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.05.010>
- Moore, J., 2011. Wood properties and uses of Sitka spruce in Britain. *Res. Rep. - For. Comm. Edinburgh. UK.* 60p. ISBN 978-0-85538-825-6.
- Moosavi, V., Khademi Eslam, H., Bazyar, B., Najafi, A., Talaeepoor, M., 2016. Bending Creep Behavior of Hornbeam Wood. *Drv. Ind.* 67, 341–350.  
<https://doi.org/10.5552/drind.2016.1609>
- Morrisset, D., Hadden, R.M., Bartlett, A.I., Law, A., Emberley, R., 2021. Time dependent contribution of char oxidation and flame heat feedback on the mass loss rate of timber. *Fire Saf. J., Fire Safety Science: Proceedings of the 13th International Symposium* 120, 103058.  
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103058>
- Morrisset, D., Santamaria, S., Hadden, R., Emberley, R., 2022. Implications of data smoothing on experimental mass loss rates. *Fire Saf. J.* 131, 103611.  
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103611>



- Muñoz, G.R., Lorenzo, J.Á.P., 2022. Intra-species variation in maximum moisture content, cell-wall density and porosity of hardwoods. *Holzforschung* 76, 955–966. <https://doi.org/10.1515/hf-2022-0042>
- Muraleedharan, A., Reiterer, S.M., 2016. Combined glued laminated timber using hardwood and softwood lamellas. Master thesis. Linnaeus University. 55p. URN: urn:nbn:se:lnu:diva-58628.
- Muthike, G.M., Githiomi, J.K., 2011. Choice And Utilization Of Adhesives In Wood Gluing Guidelines for users of Wood Adhesives. Kenya Forestry Research Institute. Forest Products Research Centre. Karura. 15p. ISSN 2221-674X.
- Myslicki, S., Vallée, T., Walther, F., 2016. Short-time procedure for fatigue assessment of beech wood and adhesively bonded beech wood joints. *Mater. Struct.* 49, 2161–2170. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0640-4>
- Na, B., Pizzi, A., Delmotte, L., Lu, X., 2005. One-component polyurethane adhesives for green wood gluing: Structure and temperature-dependent creep. *J. Appl. Polym. Sci.* 96, 1231–1243. <https://doi.org/10.1002/app.21529>
- Nakrani, D., Tiwari, M.K., Wani, T., Srivastava, G., 2023. Characterization of combustion of hardwood and softwood through experimental and computer simulations. *J. Therm. Anal. Calorim.* 148, 7727–7745. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12261-7>
- Ndong Bidzo, C.H., Moutou Pitti, R., Ikogou, S., Beat, K., Feldman Pambou Nziengui, C., Toussaint, E., Ango, S.E., 2021. Bonding Performance Of Tropical Multi Species Glued Solid Timber, in: World Conference On Timber Engineering. Santiago, Chile.
- Ndong Bidzo, C.H., Pambou Nziengui, C.F., Ikogou, S., Kaiser, B., Moutou Pitti, R., 2022. Mechanical properties of Glued-laminated timber made up of mixed tropical wood species. *Wood Mater. Sci. Eng.* 17, 809–822. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1960422>
- Netopilová, M., Kačíková, D., Osvald, A., 2010. Reakce stavebních výrobků na oheň. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství. Ostrava. 126s. ISBN 978-80-7385-093-7.
- Nettles, A.T., 1994. Basic mechanics of laminated composite plates. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Marshall Space Flight Center. MSFC. Alabama. 107p.
- Ngadianto, A., Ishiguri, F., Nezu, I., Irawati, D., Ohshima, J., Yokota, S., 2023. The effect of laminate configuration on the mechanical properties of model glued-laminated timber composed of single and mixed tropical fast-growing tree species. *Wood Mater. Sci. Eng.* 0, 1–9. <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2175254>
- Niemz, P., Hug, S., Schnider, T., 2014. Influence of temperature on selected mechanical properties of ash, beech, maple and spruce. *Forstarchiv* 85, 163–168.
- Niklewski, J., Fredriksson, M., Isaksson, T., 2016. Moisture content prediction of rain-exposed wood: Test and evaluation of a simple numerical model for durability applications. *Build. Environ.* 97, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.037>
- Nocetti, M., Brancheriau, L., Bacher, M., Brunetti, M., Crivellaro, A., 2014. Relationship between local and global modulus of elasticity in bending and its consequence on structural timber grading. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 71. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0682-7>

- Novák, P., 2024. Co je to vazník, krov, a jak dřevěné vazníky vybírat. [online]. dostupné z: <https://www.drevenekonstrukce.cz/co-je-to-vaznik-krov-a-jak-drevene-vazniky-vybirat> (navštíveno 4.6.24).
- Nuryawan, A., Alamsyah, E.M., Nuryawan, A., Alamsyah, E.M., 2017. A Review of Isocyanate Wood Adhesive: A Case Study in Indonesia, in: *Applied Adhesive Bonding in Science and Technology*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73115>
- Nussbaum, R.M., Sterley, M., 2002. The Effect of Wood Extractive Content on Glue Adhesion and Surface Wettability of Wood. *Wood Fiber Sci.* 57–71.
- Obucina, M., Gondzic, E., Manso, E., 2015. The Influence of Adhesion Temperature to the Shear Strength of Width Glued Wooden Elements. *Procedia Eng.*, 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2014 100, 321–327. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.374>
- Ohnesorge, D., Henning, M., Becker, G., 2009. Bedeutung von Laubholz bei der Brettschichtholzherstellung. *Holztechnologie* 6, 47–49.
- Okuni, I.M., Bradford, T.E., 2020. Modelling of Elevated Temperature Performance of Adhesives Used in Cross Laminated Timber: An Application of ANSYS Mechanical 2020 R1 Structural Analysis Software. *Environ. Sci. Proc.* 3, 46. <https://doi.org/10.3390/IECF2020-07902>
- Oltean, L., Teischinger, A., Hansmann, C., 2007. Influence of temperature on cracking and mechanical properties of wood during wood drying - A review. *BioResources* 2, 789–811. <https://doi.org/10.15376/biores.2.4.789-811>
- Oñate, A., Fernández, J., Saavedra, K., 2023. Numerical simulation on the influence of delamination on the critical buckling load of CLT panels. *Eng. Struct.* 286, 116029. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116029>
- Öncel, M., Vurdu, H., Aydoğan, H., Özkan, O.E., Kaymakci, A., 2019. The Tensile Shear Strength Of Outdoor Type Plywood Produced From Fir, Alnus, Pine And Poplar Wood. *WOOD Res.* 64, 913–920.
- Ong, C.B., 2015. Glue-laminated timber (Glulam), in: Ansell, M.P. (Ed.), *Wood Composites*. Woodhead Publishing, pp. 123–140. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-454-3.00007-X>
- Ormarsson, S., Gíslason, Ó.V., 2016. Moisture-induced stresses in glulam frames. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 74, 307–318. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1006-5>
- Oscarsson, J., Olsson, A., Johansson, M., Enquist, B., Serrano, E., 2011. Strength grading of narrow dimension Norway spruce side boards in the wet state using first axial resonance frequency. *Int. Wood Prod. J.* 2, 108–114. <https://doi.org/10.1179/2042645311Y.0000000015>
- Özkan, O.E., 2021. Effects of cryogenic temperature on some mechanical properties of beech (*Fagus orientalis* Lipsky) wood. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 79, 417–421. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01639-1>
- Park, S., Jeong, B., Park, B.-D., 2021. A Comparison of Adhesion Behavior of Urea-Formaldehyde Resins with Melamine-Urea-Formaldehyde Resins in Bonding Wood. *Forests* 12, 1037. <https://doi.org/10.3390/f12081037>
- Pečenko, R., Svensson, S., Hozjan, T., 2015. Modelling heat and moisture transfer in timber exposed to fire. *Int. J. Heat Mass Transf.* 87, 598–605. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.024>
- Pédrot, P.-M., Tabareau, N., 2020. The fire triangle: how to mix substitution, dependent elimination, and effects. *Proc. ACM Program. Lang.* 4, 1–28. <https://doi.org/10.1145/3371126>

- Pei, S., Rammer, D., Popovski, M., Williamson, T., Line, P., van de Lindt, J.W., 2016. An overview of CLT research and implementation in North America, in: World Conference on Timber Engineering (WCTE). August. pp. 22–15.
- Peng, Z., Jiang, X., Si, C., Joao Cárdenas-Oscanoa, A., Huang, C., 2023. Advances of Modified Lignin as Substitute to Develop Lignin-Based Phenol-Formaldehyde Resin Adhesives. *ChemSusChem* 16, e202300174. <https://doi.org/10.1002/cssc.202300174>
- Petrie, E.M., 2007. Handbook of adhesives and sealants, 2nd ed. ed, McGraw-Hill handbooks. McGraw-Hill, New York. ISBN: 9780071479165.
- Pizzi, A., 2019. Tannins: Prospectives and Actual Industrial Applications. *Biomolecules* 9, 344. <https://doi.org/10.3390/biom9080344>
- Pizzi, A., Mittal, K.L., 2011. Wood Adhesives. CRC Press. 462p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b12180>
- Poletto, M., Zattera, A.J., Santana, R.M.C., 2012. Thermal decomposition of wood: Kinetics and degradation mechanisms. *Bioresour. Technol., Advances in Biological Waste Treatment and Bioconversion Technologies* 126, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.133>
- Polocoşer, T., Kasal, B., Stöckel, F., 2017. State-of-the-art: intermediate and high strain rate testing of solid wood. *Wood Sci. Technol.* 51, 1479–1534. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0925-6>
- Pooley, L.I., Abu-Bakar, A.S., Cran, M.J., Wadhvani, R., Moinuddin, K.A.M., 2020. Measurements of specific heat capacity of common building materials at elevated temperatures: a comparison of DSC and HDA. *J. Therm. Anal. Calorim.* 141, 1279–1289. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09124-5>
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M., 1997. Štruktúra a vlastnosti dreva. *Príroda, Bratislava.* 485s. ISBN 80-07-00960-4.
- Pramreiter, M., Nenning, T., Huber, C., Müller, U., Kromoser, B., Mayencourt, P., Konnerth, J., 2023. A review of the resource efficiency and mechanical performance of commercial wood-based building materials. *Sustain. Mater. Technol.* 38, e00728. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00728>
- Pretzsch, H., Rais, A., 2016. Wood quality in complex forests versus even-aged monocultures: review and perspectives. *Wood Sci. Technol.* 50, 845–880. <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0827-z>
- Procházka, P., 2001. Základy mechaniky složených materiálů. *Academia.* 152s. ISBN: 80-200-0913-2.
- Purba, C.Y.C., Pot, G., Collet, R., Chaplain, M., Coureau, J.-L., 2022. Assessment of bonding durability of CLT and glulam made from oak and mixed poplar-oak according to bonding pressure and glue type. *Constr. Build. Mater.* 335, 127345. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127345>
- Qin, R., Zhou, A., Chow, C.L., Lau, D., 2021. Structural performance and charring of loaded wood under fire. *Eng. Struct.* 228, 111491. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111491>
- Qing, H., Mishnaevsky, L., 2009. Moisture-related mechanical properties of softwood: 3D micromechanical modeling. *Comput. Mater. Sci.* 46, 310–320. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2009.03.008>
- Qiu, Q., 2023. Thermal conductivity assessment of wood using micro computed tomography based finite element analysis ( $\mu$ CT-based FEA). *NDT E Int.* 139, 102921. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102921>

- Ráj Dřeva, 2023. Ráj Dřeva | KVH konstrukční řezivo Archives - Ráj Dřeva. [online]. dostupné z: <https://www.raj-dreva.cz/kategorie-produktu/rezivo/kvh-konstrukcni-rezivo/> (navštíveno 11.15.23).
- Ramachandrareddy, B., van Herwijnen, H.W.G., Beck, G., Bredesen, R., Konnerth, J., 2022. Mechanical properties of wood adhesive bond lines tested in service classes according to Eurocode 5. *Int. J. Adhes. Adhes.* 118, 103233. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103233>
- Ramuhalli, P., Udpa, L., Udpa, S.S., 2005. Finite-element neural networks for solving differential equations. *IEEE Trans. Neural Netw.* 16, 1381–1392. <https://doi.org/10.1109/TNN.2005.857945>
- Rao, J.S., 2011. Renaissance and Scientific Revolution, in: Rao, J.S. (Ed.), *History of Rotating Machinery Dynamics, History of Mechanism and Machine Science*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 15–21. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1165-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1165-5_5)
- Rao, S.S., 2017. *The Finite Element Method in Engineering*. Butterworth-Heinemann. ISBN: 9780128117682.
- Reinprecht, L., 2016. *Wood Deterioration, Protection and Maintenance*. John Wiley & Sons. ISBN: 9781119106531.
- Reissner, E., Stavsky, Y., 1961. Bending and Stretching of Certain Types of Heterogeneous Anisotropic Elastic Plates. *J. Appl. Mech.* 28, 402–408. <https://doi.org/10.1115/1.3641719>
- Ren, D., Frazier, C.E., 2012. Wood/adhesive interactions and the phase morphology of moisture-cure polyurethane wood adhesives. *Int. J. Adhes. Adhes.* 34, 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.12.009>
- Repič, R., Pondelak, A., Kržišnik, D., Humar, M., Knez, N., Knez, F., Škapin, A.S., 2023. Environmentally friendly protection of European beech against fire and fungal decay using a combination of thermal modification and mineralisation. *Wood Mater. Sci. Eng.* 0, 1–12. <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2223508>
- Repola, J., 2006. Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density. *Silva Fenn.* 40. <https://doi.org/10.14214/sf.322>
- Rescalvo, F.J., Timbolmas, C., Bravo, R., Gallego, A., 2020. Experimental and Numerical Analysis of Mixed I-214 Poplar/Pinus Sylvestris Laminated Timber Subjected to Bending Loadings. *Materials* 13, 3134. <https://doi.org/10.3390/ma13143134>
- Riberholt, H., 2007. Performance of old glulam structures in Europe. DTU. Byg Rapport No. R-177. ISSN 1601-2917. ISBN 9788778772527.
- Richter, F., Atreya, A., Kotsovinos, P., Rein, G., 2019. The effect of chemical composition on the charring of wood across scales. *Proc. Combust. Inst.* 37, 4053–4061. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.080>
- Richter, K., Pizzi, A.P., Despres, A., 2006. Thermal stability of structural one-component polyurethane adhesives for wood - Structure-property relationship. *J. Appl. Polym. Sci.* 102, 5698–5707. <https://doi.org/10.1002/app.25084>
- Richter, K., Steiger, R., 2005. Thermal Stability of Wood-Wood and Wood-FRP Bonding with Polyurethane and Epoxy Adhesives. *Adv. Eng. Mater.* 7, 419–426. <https://doi.org/10.1002/adem.200500062>
- Rindler, A., Hansmann, C., Konnerth, J., 2019. The effect of moisture on the mechanical response of wood, adhesive and their interphase by means of nanoindentation. *Wood Sci. Technol.* 53, 729–746. <https://doi.org/10.1007/s00226-019-01100-4>

- Romagnoli, M., Cavalli, D., Spina, S., 2014. Wood Quality of Chestnut: Relationship between Ring Width, Specific Gravity, and Physical and Mechanical Properties. *BioResources* 9, 1132–1147.
- Rudawska, A., 2016. *Adhesives: Applications and Properties*. Intechopen. 398p. ISBN 978-953-51-2783-3
- Rudawska, A., Bociąga, E., Olewnik-Kruszkowska, E., 2017. The effect of primers on adhesive properties and strength of adhesive joints made with polyurethane adhesives. *J. Adhes. Sci. Technol.* 31, 327–344. <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1215013>
- Salca, E.-A., 2019. Black Alder (*Alnus glutinosa* L.)—a Resource for Value-Added Products in Furniture Industry Under European Screening. *Curr. For. Rep.* 5, 41–54. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00086-3>
- Salin, J.-G., 2010. Problems and solutions in wood drying modelling: History and future. *Wood Mater. Sci. Eng.* 5, 123–134. <https://doi.org/10.1080/17480272.2010.498056>
- Samarasekara, L., Coorey, R., 2011. Thermal capacity as a function of moisture content of Sri Lankan wood species: Wheatstone bridge method. *Proc. Tech. Sess. Inst. Phys. Sri Lanka* 27, 9–16.
- Sandberg, D., Haller, P., Navi, P., 2013. Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. *Wood Mater. Sci. Eng.* 8, 64–88. <https://doi.org/10.1080/17480272.2012.751935>
- San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Durrant, T., Mauri, A., Tinner, W., Ballian, D., Beck, P., Birks, H., Eaton, E., Enescu, C., Salvatore, P., Popescu, I., Ravazzi, C., Welk, E., Abad Viñas, R., Azevedo, J., Barbati, A., Barredo, J., Zecchin, B., 2016. *European Atlas of Forest Tree Species*.
- Savill, P.S., 2019. *The Silviculture of Trees Used in British Forestry*, 3rd Edition. CABI. 400p. ISBN: 978-1-78639-392-0.
- 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 Technol.* 51, 1285–1309. <https://doi.org/10.1007/s10694-014-0421-6>
- Schweingruber, F.H., 2007. *Wood Structure and Environment*. Springer Science & Business Media. Berlin. 297p. ISBN 978-3-642-08009-8.
- Senneca, O., Cerciello, F., 2023. Kinetics of combustion of lignocellulosic biomass: recent research and critical issues. *Fuel* 347, 128310. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128310>
- Shakimon, M.N., Abd Malek, N.J., Hassan, R., Ahmad, Z., 2016. The Finite Element Modelling Of Glulam Tropical Timber Beam In Bending. *J. Teknol.* 78. <https://doi.org/10.11113/jt.v78.8579>
- Shapchenkova, O., Loskutov, S., Aniskina, A., Börcsök, Z., Pásztor, Z., 2022. Thermal characterization of wood of nine European tree species: thermogravimetry and differential scanning calorimetry in an air atmosphere. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 80, 409–417. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01763-6>
- Shim, K.-B., Kim, K.-M., Park, J.-S., 2009. Improvement of Prediction Accuracy of Glulam Modulus of Elasticity by Considering Neutral Axis Shift in Bending. *Wood Fiber Sci.* 90–96.
- Shirmohammadi, M., 2023. Study of the hygroscopic properties of three Australian wood species used as solid wood and composite products. *Eur. J. Wood Wood Prod.* <https://doi.org/10.1007/s00107-023-01966-z>

- Shmulsky, R., Shvets, V., 2006. The effect of subzero temperatures on FSP of cottonwood. *For. Prod. J.* 56.
- Sikora, A., Gaff, M., Kumar Sethy, A., Fantuzzi, N., Horáček, P., 2021. Bending work of laminated materials based on densified wood and reinforcing components. *Compos. Struct.* 274, 114319. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114319>
- Simms, D.L., Law, M., 1967. The ignition of wet and dry wood by radiation. *Combust. Flame* 11, 377–388. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(67\)90058-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(67)90058-2)
- Singh, N., Rana, A., Badhotiya, G.K., 2023. Adhesive systems used for particleboards manufacturing - Review. *AIP Conf. Proc.* 2521, 020021. <https://doi.org/10.1063/5.0113158>
- Sivenkov, A.B., Alexander Alexandrovich, B., Abdukadirovich, M.B., Mirzhan Maratovich, A., Zhandos Kuandykovich, M., Rakhmetulin, B.Z., 2023. General Information About the Structure and Properties of Wood, in: Andrey Borisovich, S., Alexander Alexandrovich, B., Abdukadirovich, M.B., Mirzhan Maratovich, A., Zhandos Kuandykovich, M., Rakhmetulin, B.Z. (Eds.), *Fire Hazard and Fire Resistance of Wooden Structures*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–15. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-24074-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-24074-4_1)
- Skaar, C., 2012. *Wood-Water Relations*. Springer Science & Business Media. Michigan University. 283p. ISBN 0387192581, 9780387192581.
- Sogutlu, C., 2017. Determination of the Effect of Surface Roughness on the Bonding Strength of Wooden Materials. *BioResources* 12, 1417–1429.
- Sonderegger, W., Mandallaz, D., Niemz, P., 2008. An investigation of the influence of selected factors on the properties of spruce wood. *Wood Sci. Technol.* 42, 281–298. <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0173-2>
- Sperry, J.S., Hacke, U.G., Pittermann, J., 2006. Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. *Am. J. Bot.* 93, 1490–1500. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1490>
- Sterley, M., Trey, S., Lundevall, Å., Olsson, S., 2012. Influence of cure conditions on the properties of a one-component moisture-cured polyurethane adhesive in the context of green gluing of wood. *J. Appl. Polym. Sci.* 126, E297–E304. <https://doi.org/10.1002/app.36895>
- Stoeckel, F., Konnerth, J., Gindl-Altmatter, W., 2013. Mechanical properties of adhesives for bonding wood—A review. *Int. J. Adhes. Adhes.* 45, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.03.013>
- Stolze, H., Schuh, M., Kegel, S., Fürkötter-Ziegenbein, C., Brischke, C., Militz, H., 2021. Monitoring of Beech Glued Laminated Timber and Delamination Resistance of Beech Finger-Joints in Varying Ambient Climates. *Forests* 12, 14. <https://doi.org/10.3390/f12121672>
- Štříbrská, B., Hradecký, J., Čepl, J., Tomášková, I., Jakuš, R., Modlinger, R., Netherer, S., Jirošová, A., 2022. Forest margins provide favourable microclimatic niches to swarming bark beetles, but Norway spruce trees were not attacked by *Ips typographus* shortly after edge creation in a field experiment. *For. Ecol. Manag.* 506, 119950. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119950>
- Šuhajdová, E., Schmid, P., Novotný, M., Pěňčík, J., Šuhajda, K., Uhlík, O., 2023. Experimental Research on Hybrid Hardwood Glue-Laminated Beams. *Buildings* 13, 1055. <https://doi.org/10.3390/buildings13041055>
- Sviták, M., Gašparík, M., Penc, J., 2014. Heat Resistance of Glued Finger Joints in Spruce Wood Constructions. *Bioresources* 9, 7529–7541. <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.7529-7541>

- Szmutku, M.B., Campean, M., Porojan, M., 2013. Strength reduction of spruce wood through slow freezing. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 71, 205–210. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0667-6>
- Szycher, M., 2012. *Szycher's Handbook of Polyurethanes*. CRC Press. Boca Raton. 1144p. ISBN 9781138075733.
- Tajvidi, M., Mirzaei, B., 2009. Effects of temperature on the mechanical properties of beech (*Fagus orientalis* Lipsky) and lime (*Tilia begonifolia*) wood. *Wood Mater. Sci. Eng.* 4, 147–153. <https://doi.org/10.1080/17480270903428789>
- Tam, L., Zhou, A., Yu, Z., Qiu, Q., Lau, D., 2017. Understanding the effect of temperature on the interfacial behavior of CFRP-wood composite via molecular dynamics simulations. *Compos. Part B Eng.* 109, 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.030>
- Tapia Camú, C., Aicher, S., 2018. A Stochastic Finite Element Model for Glulam Beams of Hardwoods, *World Conference for Timber Engineering (WCTE)*. ed. Seoul, South Korea.
- The Wood Database, 2023. *The Wood Database (Hardwood)*. [online]. dostupné z: <https://www.wood-database.com/> (navštíveno 10.24.23).
- Thelandersson, S., Larsen, H.J., 2003. *Timber Engineering*. John Wiley & Sons. 496p. ISBN: 978-0-470-84469-4.
- Thybring, E.E., Fredriksson, M., 2021. Wood Modification as a Tool to Understand Moisture in Wood. *Forests* 12, 372. <https://doi.org/10.3390/f12030372>
- Timbolmas, C., Bravo, R., Rescalvo, F.J., Gallego, A., 2022. Development of an analytical model to predict the bending behavior of composite glulam beams in tension and compression. *J. Build. Eng.* 45, 103471. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103471>
- Tran, A., Mayr, M., Konnerth, J., Gindl-Altmatter, W., 2020. Adhesive strength and micromechanics of wood bonded at low temperature. *Int. J. Adhes. Adhes.* 103, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102697>
- Tran, V.-D., Oudjene, M., Méausoone, P.-J., 2016. Experimental investigation on full-scale glued oak solid timber beams for structural bearing capacity. *Constr. Build. Mater.* 123, 365–371. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.002>
- Tsai, K.T., Ansell, M.P., 1990. The fatigue properties of wood in flexure. *J. Mater. Sci.* 25, 865–878. <https://doi.org/10.1007/BF03372174>
- Tserpes, K., Barroso-Caro, A., Carraro, P.A., Beber, V.C., Floros, I., Gamon, W., Kozłowski, M., Santandrea, F., Shahverdi, M., Skejić, D., Bedon, C., Rajčić, V., 2022. A review on failure theories and simulation models for adhesive joints. *J. Adhes.* 98, 1855–1915. <https://doi.org/10.1080/00218464.2021.1941903>
- Tumirah, K., How, S., Omar, M.M., 2017. *Factors Influencing The Quality Of Wood Adhesion—Part 1: Chemical Interference 2017*.
- Turon, A., Dávila, C.G., Camanho, P.P., Costa, J., 2007. An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models. *Eng. Fract. Mech.* 74, 1665–1682. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2006.08.025>
- Ülker, O., 2016. *Wood Adhesives and Bonding Theory*. Adhesives - Applications and Properties. InTechopen. DOI: 10.5772/65759.
- Ullah, S., Bustam, M.A., Nadeem, M., Naz, M.Y., Tan, W.L., Shariff, A.M., 2014. Synthesis and Thermal Degradation Studies of Melamine Formaldehyde Resins. *Sci. World J.* 2014, e940502. <https://doi.org/10.1155/2014/940502>

- Uzelac Glavinić, I., Boko, I., Torić, N., Lovrić Vranković, J., 2020. Application of hardwood for glued laminated timber in Europe. *GRAĐEVINAR* 72, 607–616. <https://doi.org/10.14256/JCE.2741.2019>
- Van de Velde, N., Javornik, S., Sever, T., Štular, D., Šobak, M., Štirn, Ž., Likozar, B., Jerman, I., 2021. Bio-Based Epoxy Adhesives with Lignin-Based Aromatic Monophenols Replacing Bisphenol A. *Polymers* 13, 3879. <https://doi.org/10.3390/polym13223879>
- Vaněrek, J., Šmak, M., Kusák, I., Misák, P., 2017. Durability of FRP/wood bonds glued with epoxy resin. *Mater. Tehnol.* 51, 889–895. <https://doi.org/10.17222/mit.2016.321>
- Vay, O., De Borst, K., Hansmann, C., Teischinger, A., Müller, U., 2015. Thermal conductivity of wood at angles to the principal anatomical directions. *Wood Sci. Technol.* 49, 577–589. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0716-x>
- Veliz, R., Guzman, K., 2020. Analysis of Burning Wood in the Transient State and the Application to Structural Design. *Archit. Eng.* San Luis Obispo, California. California Polytechnic State University.
- Vestøl, G.I., Høibø, O., Langsethagen, K.G., Skaug, E., Skyrud, R.E.A., 2012. Variability of density and bending properties of *Picea abies* structural timber. *Wood Mater. Sci. Eng.* 7, 76–86. <https://doi.org/10.1080/17480272.2012.662698>
- Viana, G., Costa, M., Banea, M., da Silva, L., 2017. A review on the temperature and moisture degradation of adhesive joints. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Mater. Des. Appl.* 231, 488–501. <https://doi.org/10.1177/1464420716671503>
- Vick, C.B., Okkonen, A.E., 2000. Durability of one-part polyurethane bonds to wood improved by HMR coupling agent. *Forest products journal.* Vol. 50, no. 10. p. 69-75.
- Vidal, P., Gallimard, L., Polit, O., 2012. Composite beam finite element based on the proper generalized decomposition. *Comput. Struct.* 102, 76–86.
- Vodiannikov, M., Kashevarova, G., 2019. Composite Solutions for Glulam Joints. *Key Eng. Mater.* 801, 47–52.
- Wagenführ, R., Wagenführ, A., 2021. *Holzatlas.* Hanser Fachbuchverlag, München. 928p. ISBN: 978-3-446-46838-2
- Wang, Q., Sun, J., Chu, G., 2005. Lithium Ion Battery Fire And Explosion. *Fire Saf. Sci.* 8, 375–382. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-375>
- Wang, S., Ding, P., Lin, S., Huang, X., Usmani, A., 2021. Deformation of wood slice in fire: Interactions between heterogeneous chemistry and thermomechanical stress. *Proc. Combust. Inst.* 38, 5081–5090. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.08.060>
- Wang, T., Wang, Y., Crocetti, R., Franco, L., Schweigler, M., Wälinder, M., 2021. An innovative timber-steel hybrid beam consisting of glulam mechanically reinforced by means of steel rod: Analytical and preliminary numerical investigations. *J. Build. Eng.* 43, 102549. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102549>
- 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. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 73, 225–233. <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, 9638–9648.



- Watt, M.S., Sorensson, C., Cown, D.J., Dungey, H.S., Evans, R., 2010. Determining the main and interactive effect of age and clone on wood density, microfibril angle, and modulus of elasticity for *Pinus radiata*. *Can. J. For. Res.* 40, 1550–1557. <https://doi.org/10.1139/X10-095>
- Wcisło, B., Pamin, J., Rose, L., Menzel, A., 2023. On Spatial vs Referential Isotropic Fourier's Law in Finite Deformation Thermomechanics. *Eng. Trans.* 71, 111.
- White, R.H., 2016. Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Timber Members, in: Hurley, M.J., Gottuk, D., Hall, J.R., Harada, K., Kuligowski, E., Puchovsky, M., Torero, J., Watts, J.M., Wieczorek, C. (Eds.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer, New York, NY, pp. 1979–2011. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0\\_55](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_55)
- WHO, I.A. for R. on C., 2006. Formaldehyde, 2-butoxyethanol and 1-tert-butoxypropan-2-ol, in: *Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-Tert-Butoxypropan-2-Ol*. pp. 478–478.
- Wieruszewski, M., Mazela, B., 2017. Cross Laminated Timber (CLT) as an Alternative Form of Construction Wood. *Drv. Ind.* 68, 359–367. <https://doi.org/10.5552/drind.2017.1728>
- Wimmer, R., Kläusler, O., Niemz, P., 2013. Water sorption mechanisms of commercial wood adhesive films. *Wood Sci. Technol.* 47, 763–775. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0538-7>
- Wimmers, G., 2017. Wood: a construction material for tall buildings. *Nat. Rev. Mater.* 2, 1–2. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.51>
- Wirries, J., Ruetters, M., 2022. Methods for shrinkage measurement considering stress development of curing structural adhesives. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Automob. Eng.* 09544070221103676. <https://doi.org/10.1177/09544070221103676>
- Wolter, N., Beber, V.C., Sandinge, A., Blomqvist, P., Goethals, F., Van Hove, M., Jubete, E., Mayer, B., Koschek, K., 2020. Carbon, Glass and Basalt Fiber Reinforced Polybenzoxazine: The Effects of Fiber Reinforcement on Mechanical, Fire, Smoke and Toxicity Properties. *Polymers* 12, 2379. <https://doi.org/10.3390/polym12102379>
- Woo, B.-H., Yoo, D.-H., Kim, S.-S., Lee, J.-B., Ryou, J.-S., Kim, H.-G., 2021. Effects of Thermal Conductive Materials on the Freeze-Thaw Resistance of Concrete. *Materials* 14, 4063. <https://doi.org/10.3390/ma14154063>
- Wu, Z., Deng, X., Li, L., Xi, X., Tian, M., Yu, L., Zhang, B., 2021. Effects of Heat Treatment on Interfacial Properties of *Pinus Massoniana* Wood. *Coatings* 11, 543. <https://doi.org/10.3390/coatings11050543>
- Xing, Z., Wang, Y., Zhang, J., Ma, H., 2021. Comparative study on fire resistance and zero strength layer thickness of CLT floor under natural fire and standard fire. *Constr. Build. Mater.* 302, 124368. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124368>
- Xu, Q., Mensah, R.A., Jin, C., Jiang, L., 2022. A critical review of the methods and applications of microscale combustion calorimetry for material flammability assessment. *J. Therm. Anal. Calorim.* 147, 6001–6013. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10963-4>
- Xu, Q.F., Chen, J.F., Zhang, F.W., Li, X.M., 2012. An experimental study of timber beams reversibly flexural strengthened with screwed steel plates. *Sichuan Daxue Xuebao Gongcheng Kexue BanJournal Sichuan Univ. Eng. Sci. Ed.* 44, 47–56.

- Yang, B., Wu, X., Hao, J., Xu, D., Liu, T., Xie, Q., 2023. Estimation of wood failure percentage under shear stress in bamboo-wood composite bonded by adhesive using a deep learning and entropy weight method. *Ind. Crops Prod.* 197, 116617. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116617>
- Yang, H., Ju, D., Liu, W., Lu, W., 2016. Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars. *Constr. Build. Mater.* 109, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.008>
- Yang, R., Li, H., Dauletbek, A., Ashraf, M., Lorenzo, R., Sun, Y., Wu, Y., 2021. Effects of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of glulam exposed to outdoor environment.
- Yang, T.-H., Wang, S.-Y., Tsai, M.-J., Lin, C.-Y., 2009. The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test. *Build. Environ.* 44, 231–236. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.02.010>
- Younesi-Kordkheili, H., Pizzi, A., 2018. Improving the physical and mechanical properties of particleboards made from urea–glyoxal resin by addition of pMDI. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 76, 871–876. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1242-3>
- Zhang, J., Song, F., Tao, J., Zhang, Z., Shi, S.Q., 2018. Research Progress on Formaldehyde Emission of Wood-Based Panel. *Int. J. Polym. Sci.* 2018, e9349721. <https://doi.org/10.1155/2018/9349721>
- Zhang, X., Huang, W., Khajepour, M., Asgari, M., Tannert, T., 2023. Seismic Performance and LCA Comparison between Concrete and Timber–Concrete Hybrid Buildings. *Buildings* 13, 1714. <https://doi.org/10.3390/buildings13071714>
- Zhang, Y., Wang, X.-M., Casilla, R., Cooper, P., Huang, Z., Wang, X., 2010. Impact of curing condition on pH and alkalinity/acidity of structural wood adhesives. *J. Appl. Polym. Sci.* 117, 2888–2898. <https://doi.org/10.1002/app.32201>
- Zhao, L., Jiang, J., Lu, J., Zhan, T., 2015. Flexural property of wood in low temperature environment. *Cold Reg. Sci. Technol.* 116, 65–69. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.04.001>
- Zhao, L., Liu, Y., Xu, Z., Zhang, Y., Zhao, F., Zhang, S., 2011. State of research and trends in development of wood adhesives. *For. Stud. China* 13, 321–326. <https://doi.org/10.1007/s11632-013-0401-9>
- Zheng, J., Payton, E., Reed, C., Nieckarz, G., 2007. Process for making wood laminates using fast setting adhesives at ambient temperature. US20070102108A1.
- Zhou, J., Hu, C., Hu, S., Yun, H., Jiang, G., Zhang, S., 2012. Effects Of Temperature On The Bending Performance Of Wood-Based Panels. *BioResources* 7, 3597–3606.

## Seznam příloh

- Příloha č. 1 Technický list lepidla Kestopur 1010
- Příloha č. 2 Technický list lepidla PRF system 1711/2520
- Příloha č. 3 Rozložení Tukeyho testů
- Příloha č. 4 Tukeyův test významnosti rozdílů hustoty nosníků (1/4)
- Příloha č. 5 Tukeyův test významnosti rozdílů hustoty nosníků (2/4)
- Příloha č. 6 Tukeyův test významnosti rozdílů hustoty nosníků (3/4)
- Příloha č. 7 Tukeyův test významnosti rozdílů hustoty nosníků (4/4)
- Příloha č. 8 Tukeyův test významnosti rozdílů hustoty smykových těles (1/4)
- Příloha č. 9 Tukeyův test významnosti rozdílů hustoty smykových těles (2/4)
- Příloha č. 10 Tukeyův test významnosti rozdílů hustoty smykových těles (3/4)
- Příloha č. 11 Tukeyův test významnosti rozdílů hustoty smykových těles (4/4)
- Příloha č. 12 Tukeyův test významnosti rozdílů modulu pružnosti (1/4)
- Příloha č. 13 Tukeyův test významnosti rozdílů modulu pružnosti (2/4)
- Příloha č. 14 Tukeyův test významnosti rozdílů modulu pružnosti (3/4)
- Příloha č. 15 Tukeyův test významnosti rozdílů modulu pružnosti (4/4)
- Příloha č. 16 Tukeyův test významnosti rozdílů ohybové pevnosti (1/4)
- Příloha č. 17 Tukeyův test významnosti rozdílů ohybové pevnosti (2/4)
- Příloha č. 18 Tukeyův test významnosti rozdílů ohybové pevnosti (3/4)
- Příloha č. 19 Tukeyův test významnosti rozdílů ohybové pevnosti (4/4)
- Příloha č. 20 Tukeyův test významnosti rozdílů smykové pevnosti (1/4)
- Příloha č. 21 Tukeyův test významnosti rozdílů smykové pevnosti (2/4)
- Příloha č. 22 Tukeyův test významnosti rozdílů smykové pevnosti (3/4)
- Příloha č. 23 Tukeyův test významnosti rozdílů smykové pevnosti (4/4)

# Kestopur 1010



Kestopur 1010 je jednosložkové, polyuretanové lepidlo určené k výrobě nosných dřevěných výrobků. Splňuje požadavky normy EN 15425 a je schválen pro výrobu prvků označených CE podle EN 14080.



- Armované vláknem
- Nízká tvorba pěny
- Tixotropní

## OBLAST POUŽITÍ

Kestopur 1010 je jednosložkové, vlhkostí vytvrzující polyuretanové lepidlo pro lepení dřevěných materiálů. Splňuje požadavky normy EN 15425 a je schválen pro výrobu lepeného dřeva označeného CE podle normy EN 14080, výroby délkově nastaveného dřeva označeného CE podle EN 15497 a CE- označeného CLT (křížového laminátu) podle EN 16351.

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

Kestopur 1010 neobsahuje rozpouštědla a formaldehyd. Splňuje klasifikaci emisí M1 pro stavební materiály.

## NÁVOD K POUŽITÍ

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

Při použití lepidla Kestopur 1010 používejte ochranné rukavice. Při aplikacilepidla a při teplotě nad +40 ° C noste ochrannou dechovou masku.

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

## DODATEČNÉ INFORMACE

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

## ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ A BEZPEČNOST

Zabraňte zbytečnému kontaktu s pokožkou a vystavení čerstvému výrobku, používejte rukavice. Viz bezpečnostní list materiálu. Informace o likvidaci produktu a balení naleznete na adrese [www.kiilto.com](http://www.kiilto.com).

Typ	Polyuretan
Hustota/Specifická hmotnostT	ca. 1.2 kg/dm <sup>3</sup>
Barva	Transparentní, světlé po vytvrzení. Obsahuje indikátor viditelný pod UV světlem.
Viskozita	ca. 10.000 mPas (Brookfield RVT, 5/20, 20 °C)
Otevřený čas	max. 10 min při 180 g / m <sup>2</sup> , vlhkost dřeva 15%, teplota 20 ° C, Vlhkost vzduchu 50%)
Klasifikace a certifikace	EN 15425 I 70 GP 0,3 AUS/NZ 4364:2010 typeI
Spotřeba	140-180 g/m <sup>2</sup> Zubový spoj 160-200 g/m <sup>2</sup> Plošné lepení
Lisovací čas	Od 30 min.
Pracovní podmínky	Teplota v hale nejméně 15 ° C (podle EN 14080, EN16351, EN 15497)
Aplikační teplota	18 - 30 ° C (podle EN 14080; EN16351; EN15497)
Vlhkost vzduchu	Při lepení 40 - 75% a po stisknutí ≥ 30% (podle EN 14080, EN 16351)
Vlhkost dřeva	6 - 20% (doporučujeme cca 15% vlhkosti)
Tloušťka spáry	max. 0,3mm
Skladování	Může být skladován na suchém a chladném místě (+ 10-20 ° C). Při skladování v neotevřeném originálním balení při teplotě +20 ° C je trvanlivost 4 měsíce.

## Product Information

### Laminated beam PRF system 1711/2520

The combination can be used in door production, lamination, finger jointing and other applications in the wood working industry, where there is demand for high water and weather resistance of the joints.

#### Product Specification

	1711	2520												
<b>Product</b>	PRF adhesive	PRF hardener												
<b>Delivery Form</b>	Liquid	Liquid												
<b>Colour</b>	Reddish brown	Greyish brown												
<b>Viscosity</b> (at time of production)	3000 - 8000 mPas (Brookfield LVT, sp. 4, 12 rpm, 25°C / 77°F)	5000 - 13000 mPas (Brookfield LVT, sp. 4, 60 rpm, 25°C / 77°F)												
<b>Density</b>	Appr. 1150 kg/m <sup>3</sup>	Appr. 1200 kg/m <sup>3</sup>												
<b>pH</b> (at time of production)	7,0 - 9,0 (at 25°C / 77°F)	3,5 - 6,0 (at 25°C / 77°F)												
<b>Dry content</b>	54 - 57%	Not applicable												
<b>Storage Life</b> (months from time of production)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>15°C/59°F</th> <th>20°C/68°F</th> <th>30°C/86°F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>---</td> <td>12</td> <td>---</td> </tr> </tbody> </table>	15°C/59°F	20°C/68°F	30°C/86°F	---	12	---	<table border="1"> <thead> <tr> <th>15°C/59°F</th> <th>20°C/68°F</th> <th>30°C/86°F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>---</td> <td>6</td> <td>---</td> </tr> </tbody> </table>	15°C/59°F	20°C/68°F	30°C/86°F	---	6	---
15°C/59°F	20°C/68°F	30°C/86°F												
---	12	---												
15°C/59°F	20°C/68°F	30°C/86°F												
---	6	---												
<b>Storage Conditions</b>	<p>Recommended storage temperature 10°C to 20°C / 50°F to 68°F. Only short term exposure to temp above 30°C / 86°F is acceptable. The product can be frozen but it must be thawed, raised to room temperature and homogenized before usage. The product can form a skin on the surface if the container is not properly closed. Is not sensitive to moisture.</p>	<p>Recommended storage temperature is 10°C to 20°C / 50°F to 68°F. Only short term exposure to temp above 30°C / 86°F is acceptable. The product can be frozen but it must be thawed, raised to room temperature and homogenized before usage.</p>												
<b>Formaldehyde Emission Info</b>	Fulfils F**** Bonded wood constructions will pass JAS MAFF Not. No. 1587 Class A													
<b>Glue Line Properties</b>	High water and weather resistance.													

<b>Approvals</b>	<p>1711/2520 has been tested by the Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart - Otto-Graf-Institut - (MPA), Germany in accordance with EN 301 and fulfils the requirements for Adhesive type I-90-GP-0,6-M-w for use with the wood species spruce, fir and pine.</p> <p>The product is suitable for the production of glued laminated timber according to EN 14080:2013. The product is suitable for the production of cross-laminated timber according to EN 16351:2015. The product is suitable for the production of structural finger-jointed solid wood according to EN 15497:2014.</p>
------------------	--

## Gluing Operation Information

<b>Applications</b>	Structural elements (face lamination) and finger joints	
<b>Press Type</b>	Cold Press	
	Hot Press	
	Continuous Press	
<b>Press Temperature</b>	Not below 20°C / 68°F	
<b>Pressing Time</b>		
acc to EN 302-6, 20°C/65% RH, Beech	0,3 mm glue line thickness	7,5h

The given pressing time is related to the production of straight beams with a moisture content of approximately 12%. When gluing curved beams or using wood with higher moisture content, the pressing times have to be prolonged.

Numerous parameters influence the performance of the glue system, such as the condition of the press, the moisture content of the substrate, the ambient temperature and relative humidity, the type of construction, bond-line thickness, and the species of wood.

The given pressing time is related to a material temperature of approximately 68°F (20°C). If the temperature of the material is lower, the pressing time must be prolonged. The value given in the table is a minimum value and is to be used as guidelines.

<b>Pot Life</b>	<b>15°C/59°F</b>	<b>20°C/68°F</b>	<b>30°C/86°F</b>
	2h 15 min	1h 10 min	30 min
<b>Pressure</b>	Minimum 0,5 MPa for soft wood.		
	Minimum 1,0 MPa for hard wood.		
	In laminated beam production:		
	Minimum 0,7 MPa for 33 mm lamellas. Minimum 0,9 MPa for 45 mm lamellas.		

	Gluing condition	Max Closed
<b>Assembly Time</b>	20°C/68°F, 250g/m <sup>2</sup> / 51 lbs/1000ft <sup>2</sup>	20'
	20°C/68°F, 400g/m <sup>2</sup> / 82 lbs/1000ft <sup>2</sup>	40'

The assembly time is influenced by the glue spread, the moisture content in the wood, and the ambient temperature and humidity. Higher glue spread, lower temperature, and higher moisture content in the wood and in the surrounding air will extend the assembly time.

The pressure must be applied while the adhesive is still tacky. The total assembly time (open assembly time + closed assembly time) must be evaluated in each specific case.

A slight squeeze out of adhesive along the edge of all the joints when pressure is applied indicates adequate glue spread and that the total assembly time has not been exceeded.

<b>Mixing Ratio</b> (by weight)	100:15, adhesive:hardener
------------------------------------	---------------------------

<b>Glue Spread</b>	170 - 450 g/m <sup>2</sup> , for laminated beams 250 - 450 g/m <sup>2</sup>
--------------------	---

The glue spread can vary depending on the wood species, wood moisture, relative humidity, room temperature, press type, assembly time and planing quality. However, the lower limit of glue spread should not be lower than the value in the table above.

In the production of load-bearing components, a reduction of the glue spread, e.g. in the case of very short assembly times, may only be carried out with the approval of AkzoNobel's technical support, taking into account the production parameters on the respective production line. This optimisation requires that the specified parameters are adhered to and that continuous checks in the form of delamination tests are carried out. A written and signed confirmation from AkzoNobel and the adhesive testing body is mandatory for this.

<b>Moisture content of wood</b>	8 - 15%, for laminated beams preferably 10 - 12%
---------------------------------	--

<b>Preparation of wood</b>	For best result the wood must be smoothly planed. For optimum bond strength the bonding operation shall take place within 24 hours after preparation.
----------------------------	---

<b>Temperature of wood</b>	In order to meet the given press times, wood temperature shall not be below 20°C / 68°F
----------------------------	---

<b>Post curing</b>	1 day at 20°C / 68°F
--------------------	----------------------

## Additional information for finger jointing

For the production of finger joints the requirements given in DIN EN 15497 and EN14080:2013 must be followed.

The table below highlights important bonding information for finger jointing:

<b>Mixing Ratio</b> (by weight)	100:15, adhesive:hardener
<b>Glue Spread</b>	250 - 350 g/m <sup>2</sup>
<b>Curing time</b>	7,5 h
<b>Pressure</b>	According to EN 14080:2013 / EN 15497

### Further treatment of finger joints

Finger jointed lamellae may only be further processed directly after the finger jointing operation if the transportation equipment and the planing of the lamellae do not expose the joints for any damaging stresses. Otherwise the pressing time in the table above shall be followed.

### Handling and HSE info

<b>Handling</b>	Always use gloves and goggles when handling the product.
<b>Cleaning</b>	Warm water (must be cleaned before curing)
<b>Waste handling - of the products</b>	<p>Glue - Classified as hazardous waste. (Contains free phenol and resorcinol.)</p> <p>Hardener - Classified as hazardous waste. (Contains free formaldehyde.)</p> <p>Mixed glue and hardener – Can be treated as non hazardous waste when fully cured.</p> <p><b>NOTE!</b> There might be national and/or local regulatory differences, therefore always keep a dialogue with the local authorities.</p>
<b>Waste water treatment - of the waste water</b>	<p><u>Send of for destruction</u></p> <p>Use an approved local contractor.</p> <p><u>Incineration with woodenchips</u></p> <p>Please note the requirements according to Directive 2000/76/EC on incineration of waste.</p> <p>Contact our Environmental Advisor for further information.</p> <p><b>For more info, see General Information.</b></p> <p><b>NOTE!</b> There might be national and/or local regulatory differences, therefore always keep a dialogue with the local authorities.</p>
<b>Health and Safety</b>	For more information, see respective SDS.



### Příloha č. 3 Rozložení Tukeyho testů

Hustota nosníků

	BK	SM	OL	K1		K2	K3	K4	K5
BK	Příloha č. 4				BK	Příloha č. 5			
SM					SM				
OL					OL				
K1					K1				
	BK	SM	OL	K1		K2	K3	K4	K5
K2	Příloha č. 6				K2	Příloha č. 7			
K3					K3				
K4					K4				
K5					K5				

Modul pružnosti nosníků

	BK	SM	OL	K1		K2	K3	K4	K5
BK	Příloha č. 12				BK	Příloha č. 13			
SM					SM				
OL					OL				
K1					K1				
	BK	SM	OL	K1		K2	K3	K4	K5
K2	Příloha č. 14				K2	Příloha č. 15			
K3					K3				
K4					K4				
K5					K5				

Podélná smyková pevnost

	BB	OO	SS		BS	BO	SO
BB	Příloha č. 20			BB	Příloha č. 21		
OO				OO			
SS				SS			
	BB	OO	SS		BS	BO	SO
BS	Příloha č. 22			BS	Příloha č. 23		
BO				BO			
SO				SO			

Hustota smykových těles

	BB	OO	SS		BS	BO	SO
BB	Příloha č. 8			BB	Příloha č. 9		
OO				OO			
SS				SS			
	BB	OO	SS		BS	BO	SO
BS	Příloha č. 10			BS	Příloha č. 11		
BO				BO			
SO				SO			

Ohybová pevnost nosníků

	BK	SM	OL	K1		K2	K3	K4	K5
BK	Příloha č. 16				BK	Příloha č. 17			
SM					SM				
OL					OL				
K1					K1				
	BK	SM	OL	K1		K2	K3	K4	K5
K2	Příloha č. 18				K2	Příloha č. 19			
K3					K3				
K4					K4				
K5					K5				





Příloha č. 6 Tukeyův test významnosti rozdílů hustoty nosníků (3/4)

			BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	OL	OL	OL	OL	OL	OL	OL	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1		
			Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.			
			RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR			
K2	Ref.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,54	0,24	0,78	0,61	0,73	0,90	0,93	0,02	0,02	0,03	0,04	0,08	0,07	0,07	0,10	1,00	0,18	1,00	0,24	0,94	0,23	0,88	0,01
K2	Ref.	PUR	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,04	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60
K2	1.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,42	0,16	0,66	0,49	0,61	0,82	0,87	0,01	0,01	0,02	0,02	0,05	0,04	0,05	0,06	1,00	0,26	1,00	0,33	0,98	0,33	0,94	0,01	0,01		
K2	1.c.	PUR	0,14	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,86		
K2	2.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,15	0,04	0,32	0,19	0,27	0,48	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	1,00	0,59	1,00	0,68	1,00	0,68	1,00	0,06	0,06		
K2	2.c.	PUR	0,40	0,04	0,13	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99			
K2	3.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,16	0,05	0,34	0,21	0,30	0,51	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	1,00	0,56	1,00	0,66	1,00	0,65	1,00	0,05	0,05		
K2	3.c.	PUR	0,76	0,17	0,39	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			
K3	Ref.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,19	0,06	0,38	0,24	0,33	0,55	0,62	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	1,00	0,52	1,00	0,61	1,00	0,61	0,99	0,04			
K3	Ref.	PUR	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,01	0,10	0,05	0,08	0,18	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,90	1,00	0,94	1,00	0,94	1,00	0,21	0,21		
K3	1.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,28	0,09	0,50	0,34	0,45	0,68	0,74	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03	1,00	0,39	1,00	0,48	0,99	0,48	0,98	0,02	0,02		
K3	1.c.	PUR	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,04	0,02	0,03	0,07	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,98	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00	0,42	0,42		
K3	2.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,01	0,13	0,07	0,11	0,23	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,85	1,00	0,90	1,00	0,90	1,00	0,16	0,16		
K3	2.c.	PUR	0,06	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,69	0,69		
K3	3.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,01	0,12	0,06	0,10	0,21	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,87	1,00	0,92	1,00	0,92	1,00	0,18	0,18		
K3	3.c.	PUR	0,21	0,02	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,93			
K4	Ref.	RPF	0,90	0,30	0,58	0,06	0,07	0,05	0,03	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			
K4	Ref.	PUR	0,95	0,41	0,70	0,09	0,11	0,09	0,05	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			
K4	1.c.	RPF	0,83	0,22	0,48	0,04	0,04	0,03	0,02	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			
K4	1.c.	PUR	0,82	0,21	0,46	0,03	0,04	0,03	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			
K4	2.c.	RPF	1,00	0,89	0,99	0,44	0,49	0,43	0,32	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			
K4	2.c.	PUR	0,94	0,38	0,67	0,08	0,10	0,08	0,05	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			
K4	3.c.	RPF	1,00	0,94	0,99	0,55	0,61	0,54	0,41	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			
K4	3.c.	PUR	1,00	0,72	0,93	0,25	0,30	0,25	0,17	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00			
K5	Ref.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07	0,02	0,18	0,10	0,15	0,30	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,78	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,12	0,12		
K5	Ref.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,55	0,25	0,79	0,63	0,74	0,91	0,94	0,02	0,02	0,03	0,04	0,09	0,07	0,08	0,10	1,00	0,17	1,00	0,23	0,94	0,23	0,87	0,01	0,01		
K5	1.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07	0,02	0,18	0,10	0,15	0,30	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,78	1,00	0,85	1,00	0,85	1,00	0,12	0,12		
K5	1.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,42	0,16	0,67	0,49	0,61	0,82	0,87	0,01	0,01	0,02	0,02	0,05	0,04	0,05	0,06	1,00	0,26	1,00	0,33	0,98	0,33	0,94	0,01	0,01		
K5	2.c.	RPF	0,06	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,68	0,68		
K5	2.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,08	0,02	0,19	0,11	0,16	0,32	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	1,00	0,75	1,00	0,83	1,00	0,83	1,00	0,11	0,11		
K5	3.c.	RPF	0,17	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,90			
K5	3.c.	PUR	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,07	0,03	0,05	0,13	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,94	1,00	0,97	1,00	0,97	1,00	0,28	0,28		











Priloha č. 11 Tukeyův test významnosti rozdílů hustoty smykových těles (4/4)

	BS RPF						BS PUR						BO RPF						BO PUR						SO RPF						SO PUR										
	1. c.	2. c.	3. c.	Ref.	-25 °C	+60 °C	1. c.	2. c.	3. c.	Ref.	-25 °C	+60 °C	1. c.	2. c.	3. c.	Ref.	-25 °C	+60 °C	1. c.	2. c.	3. c.	Ref.	-25 °C	+60 °C	1. c.	2. c.	3. c.	Ref.	-25 °C	+60 °C	1. c.	2. c.	3. c.	Ref.	-25 °C	+60 °C					
BS RPF 1. c.		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,28	1,00	1,00	0,97	0,99	1,00	1,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
BS RPF 2. c.		1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,69	0,65	0,24	0,33	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
BS RPF 3. c.		1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,74	0,96	0,95	0,64	0,76	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
BS RPF Ref.		1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,68	0,64	0,24	0,33	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
BS RPF -25 °C		1,00	1,00	1,00	1,00							0,85	0,78	0,98	0,88	0,98	0,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,01	0,14	0,22	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BS RPF +60 °C		1,00	1,00	1,00	1,00							1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,34	1,00	1,00	0,95	0,98	1,00	1,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BS PUR 1. c.		1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,06	0,05	0,01	0,01	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
BS PUR 2. c.		1,00	1,00	1,00	1,00	0,78	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,04	0,03	0,00	0,01	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
BS PUR 3. c.		1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00		1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	0,18	0,16	0,03	0,05	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
BS PUR Ref.		1,00	1,00	1,00	1,00	0,88	1,00		1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	0,07	0,06	0,01	0,01	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
BS PUR -25 °C		1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00		1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	0,18	0,16	0,03	0,05	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
BS PUR +60 °C		0,28	0,98	0,74	0,98	0,01	0,34		1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
BO RPF 1. c.		1,00	0,69	0,96	0,68	1,00	1,00	0,06	0,04	0,18	0,07	0,18	0,00		1,00	1,00	1,00	1,00	0,46	0,38	0,97	0,99	0,25	0,05	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
BO RPF 2. c.		1,00	0,65	0,95	0,64	1,00	1,00	0,05	0,03	0,16	0,06	0,16	0,00		1,00	1,00	1,00	1,00	0,43	0,42	0,97	0,99	0,28	0,06	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
BO RPF 3. c.		0,97	0,24	0,64	0,24	1,00	0,95	0,01	0,00	0,03	0,01	0,03	0,00		1,00	1,00		1,00	0,94	0,12	0,84	1,00	1,00	0,71	0,26	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
BO RPF Ref.		0,99	0,33	0,76	0,33	1,00	0,98	0,01	0,01	0,05	0,01	0,05	0,00		1,00	1,00			0,98	0,18	0,74	1,00	1,00	0,59	0,18	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
BO RPF -25 °C		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,35		1,00	1,00	0,94	0,98		1,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
BO RPF +60 °C		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		0,46	0,43	0,12	0,18	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
BO PUR 1. c.		0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,38	0,42	0,84	0,74	0,00	0,00		1,00	1,00	1,00	1,00	0,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
BO PUR 2. c.		0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,97	0,97	1,00	1,00	0,00	0,00		1,00		1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
BO PUR 3. c.		0,01	0,00	0,00	0,00	0,22	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,99	1,00	1,00	0,01	0,00		1,00	1,00		1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
BO PUR Ref.		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,28	0,71	0,59	0,00	0,00		1,00	1,00		1,00	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
BO PUR -25 °C		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,06	0,26	0,18	0,00	0,00		1,00	1,00	1,00		0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
BO PUR +60 °C		0,92	0,16	0,52	0,16	1,00	0,89	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00		1,00	1,00	1,00	0,88	0,07		0,91	1,00	1,00	0,81	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
SO RPF 1. c.		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,41	0,00	0,00				
SO RPF 2. c.		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		1,00		1,00	1,00	1,00	0,01	0,03	0,02	0,58	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
SO RPF 3. c.		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		1,00	1,00		1,00	1,00	0,03	0,10	0,06	0,83	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
SO RPF Ref.		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	0,18	0,37	0,26	0,99	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
SO RPF -25 °C		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,01	0,05	0,03	0,67	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
SO RPF +60 °C		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	0,97	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
SO PUR 1. c.		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,01	0,03	0,18	0,01	0,99		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
SO PUR 2. c.		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,02	0,03	0,10	0,37	0,05	1,00		1,00		1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
SO PUR 3. c.		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,01	0,02	0,06	0,26	0,03	1,00		1,00	1,00		1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
SO PUR Ref.		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,41	0,58	0,83	0,99	0,67	1,00		1,00	1,00	1,00		1,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		

Příloha č. 12 Tukeyův test významnosti rozdílů modulu pružnosti (1/4)

			BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	OL	OL	OL	OL	OL	OL	OL	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1	
Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.			
RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR			
BK	Ref.	RPF		0,97	0,38	1,00	1,00	0,92	1,00	0,98	0,91	0,00	1,00	0,59	1,00	0,01	0,93	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90		
BK	Ref.	PUR	0,97		0,00	0,82	1,00	1,00	0,88	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,78	0,99	0,98	1,00
BK	1.c.	RPF	0,38	0,00		0,68	0,21	0,00	0,59	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
BK	1.c.	PUR	1,00	0,82	0,68		1,00	0,71	1,00	0,87	0,67	0,00	1,00	0,31	1,00	0,00	0,72	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	
BK	2.c.	RPF	1,00	1,00	0,21	1,00		0,98	1,00	1,00	0,98	0,00	1,00	0,80	1,00	0,01	0,99	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	1,00	0,02	0,00	0,00	0,97	
BK	2.c.	PUR	0,92	1,00	0,00	0,71	0,98		0,78	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,87	1,00	0,99	1,00
BK	3.c.	RPF	1,00	0,88	0,59	1,00	1,00	0,78		0,92	0,75	0,00	1,00	0,38	1,00	0,00	0,80	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	1,00	0,00	0,00	0,00	0,74	
BK	3.c.	PUR	0,98	1,00	0,00	0,87	1,00	1,00	0,92		1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,71	0,98	0,96	1,00
SM	Ref.	RPF	0,91	1,00	0,00	0,67	0,98	1,00	0,75	1,00		0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	0,99	1,00
SM	Ref.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	0,07	0,02	0,00	0,06	0,61	0,18	0,25	0,00
SM	1.c.	RPF	1,00	1,00	0,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00		1,00	1,00	0,31	1,00	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	0,53	1,00	0,33	0,02	0,13	0,09	1,00
SM	1.c.	PUR	0,59	1,00	0,00	0,31	0,80	1,00	0,38	1,00	1,00	0,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,83	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00
SM	2.c.	RPF	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00		0,83	1,00	1,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,81	0,96	1,00	0,85	0,16	0,57	0,47	1,00
SM	2.c.	PUR	0,01	1,00	0,00	0,00	0,01	1,00	0,00	1,00	1,00	0,06	0,31	1,00	0,83		1,00	1,00	0,16	0,00	1,00	0,77	0,20	0,00	0,15	0,02	1,00	1,00	0,93	1,00	1,00	1,00	1,00	
SM	3.c.	RPF	0,93	1,00	0,00	0,72	0,99	1,00	0,80	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,86	1,00	0,99	1,00
SM	3.c.	PUR	0,09	1,00	0,00	0,03	0,19	1,00	0,04	1,00	1,00	0,00	0,89	1,00	1,00	1,00	1,00	0,01	0,00	0,00	1,00	0,19	0,02	0,00	0,01	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
OL	Ref.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,01	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,18	0,07	0,00	0,15	0,83	0,37	0,46	0,00	
OL	Ref.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	
OL	1.c.	RPF	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,44	0,00	0,26	0,48	0,95	0,00	0,83	0,03	1,00	0,43	1,00	0,99	0,10	1,00	1,00	0,36	0,99	0,79	1,00	1,00	0,05	1,00	1,00	1,00	1,00	0,49	
OL	1.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,01	0,00	0,77	0,00	0,19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	0,54	0,00	0,75	1,00	0,94	0,97	0,00	
OL	2.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,23	0,09	0,00	0,19	0,88	0,44	0,54	0,00	
OL	2.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,36	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,01	0,02	0,00	
OL	3.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,01	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,17	0,06	0,00	0,14	0,81	0,34	0,44	0,00	
OL	3.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	1,00	1,00	0,79	1,00	1,00	1,00	1,00	0,02	0,01	0,00	0,02	0,33	0,07	0,10	0,00	
K1	Ref.	RPF	0,00	1,00	0,00	0,00	0,01	1,00	0,00	1,00	1,00	0,07	0,28	1,00	0,81	1,00	1,00	1,00	0,18	0,00	1,00	0,80	0,23	0,00	0,17	0,02	1,00	1,00	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	
K1	Ref.	PUR	0,02	1,00	0,00	0,00	0,04	1,00	0,01	1,00	1,00	0,02	0,53	1,00	0,96	1,00	1,00	1,00	0,07	0,00	1,00	0,54	0,09	0,00	0,06	0,01	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	
K1	1.c.	RPF	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,93	1,00	1,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92	0,99	1,00	0,94	0,28	0,75	0,65	1,00
K1	1.c.	PUR	0,01	1,00	0,00	0,00	0,02	1,00	0,00	1,00	1,00	0,06	0,33	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	0,15	0,00	1,00	0,75	0,19	0,00	0,14	0,02	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	
K1	2.c.	RPF	0,00	0,78	0,00	0,00	0,00	0,87	0,00	0,71	0,90	0,61	0,02	0,99	0,16	1,00	0,86	1,00	0,83	0,01	1,00	1,00	0,88	0,08	0,81	0,33	1,00	1,00	0,28	1,00	1,00	1,00	0,90	
K1	2.c.	PUR	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,98	1,00	0,18	0,13	1,00	0,57	1,00	1,00	1,00	0,37	0,00	1,00	0,94	0,44	0,01	0,34	0,07	1,00	1,00	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00	
K1	3.c.	RPF	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,96	0,99	0,25	0,09	1,00	0,47	1,00	0,99	1,00	0,46	0,00	1,00	0,97	0,54	0,02	0,44	0,10	1,00	1,00	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	
K1	3.c.	PUR	0,90	1,00	0,00	0,66	0,97	1,00	0,74	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	1,00	1,00

Priloha č. 13 Tukeyův test významnosti rozdílů modulu pružnosti (2/4)

			K2								K3								K4								K5							
			Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.
			RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR
BK	Ref.	RPF	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	0,30	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	0,88	1,00	0,62	1,00	0,74	0,61	0,99	1,00	0,01	1,00	1,00	1,00	1,00	0,15	1,00	1,00	0,50	1,00	1,00	
BK	Ref.	PUR	1,00	1,00	0,07	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,91	1,00	0,00	1,00	0,55	1,00	0,92	1,00	0,72	1,00	0,00	1,00	0,22	1,00	0,34	1,00	
BK	1.c.	RPF	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	0,00	1,00	0,00	0,90	0,00	0,52	0,01	0,79	0,01	1,00	0,00	0,99	0,00	0,98	0,00	
BK	1.c.	PUR	1,00	0,88	1,00	1,00	1,00	0,12	1,00	0,99	1,00	1,00	0,67	1,00	0,63	1,00	0,33	1,00	0,44	0,87	0,91	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,37	0,96	1,00	0,23	1,00	1,00	
BK	2.c.	RPF	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	0,97	1,00	0,82	1,00	0,90	0,39	1,00	1,00	0,02	1,00	1,00	1,00	1,00	0,07	1,00	1,00	0,71	1,00	1,00	
BK	2.c.	PUR	1,00	1,00	0,04	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,69	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,84	1,00	0,00	1,00	0,42	1,00	0,84	1,00	0,59	1,00	0,00	1,00	0,14	1,00	0,24	1,00	
BK	3.c.	RPF	1,00	0,92	1,00	1,00	1,00	0,15	1,00	1,00	1,00	1,00	0,75	1,00	0,71	1,00	0,40	1,00	0,53	0,81	0,95	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,30	0,98	1,00	0,30	1,00	1,00	
BK	3.c.	PUR	1,00	1,00	0,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	1,00	0,00	1,00	0,63	1,00	0,95	1,00	0,78	1,00	0,00	1,00	0,27	1,00	0,41	1,00	
SM	Ref.	RPF	1,00	1,00	0,04	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,81	1,00	0,00	1,00	0,39	1,00	0,81	1,00	0,55	1,00	0,00	1,00	0,13	1,00	0,21	1,00	
SM	Ref.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SM	1.c.	RPF	1,00	1,00	0,97	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,02	1,00	1,00	0,40	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
SM	1.c.	PUR	1,00	1,00	0,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,29	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,44	1,00	0,00	1,00	0,13	1,00	0,45	1,00	0,22	1,00	0,00	1,00	0,03	1,00	0,06	1,00	
SM	2.c.	RPF	1,00	1,00	0,57	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,99	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,85	1,00	0,94	1,00	
SM	2.c.	PUR	0,85	1,00	0,00	0,70	0,52	1,00	0,73	0,95	0,70	0,90	0,00	1,00	0,90	1,00	0,58	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,27	0,00	0,37	0,00	0,99	0,00	1,00	0,00	0,51	
SM	3.c.	RPF	1,00	1,00	0,05	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	0,00	1,00	0,44	1,00	0,85	1,00	0,61	1,00	0,00	1,00	0,15	1,00	0,25	1,00	
SM	3.c.	PUR	1,00	1,00	0,00	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	0,02	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	0,05	1,00	0,00	1,00	0,01	1,00	0,05	0,86	0,02	0,93	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,97	
OL	Ref.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OL	Ref.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OL	1.c.	RPF	0,03	0,26	0,00	0,01	0,01	0,97	0,01	0,07	0,01	0,04	0,00	0,48	0,04	0,52	0,01	0,81	0,00	0,70	0,00	0,21	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,90	0,00	0,00
OL	1.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	
OL	2.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OL	2.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OL	3.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
OL	3.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
K1	Ref.	RPF	0,82	1,00	0,00	0,67	0,48	1,00	0,70	0,94	0,67	0,88	0,00	1,00	0,87	1,00	0,55	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,24	0,00	0,34	0,00	0,99	0,00	1,00	0,00	0,47		
K1	Ref.	PUR	0,96	1,00	0,00	0,89	0,75	1,00	0,91	0,99	0,89	0,98	0,00	1,00	0,98	1,00	0,81	1,00	0,01	1,00	0,00	1,00	0,00	0,01	0,48	0,00	0,60	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,74	
K1	1.c.	RPF	1,00	1,00	0,39	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,95	0,97	1,00	1,00	0,99	1,00	0,00	1,00	0,70	1,00	0,84	1,00	
K1	1.c.	PUR	0,86	1,00	0,00	0,72	0,54	1,00	0,75	0,96	0,72	0,91	0,00	1,00	0,91	1,00	0,61	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,28	0,00	0,39	0,00	0,99	0,00	1,00	0,00	0,53		
K1	2.c.	RPF	0,17	0,70	0,00	0,09	0,05	1,00	0,11	0,31	0,09	0,23	0,00	0,90	0,22	0,92	0,06	0,99	0,00	0,98	0,00	0,64	0,00	1,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,50	0,00	1,00	0,00	0,04
K1	2.c.	PUR	0,59	0,98	0,00	0,42	0,26	1,00	0,45	0,79	0,42	0,68	0,00	1,00	0,67	1,00	0,31	1,00	0,00	1,00	0,00	0,97	0,00	1,00	0,00	0,11	0,00	0,16	0,00	0,92	0,00	1,00	0,00	0,25
K1	3.c.	RPF	0,48	0,96	0,00	0,32	0,19	1,00	0,35	0,69	0,32	0,58	0,00	1,00	0,57	1,00	0,23	1,00	0,00	1,00	0,00	0,93	0,00	1,00	0,00	0,07	0,00	0,11	0,00	0,86	0,00	1,00	0,00	0,18
K1	3.c.	PUR	1,00	1,00	0,04	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,63	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,80	1,00	0,00	1,00	0,37	1,00	0,80	1,00	0,54	1,00	0,00	1,00	0,12	1,00	0,20	1,00

Příloha č. 14 Tukeyův test významnosti rozdílů modulu pružnosti (3/4)

			BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	OL	OL	OL	OL	OL	OL	OL	OL	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1
			Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.		
			RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR
K2	Ref.	RPF	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,85	1,00	1,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,82	0,96	1,00	0,86	0,17	0,59	0,48	1,00			
K2	Ref.	PUR	0,98	1,00	0,00	0,88	1,00	1,00	0,92	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,70	0,98	0,96	1,00					
K2	1.c.	RPF	1,00	0,07	1,00	1,00	1,00	0,04	1,00	0,10	0,04	0,00	0,97	0,01	0,57	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04			
K2	1.c.	PUR	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,70	1,00	1,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,89	1,00	0,72	0,09	0,42	0,32	1,00					
K2	2.c.	RPF	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,52	1,00	0,97	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	0,75	1,00	0,54	0,05	0,26	0,19	1,00						
K2	2.c.	PUR	0,30	1,00	0,00	0,12	0,50	1,00	0,15	1,00	1,00	0,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,97	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00				
K2	3.c.	RPF	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,73	1,00	1,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,91	1,00	0,75	0,11	0,45	0,35	1,00						
K2	3.c.	PUR	1,00	1,00	0,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,94	0,99	1,00	0,96	0,31	0,79	0,69	1,00							
K3	Ref.	RPF	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,70	1,00	1,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	0,89	1,00	0,72	0,09	0,42	0,32	1,00							
K3	Ref.	PUR	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	1,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,88	0,98	1,00	0,91	0,23	0,68	0,58	1,00								
K3	1.c.	RPF	1,00	0,80	0,70	1,00	1,00	0,69	1,00	0,85	0,65	0,00	1,00	0,29	1,00	0,00	0,70	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63				
K3	1.c.	PUR	0,90	1,00	0,00	0,67	0,98	1,00	0,75	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	1,00	1,00					
K3	2.c.	RPF	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	1,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87	0,98	1,00	0,91	0,22	0,67	0,57	1,00									
K3	2.c.	PUR	0,88	1,00	0,00	0,63	0,97	1,00	0,71	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,00	1,00						
K3	3.c.	RPF	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,58	1,00	0,99	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55	0,81	1,00	0,61	0,06	0,31	0,23	1,00									
K3	3.c.	PUR	0,62	1,00	0,00	0,33	0,82	1,00	0,40	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,81	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00						
K4	Ref.	RPF	1,00	0,91	0,52	1,00	1,00	0,84	1,00	0,95	0,81	0,00	1,00	0,44	1,00	0,00	0,85	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80					
K4	Ref.	PUR	0,74	1,00	0,00	0,44	0,90	1,00	0,53	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,70	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00						
K4	1.c.	RPF	0,61	0,00	1,00	0,87	0,39	0,00	0,81	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
K4	1.c.	PUR	0,99	1,00	0,00	0,91	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,64	0,97	0,93	1,00										
K4	2.c.	RPF	1,00	0,55	0,90	1,00	1,00	0,42	1,00	0,63	0,39	0,00	1,00	0,13	0,99	0,00	0,44	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37					
K4	2.c.	PUR	0,01	1,00	0,00	0,00	0,02	1,00	0,00	1,00	1,00	0,04	0,40	1,00	0,90	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,67	0,14	0,00	0,10	0,01	1,00	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00						
K4	3.c.	RPF	1,00	0,92	0,52	1,00	1,00	0,84	1,00	0,95	0,81	0,00	1,00	0,45	1,00	0,00	0,85	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80					
K4	3.c.	PUR	1,00	1,00	0,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,27	1,00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	0,48	1,00	0,28	0,01	0,11	0,07	1,00									
K5	Ref.	RPF	1,00	0,72	0,79	1,00	1,00	0,59	1,00	0,78	0,55	0,00	1,00	0,22	1,00	0,00	0,61	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54					
K5	Ref.	PUR	1,00	1,00	0,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,37	1,00	0,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,60	1,00	0,39	0,02	0,16	0,11	1,00										
K5	1.c.	RPF	0,15	0,00	1,00	0,37	0,07	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						
K5	1.c.	PUR	1,00	1,00	0,00	0,96	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	1,00	1,00	0,99	0,50	0,92	0,86	1,00										
K5	2.c.	RPF	1,00	0,22	0,99	1,00	1,00	0,14	1,00	0,27	0,13	0,00	1,00	0,03	0,85	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12						
K5	2.c.	PUR	0,50	1,00	0,00	0,23	0,71	1,00	0,30	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,90	0,02	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00							
K5	3.c.	RPF	1,00	0,34	0,98	1,00	1,00	0,24	1,00	0,41	0,21	0,00	1,00	0,06	0,94	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20						
K5	3.c.	PUR	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,51	1,00	0,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	0,74	1,00	0,53	0,04	0,25	0,18	1,00										





Priloha č. 17 Tukeyův test významnosti rozdílů ohybové pevnosti (2/4)

			K2								K3								K4								K5							
			Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.
			RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR
BK	Ref.	RPF	0,04	0,00	0,93	0,93	0,30	1,00	0,85	0,16	0,19	0,98	0,01	0,82	0,96	0,02	0,96	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,69	0,00	0,84	0,00	0,00	0,01	0,01	0,61	0,00	0,02	1,00	0,25
BK	Ref.	PUR	0,01	0,00	0,74	0,73	0,12	0,99	0,60	0,06	0,07	0,86	0,00	0,55	0,79	0,01	0,81	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,40	0,00	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	1,00	0,10
BK	1.c.	RPF	0,03	0,00	0,90	0,89	0,25	1,00	0,80	0,13	0,15	0,96	0,01	0,77	0,93	0,02	0,94	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,62	0,00	0,79	0,00	0,00	0,01	0,01	0,54	0,00	0,01	1,00	0,21
BK	1.c.	PUR	0,15	0,01	1,00	1,00	0,62	1,00	0,98	0,42	0,47	1,00	0,05	0,98	1,00	0,09	1,00	0,00	0,12	0,00	0,05	0,01	0,93	0,00	0,98	0,00	0,00	0,05	0,06	0,89	0,01	0,07	1,00	0,56
BK	2.c.	RPF	0,22	0,02	1,00	1,00	0,74	1,00	0,99	0,53	0,59	1,00	0,08	0,99	1,00	0,13	1,00	0,00	0,18	0,00	0,07	0,01	0,97	0,00	0,99	0,00	0,00	0,08	0,10	0,95	0,02	0,10	1,00	0,68
BK	2.c.	PUR	0,07	0,00	0,97	0,97	0,42	1,00	0,93	0,25	0,29	0,99	0,02	0,91	0,98	0,04	0,99	0,00	0,06	0,00	0,02	0,00	0,81	0,00	0,92	0,00	0,00	0,02	0,03	0,74	0,00	0,03	1,00	0,37
BK	3.c.	RPF	0,00	0,00	0,34	0,33	0,02	0,86	0,23	0,01	0,01	0,48	0,00	0,20	0,40	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,02	
BK	3.c.	PUR	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,46	1,00	0,87	1,00	0,99	1,00	0,85	1,00	0,84	0,23	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
SM	Ref.	RPF	0,99	1,00	0,10	0,11	0,70	0,01	0,17	0,87	0,83	0,06	1,00	0,20	0,08	1,00	0,08	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	0,31	1,00	0,19	1,00	1,00	1,00	1,00	0,38	1,00	1,00	0,00	0,76
SM	Ref.	PUR	0,04	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,12	0,00	0,00	0,07	0,00	0,99	0,05	0,83	0,14	0,42	0,00	0,84	0,00	0,85	1,00	0,13	0,10	0,00	0,37	0,10	0,00	0,00
SM	1.c.	RPF	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,82	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,34	1,00	
SM	1.c.	PUR	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	0,00	0,11	0,00	0,02	0,00	0,12	0,00	0,13	0,69	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	
SM	2.c.	RPF	0,11	0,61	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03	0,02	0,00	0,28	0,00	0,00	0,19	0,00	1,00	0,13	0,96	0,30	0,68	0,00	0,96	0,00	0,97	1,00	0,29	0,24	0,00	0,63	0,23	0,00	0,01
SM	2.c.	PUR	0,61	0,99	0,01	0,01	0,14	0,00	0,01	0,27	0,23	0,00	0,86	0,02	0,00	0,75	0,00	1,00	0,66	1,00	0,88	0,99	0,03	1,00	0,01	1,00	1,00	0,87	0,83	0,04	0,99	0,82	0,00	0,17
SM	3.c.	RPF	1,00	1,00	0,19	0,20	0,85	0,02	0,30	0,95	0,93	0,11	1,00	0,33	0,16	1,00	0,15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,47	1,00	0,31	1,00	1,00	1,00	1,00	0,55	1,00	1,00	0,00	0,89
SM	3.c.	PUR	0,09	0,55	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,23	0,00	0,00	0,15	0,00	1,00	0,11	0,94	0,25	0,62	0,00	0,95	0,00	0,95	1,00	0,24	0,20	0,00	0,56	0,19	0,00	0,01
OL	Ref.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OL	Ref.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OL	1.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OL	1.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OL	2.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OL	2.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OL	3.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OL	3.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K1	Ref.	RPF	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,53	1,00	
K1	Ref.	PUR	1,00	1,00	0,98	0,99	1,00	0,66	1,00	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00	0,97	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,21	1,00
K1	1.c.	RPF	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,55	1,00
K1	1.c.	PUR	1,00	1,00	0,33	0,35	0,95	0,05	0,47	0,99	0,98	0,22	1,00	0,52	0,28	1,00	0,27	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	0,49	1,00	1,00	1,00	1,00	0,74	1,00	1,00	0,00	0,97
K1	2.c.	RPF	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,59	1,00
K1	2.c.	PUR	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	1,00
K1	3.c.	RPF	1,00	1,00	0,52	0,54	0,99	0,11	0,67	1,00	1,00	0,37	1,00	0,72	0,46	1,00	0,45	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,84	1,00	0,69	1,00	1,00	1,00	1,00	0,89	1,00	1,00	0,01	0,99
K1	3.c.	PUR	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,58	1,00

Příloha č. 18 Tukeyův test významnosti rozdílů ohybové pevnosti (3/4)

			BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	BK	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	SM	OL	OL	OL	OL	OL	OL	OL	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1	K1	
	Ref.	RPF	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.	Ref.	Ref.	1.c.	1.c.	2.c.	2.c.	3.c.	3.c.
	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR	RPF	PUR
K2	Ref.	RPF	0,04	0,01	0,03	0,15	0,22	0,07	0,00	1,00	0,99	0,04	1,00	0,00	0,11	0,61	1,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K2	Ref.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	1,00	1,00	0,36	1,00	0,01	0,61	0,99	1,00	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K2	1.c.	RPF	0,93	0,74	0,90	1,00	1,00	0,97	0,34	1,00	0,10	0,00	1,00	0,00	0,00	0,01	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,98	1,00	0,33	1,00	1,00	0,52	1,00	
K2	1.c.	PUR	0,93	0,73	0,89	1,00	1,00	0,97	0,33	1,00	0,11	0,00	1,00	0,00	0,00	0,01	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,99	1,00	0,35	1,00	1,00	0,54	1,00	
K2	2.c.	RPF	0,30	0,12	0,25	0,62	0,74	0,42	0,02	1,00	0,70	0,00	1,00	0,00	0,01	0,14	0,85	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00	0,99	1,00	
K2	2.c.	PUR	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,86	1,00	0,01	0,00	0,82	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,94	0,66	0,94	0,05	0,96	0,92	0,11	0,95	
K2	3.c.	RPF	0,85	0,60	0,80	0,98	0,99	0,93	0,23	1,00	0,17	0,00	1,00	0,00	0,00	0,01	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,47	1,00	1,00	0,67	1,00	
K2	3.c.	PUR	0,16	0,06	0,13	0,42	0,53	0,25	0,01	1,00	0,87	0,01	1,00	0,00	0,03	0,27	0,95	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	
K3	Ref.	RPF	0,19	0,07	0,15	0,47	0,59	0,29	0,01	1,00	0,83	0,01	1,00	0,00	0,02	0,23	0,93	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	
K3	Ref.	PUR	0,98	0,86	0,96	1,00	1,00	0,99	0,48	1,00	0,06	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,95	1,00	0,22	1,00	1,00	0,37	1,00	
K3	1.c.	RPF	0,01	0,00	0,01	0,05	0,08	0,02	0,00	1,00	1,00	0,12	1,00	0,00	0,28	0,86	1,00	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K3	1.c.	PUR	0,82	0,55	0,77	0,98	0,99	0,91	0,20	1,00	0,20	0,00	1,00	0,00	0,00	0,02	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,52	1,00	1,00	0,72	1,00	
K3	2.c.	RPF	0,96	0,79	0,93	1,00	1,00	0,98	0,40	1,00	0,08	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,97	1,00	0,28	1,00	1,00	0,46	1,00	
K3	2.c.	PUR	0,02	0,01	0,02	0,09	0,13	0,04	0,00	1,00	1,00	0,07	1,00	0,00	0,19	0,75	1,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K3	3.c.	RPF	0,96	0,81	0,94	1,00	1,00	0,99	0,41	1,00	0,08	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,97	1,00	0,27	1,00	1,00	0,45	1,00	
K3	3.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	1,00	0,99	1,00	0,42	1,00	1,00	1,00	1,00	0,03	0,00	0,00	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
K4	Ref.	RPF	0,03	0,01	0,02	0,12	0,18	0,06	0,00	1,00	0,99	0,05	1,00	0,00	0,13	0,66	1,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K4	Ref.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87	1,00	0,83	1,00	0,11	0,96	1,00	1,00	0,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K4	1.c.	RPF	0,01	0,00	0,01	0,05	0,07	0,02	0,00	1,00	1,00	0,14	1,00	0,00	0,30	0,88	1,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K4	1.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,99	1,00	0,42	1,00	0,02	0,68	0,99	1,00	0,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K4	2.c.	RPF	0,69	0,40	0,62	0,93	0,97	0,81	0,12	1,00	0,31	0,00	1,00	0,00	0,00	0,03	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,67	1,00	1,00	0,84	1,00	
K4	2.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,85	1,00	0,84	1,00	0,12	0,96	1,00	1,00	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K4	3.c.	RPF	0,84	0,58	0,79	0,98	0,99	0,92	0,21	1,00	0,19	0,00	1,00	0,00	0,00	0,01	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,49	1,00	1,00	0,69	1,00	
K4	3.c.	PUR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,84	1,00	0,85	1,00	0,13	0,97	1,00	1,00	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K5	Ref.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	1,00	1,00	1,00	0,69	1,00	1,00	1,00	1,00	0,08	0,00	0,00	0,07	0,03	0,06	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K5	Ref.	PUR	0,01	0,00	0,01	0,05	0,08	0,02	0,00	1,00	1,00	0,13	1,00	0,00	0,29	0,87	1,00	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K5	1.c.	RPF	0,01	0,00	0,01	0,06	0,10	0,03	0,00	1,00	1,00	0,10	1,00	0,00	0,24	0,83	1,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K5	1.c.	PUR	0,61	0,33	0,54	0,89	0,95	0,74	0,09	1,00	0,38	0,00	1,00	0,00	0,00	0,04	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,74	1,00	1,00	0,89	1,00	
K5	2.c.	RPF	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	1,00	1,00	0,37	1,00	0,02	0,63	0,99	1,00	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K5	2.c.	PUR	0,02	0,00	0,01	0,07	0,10	0,03	0,00	1,00	1,00	0,10	1,00	0,00	0,23	0,82	1,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
K5	3.c.	RPF	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,53	0,21	0,55	0,00	0,59	0,50	0,01	0,58	
K5	3.c.	PUR	0,25	0,10	0,21	0,56	0,68	0,37	0,02	1,00	0,76	0,00	1,00	0,00	0,01	0,17	0,89	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,97	1,00	1,00	0,99	1,00	













