

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

**Vrstvovité kompozity na bázi dřeva  
s použitím nedřevních materiálů**

Bakalářská práce

Autor: Vojtěch Pechar  
Vedoucí práce: Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

2016

# Zadání bakalářské práce

## ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

### ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vojtěch Pechar

Podnikání ve dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu

Název práce

Vrstvovité kompozity na bázi dřeva s použitím nedřevních materiálů

Název anglicky

Laminated wood-based composites with using non-wood materials

---

Cíle práce

Hlavním cílem práce je analýza současných technologií výroby lamelových kompozitů ze dřeva a dřevných materiálů v kombinaci s jinými nedřevními materiály.

Metodika

1. Teoretický rozbor metod výroby kompozitů z lamelového dřeva s využitím kombinace dřevných a nedřevných materiálů pro cílené vlastnosti. Charakteristika vlastností kombinovaných lamelových materiálů a možnosti jejich použití v porovnání s klasickými kompozitmi vyrobenými pouze z materiálů na báze dřeva. Vyhodnocení vhodnosti nedřevných materiálů z hlediska finálních vlastností.

**Doporučený rozsah práce**

40-50

**Klíčová slova**

kompozity, dřevné materiály, nedřevné materiály, lamelování,

---

**Doporučené zdroje informací**

- GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P., ŠLEZINGEROVÁ, J. Nauka o dřevě. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009, 176 s.
- JOCHIM, S., DUDAS, J. Konštrukčné dřevné materiály pre drevené stavebné konštrukcie a výroby. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008, 161 s.
- KRÁL, P., HRÁZSKÝ, J. Kompozitní materiály na bázi dřeva. Část 2: Dýhy a vrstvené masivní materiály. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2006, 168 s.
- KUKLÍK, P., MELZEROVÁ, L. Kompozitní materiály na bázi dřeva. ČVUT Praha, 2011, 76 s.
- MÁLEK, P. Stavební materiály a konstrukce. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zemědělská fakulta, 2002, 207 s.
- NOVOTNÝ, J., TOBOLKA, Z. Stavební materiály : určeno pro stud. fak. stavební. Praha: ČVUT, 1991.
- ŠTEFKA, V. Kompozitné dřevné materiály. Časť II., Technológia aglomerovaných materiálův. Zvolen: Technická univerzita, 2002
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2015/16 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

**Garantující pracoviště**

Katedra základního zpracování dřeva

**Konzultant**

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Elektronicky schváleno dne 26. 3. 2015

Ing. Milan Gaff, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 10. 2015

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 09. 04. 2016

---

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vrstvovité kompozity na bázi dřeva s použitím nedřevních materiálů vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Gašparíka, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze dne.....

Podpis autora

## **Poděkování**

*Tímto způsobem bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Miroslavovi Gašparíkovi, PhD. za ochotu, trpělivost a možnost častých konzultací. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lence Melzerové PhD. z Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze za poskytnuté materiály. A v poslední řadě bych chtěl poděkovat doc. Ing. Milanovi Gaffovi, PhD. za poskytnuté materiály a rady.*

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá využívání materiálu, které nejsou na bázi dřeva v kombinaci s lepenými, případně jinak spojenými materiály na bázi dřeva a sleduje interakci mezi nimi při různých testech. V práci je srovnání materiálu na bázi dřeva s nedřevními materiály a jeho vyhodnocení. Práce popisuje kombinaci těchto materiálu a popisuje její chování.

## **Klíčová slova**

kompozity, kompozity na bázi dřeva, nedřevní kompozity, interakce, vyhodnocení, lamely, plasty na bázi uhlíkových vláken, plasty na bázi skelných vláken, plasty na bázi čedičových vláken, pruty

## **Abstract**

This paper is about using non-wood materials in combination with laminated or differently combined wood materials and observes interaction between those materials during tests. In paper there is comparison between wood-based materials with non-wood materials and its evaluation. Paper describes combination these materials and describes behavior between them.

## **Keywords**

composites, wood-based composites, non-wood based composites, interaction, evaluation, lamelas, carbon fiber reinforced plastic, glass fiber reinforced plastic, basalt fiber reinforced plastic, rods

# 1 Obsah

2	Úvod .....	11
3	Dřevo jako materiál .....	12
4	Fyzikální a mechanické vlastnosti .....	14
4.1	Pevnost v tlaku .....	15
4.1.1	Ve směru vláken .....	15
4.2	Pevnost v ohybu .....	15
4.3	Mechanická pevnost .....	15
4.4	Hustota .....	15
5	Velkoplošné materiály na bázi dřeva .....	16
6	Kompozitní materiály na bázi dřeva .....	18
6.1	Vrstvovité kompozity s využitím dřevních materiálů .....	18
6.1.1	Překližkované desky .....	18
6.1.2	Vrstvené lisované dřevo (LVL) .....	20
6.1.3	Vrstvové dřevo z dýhových pásů a z dlouhých třísek .....	21
6.1.4	Lepené lamelové dřevo (BSH) .....	21
6.1.5	Křížem vrstvené dřevo (CLT) .....	24
6.2	Vrstvovité kompozity s využitím nedřevních materiálů .....	24
6.2.1	CFRP lamely .....	25
6.2.2	GFRP lamely .....	30
6.2.3	GFW .....	32
6.2.4	GFRP pruty .....	35
6.2.5	HFRP .....	42
6.2.6	BFRP pruty .....	45
7	Závěr .....	52
8	Zdroje .....	53



## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Přehled mechanických a fyzikálních vlastností dřeva [5] .....	14
Tabulka 2 - Kompozitní materiály na bázi dřeva - přehled .....	18
Tabulka 4 - hodnoty pevností a tuhostí lepeného lamelovaného dřeva [5] .....	22
Tabulka 5 - Měřené průhyby nosníků při srovnávacím a maximálním zatížení, včetně hodnot sil při destrukcích nosníků [3] .....	23
Tabulka 6 - Zjednodušené statistické vyjádření výsledků měření průhybů nosníků .....	23
Tabulka 7 - Zjednodušené statistické vyjádření výsledků měření modulu pružnosti [3]	24
Tabulka 8 - Hodnoty jednotlivých uhlíkových vláken [4] .....	26
Tabulka 9 - Vlastnosti CFRP lamel vyráběných pod názvem CarboDur [13] .....	26
Tabulka 10 - Porovnání výsledných průhybů při srovnávacím a maximálním zatížení a výsledné síle u lamel na bázi uhlíkových vláken [3] .....	28
Tabulka 11 - Porovnání výsledných průhybů při srovnávacím a maximálním zatížení a výsledné síle u lamel na bázi skelných vláken [3] .....	31
Tabulka 12 - Výsledky ohybového testu [8] .....	34
Tabulka 13 - Výsledky tahového testu [8] .....	34
Tabulka 14 - Souhrn použitých nosníků [10] .....	37
Tabulka 15 - Výsledky měření u čtyř-bodového ohybu [9] .....	44
Tabulka 16 - Přehled použitých nosníků a jejich fáze [11] .....	47

## Seznam obrázků a grafů

Obrázek 1 - Schéma ohybové zkoušky, zdroj: <a href="http://stavba.tzb-info.cz">http://stavba.tzb-info.cz</a> .....	27
Obrázek 2 - Nosník vyztužen uhlíkovou lamelou na spodním povrchu, zdroj: <a href="http://stavba.tzb-info.cz">http://stavba.tzb-info.cz</a> .....	27
Obrázek 3 - Srovnání průhybů při maximálním zatížení u různého typu nosníků [3] ...	29
Obrázek 4 - Srovnání sil při destrukci u různého typu nosníků [3] .....	29
Obrázek 5 - Srovnání průhybů při maximálním zatížení u různého typu nosníků [3] ...	31
Obrázek 6 - Srovnání sil při destrukci u různého typu nosníků [3] .....	32
Obrázek 7 - Schéma GFW vrstev [8] .....	33
Obrázek 8 - Schéma nosníků vyztužených skelnými pruty a bez vyztužení [10] .....	36
Obrázek 9 - Schéma zkoušky čtyř-bodového ohybu dle EN 408 [10] .....	37
Obrázek 10 - Výsledné průhyby u nosníků fáze A [10] .....	38
Obrázek 11 - Výsledné průhyby u nosníků fáze B [10] .....	39
Obrázek 12 - Výsledné průhyby u nosníků fáze C [10] .....	39
Obrázek 13 - Výsledné průhyby u nosníků fáze D [10] .....	40
Obrázek 14 - Výsledné průhyby u nosníků fáze E [10] .....	41
Obrázek 15 - Schéma testu měření vyztužených nosníků [9] .....	43
Obrázek 16 - Schéma prováděného čtyř-bodového ohybu [11] .....	46
Obrázek 17 - Výběr použitých nosníků při výzkumu [11] .....	47
Obrázek 18 - Výsledné průhyby u nosníků fáze A [11] .....	48
Obrázek 19 - Výsledné průhyby u nosníků fáze B [11] .....	48
Obrázek 20 - Výsledné průhyby u nosníků fáze C [11] .....	49
Obrázek 21 - Výsledné průhyby u nosníků fáze D [11] .....	50
Obrázek 22 - Výsledné průhyby u nosníků fáze E [11] .....	50

Obrázek 23 - Výsledné průhyby u nosníků fáze F [11].....	51
--	----

## 2 Úvod

Člověk od počátků využívání své mozkové kapacity a schopnosti přetvářet okolní svět ke své spokojenosti zjistil, že kolem něj roste velké množství dřevní hmoty. Samozřejmě zpočátku nevěděl, co to je a co se s tím dá dělat. Poté našel ležící strom, který hořel a zjistil, že dřevo je hořlavé a má přijatelnou tepelnou energii. Když bylo potřeba zbudovat si přístřešek, nejdříve vykopal díru, kterou přikryl větvemi, poté ale zjistil, že dřevo jako takové je velice lehký, relativně ohebný a velice pevný materiál. Proto se naučil ho opracovávat a nepoužívat dřevo pouze jako topení, ale i jako základ svého přístřešku, domu nebo ubikace.

V pozdějších dobách zjistil, že když z pokáceného stromu vymanipuluje pouze kvalitní hmotu, i když pouze v malém množství, a například spojí jí k sobě lepidlem nebo mechanickými prostředky, dostane velice pevný materiál, který je zároveň lehký a má dobré mechanické vlastnosti obecně. Takto přemýšlel i v případě, že při manipulaci s dřevem vzniká sekundární produkt, zejména odpad, a ten se dá využívat ve stejné míře a vymyslely se aglomerované materiály.

V rozmachu automobilového a kosmického průmyslu bylo potřeba vymyslet materiál, který by byl ještě pevnější a zároveň lehký a byly vynalezeny kompozitní materiály, které potlačují negativní vlastnosti daných spojených materiálů a zároveň vylepšují pozitivní vlastnosti. Zejména stojí za zmínku materiály na bázi uhlíkových, skelných a aramidových vláken, které se v současné době využívají v širokém spektru využití a potkáváme je takřka denně.

Součástí této práce je právě využívání syntetických materiálů na uhlíkové, skelné a jiné bázi v kompozitních materiálech, které mají základ v dřevu a jeho vyhodnocení, zda-li se vyplatí kupovat dražší materiály na bázi vláken nebo pouze si vystačit s dřevem v oblasti stavebnictví a v případě koupě jestli vhodně doplňují dřevo, protože právě problematika využívání materiálů na bázi vláken v oblasti kompozitních materiálů na dřevní bázi, je tématem dnešní doby a vzhledem k velkému pokroku ve vědě a průmyslu je také na místě tento problém řešit.

### 3 Dřevo jako materiál

Dřevo jako materiál je používané od nepaměti. Dalo by se říci, že ze dřeva se dá vyrobit takřka cokoli, co vidíme a používáme v běžném životě a v minulosti to byl hlavní materiál k výrobě všech domácích potřeb, zbraní, ale i staveb, nábytku aj. Dřevu pomáhal a pomáhá fakt, že jeho získání je relativně jednoduché a relativně jednoduché i jeho následné zpracování a je to obnovitelný zdroj.

Díky vhodným vlastnostem dřeva jako je jeho lehkost, relativně snadná opracovatelnost, dobré izolační vlastnosti, schopnost tlumit vibrace, vysoká odolnost proti biotickým i abiotickým chemikáliím, dřevo můžeme lehce spojovat do funkčních celků pomocí hřebíků, vrutů, svorníků, lepidel nebo kombinací tvarovaných spojů a lepidel, případně pomocí tavitelných plastů a i přes to, že dřevo spojíme do dlouhého nosníku, stále je dobře manipulovatelné například ve srovnání s nosníkem oceli. Dřevo je jeden z málo obnovitelných materiálů. V dnešní době je velký důraz na ekologii a ochranu životního prostředí a vlivem typických vlastností dřeva jsou dřevěné stavební konstrukce na vrcholu, resp. staví se pořád více ze dřeva, než tomu bylo v minulosti, zejména díky průmyslové revoluci [1, 6].

Z výše uvedeného vyplývá, že má velkou škálu kladných vlastností od velice estetického vzhledu, vůně a textury, přes dobré mechanické a fyzikální vlastnosti po dobré chemické vlastnosti. Ovšem z jeho stavby vyplývají nedostatky, "záporné" vlastnosti, které se snažíme eliminovat nebo alespoň potlačit.

Záleží na úhlu pohledu, případně na úhlu zkoumání, ale dá se říci, že mezi hlavní nedostatky dřeva jako takového patří anizotropie, hygroskopicita a rozdílná struktura v závislosti na lokalitě růstu dřeviny.

Anizotropie dřeva značí rozdílné mechanické a fyzikální vlastnosti v závislosti směru působení. Jako příklad můžeme dát pevnost v tlaku. Průměrná pevnost ("mez pevností") v tlaku ve směru vláken u dřev s vlhkostí 12% je cca 50 MPa s variačním koeficientem 8-16%. [1] Naproti tomu konvenční mez pevnosti u tlaku napříč vláken v radiálním směru činí průměrně 7 MPa zjednodušeně. To samozřejmě může činit potíže například při výrobě důlních sloupů a dalších stavebních prvků vyžadující vysokou pevnost v tlaku.

Dalším negativem je hygroskopicita; dřevo dokáže přijímat a odevzdávat vodu v plynném stavu podle svého okolí a udržovat svoji vlhkost v závislosti na okolí. Samozřejmě, pokud přijme vodu v plynném skupenství, změní se tím rozměry. To samé platí s tím, když vodu odevzdá. V obou případech dřevo pracuje, "bobtná" v případě přijímání vody a "sesychá" v případě odevzdávání vody. Oba tyto jevy jsou negativní, protože se mění rozměry daného přířezu, dílce nebo surového kusu a mění se tím mnoho dalších vlastností například obecná hustota dřeva, tak logicky i vlhkost dřeva. Tím, že mění rychle svoje rozměry nerovnoměrně, vznikají ve dřevě vnitřní napětí, skládající se z vlhkostního a zbytkového napětí, které mohou vyústit až v tvorbu výsušných trhlin [1].

Posledním hlavním negativem je rozdíl ve struktuře vlivem lokality růstu dřeviny. Všechny okolní vlivy při růstu dřeviny mohou a také mají vliv na vzhled, strukturu a vlastnosti dřeva ať pozitivní, například zajímavou texturou vlivem činnosti parazitických rostlin ("drapé" textura) nebo negativní, které mohou být způsobeny porušením struktury stromu, infekcí stromu případně biotickými činiteli jako jsou houby a hmyz. Tato negativa mohou být posuzována subjektivně, proto je uvedeno v pozitivěch zajímavou texturu, protože tento negativní efekt pro truhlářinu může být pozitivní pro výrobce dých.

## 4 Fyzikální a mechanické vlastnosti

Předností dřeva je jeho lehkost, snadná opracovatelnost a spojovatelnost a velká pevnost. Vlivem anizotropie hodnoty pevností ve směru vláken a kolmo na vlákna se výrazně liší. Modul pružnosti jednoho stejného kusu dřeva roste s objemovou hmotností a klesá s vlhkostí dřeva a moduly pružnosti ve všech typech namáhání, v tlaku, v tahu a v ohybu, jsou takřka stejné (hodnotově, nikoliv průběhem) a proto se udávají jedinou hodnotou. Hodnoty modulu pružnosti kolmo k vláknům jsou asi desetkrát až dvacetkrát nižší než hodnoty modulu pružnosti rovnoběžně s vlákny [1].

Mezi další přednosti dřeva patří to, že při relativně nízké hmotnosti má dobrou pevnost například ve srovnání s ocelovým nosníkem. Při zpracování dřeva (krácení, rozmítání a další) hrají velkou roli právě mechanické vlastnosti. Proto porozumění chování dřeva a jeho mechanických vlastností je základní kámen při jeho zpracování. Největší dopad na mechanické vlastnosti dřeva je právě zmíněná anizotropie, tj. vlastnosti dřeva se liší v závislosti na směru působení/sledování dané fyzikální nebo mechanické vlastnosti. V dřevu se při jakémkoliv mechanickém namáhání vyskytují anomálie, na které dřevo reaguje tím, že vlivem těchto namáhání se přetvoří, "zdeformuje" a záleží na typu deformace, jestli bude plastická nebo už trvalá a záleží samozřejmě na chování dřeva v tomto namáhání [1, 2, 6].

Tabulka 1 - Přehled mechanických a fyzikálních vlastností dřeva [5]

Vlastnost	Jednotka	Číselná hodnota
Hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1500
Objemová hmotnost v suchém stavu	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	400 až 700
Nasákavost hmotnostní	%	140 až 170
Nasákavost objemová	%	55 až 70
Pevnost v tlaku	MPa	47 až 55
Pevnost v tahu	MPa	80 až 135
Modul pružnosti	MPa	11 000 až 16 000
Součinitel tepelné vodivosti	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0,9 až 0,2
Měrná tepelná kapacita	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	2,1 až 2,7
Součinitel délkové tepelné roztažnosti	$\text{K}^{-1}$	3,0 až $5,0\cdot 10^{-6}$

## **4.1 Pevnost v tlaku**

### **4.1.1 Ve směru vláken**

Hodnota pevnosti ve směru vláken je klíčová, co se týče praktického využití, zejména ve stavebnictví z důvodu jejího dopadu na dřevěné prvky. Dřevo při tlaku ve směru vláken zmenšuje svou délku v podélném směru. V praxi to vypadá tak, že vertikální nosník se zkrátí, což je nepříjemné, případně kromě zkrácení délky může dojít k dalším deformacím, které závisí na jakosti vybraného dřeva do lepeného nosníku a i na samotné stavbě dřeva. Nejvíce ovlivňují pevnost ve směru vláken hustota použitého dřeva a jeho vlhkost [1].

## **4.2 Pevnost v ohybu**

Z praktického hlediska pevnost ohybu dřeva se sleduje napříč vláken, nejčastěji v tangenciálním směru, z toho vycházející "tangenciální ohyb", protože velké rozdíly mezi hodnotami pevnosti dřeva v ohybu v radiálním a tangenciálním směru, byly naměřeny pouze u jehličnatých dřevin s tím, že mez pevnosti v tangenciálním směru je o 10 až 12% větší než mez pevnosti v radiálním směru. Co se týče rozdílů mezi pevností v ohybu u listnatých dřevin v různých směrech, tam jsou rozdíly minimální (2 - 4%) [1].

## **4.3 Mechanická pevnost**

Mechanická pevnost materiálu je schopnost daného materiálu, v tomto případě dřeva, odolat působení napětí v daném směru bez přítomnosti trvalé deformace nebo závažnější poruchy daného prvku. Napětí může být v tahu, tlaku a ve smyku a tato napětí se mohou lišit v závislosti na daném směru, ve kterém působí na dřevo [1].

## **4.4 Hustota**

Hustota je fyzikální veličina, která udává, jakou hmotnost má určitý objem zkoumaného tělesa. Hustota je vlastností látky, která tvoří těleso.

## 5 Velkoplošné materiály na bázi dřeva

Jak bylo uvedeno výše, dřevo má své klady i zápory. Cílem velkoplošných materiálů je, mimo jiné, eliminovat nežádoucí vlastnosti dřeva a přitom podpořit, případně minimálně zachovat žádoucí vlastnosti dřeva. Typickými příklady jsou velkoplošnost a heterogenita. V současné době masivní rostlé dřevo velkoplošné není, proto bývá nahrazováno velkoplošnými materiály na bázi dřeva, a když vezmete výřez ze stejných částí dvou různých stromů, jen v malém procentu tyto výřezy budou totožné.

Velká nevýhoda výrobků, částí nebo prvků ze dřeva, které byly získány mechanickým obráběním, případně vymanipulovány jiným způsobem, přejímají negativní vlastnosti dřeva jako je anizotropie, heterogenita, lokální chyby (suky, trhliny), schopnost bobtnat a sesychat vlivem okolní vlhkosti a teplotě vzduchu, a s tím souvisejícím praskáním, kroucením a změnou rozměrů, malá odolnost proti biotickým škůdcům, jako jsou houby, plísně a dřevokazný hmyz a v neposlední řadě relativně velkou hořlavost. Tyto nedostatky můžeme samozřejmě odstranit, případně je potlačit modifikací dřeva chemicko-mechanicky, případně jenom chemicky, zpracovat na listové, deskové materiály a následně tyto prvky složit dohromady v materiály jako je například papír, lepenka, dýhy, dřevotřískové a dřevovláknité desky anebo prvky ze dřeva slepit jako lepené bloky [6].

Jakožto řezivo může být použitý pouze strom, který má určitý průměr a i z tohoto stromu lze použít pouze některé části, například oddenková nebo mohutnější větve a i když máme "ideální strom" jako souměrný válec, ten může mít vlivem heterogenity výčet nepravidelností a vad, díky kterým nemůžeme použít dřevo v lepených masivních prvcích. Ovšem toto omezení lze obejít tím, že dřevní hmota se rozdělí na menší části, které tyto nepravidelnosti a vady nemají nebo je mají, ale v míře, která je akceptovatelná a tyto menší části se spojí a navíc lze využít i dřevo, které by za normálních okolností použít nešlo, jako jsou tenké větve. Takto vyrobené materiály mají mnohdy lepší vlastnosti než rostlé dřevo s tím, že je možné do těchto materiálů na bázi dřeva využít i dřevní hmotu, která by mohla být pouze jako "palivo", mají vynikající poměr objemové hmotnosti a pevnosti (kolem  $500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), jsou snadno opracovatelné a mají vysokou odolnost proti biotickým škůdcům [5, 6].



*"Pod pojem aglomerované materiály rozumíme výrobky z dřevních anebo jiných lignocelulosových částic, získaných dezagregací rostlinného materiálu, a jejich rekonstitucí na plošné nebo tvarové výrobky"* [2] lepením a lisováním anebo vytvrnutím pojiva z minerálních materiálů cementu, sádry, magnezia a vody s příměsí dřevěných částic a přísad. Příklad aglomerovaného materiálu může být DTD - dřevotřísková deska.

Naproti tomu kompozitní materiál je *"materiál ze dvou, nebo více substancí s rozdílnými vlastnostmi, které dohromady dávají výslednému výrobku nové vlastnosti, které nemá sama o sobě žádná z jeho součástí"* [2]. Typickým příkladem ve stavebnictví je železobeton, v dřevařském průmyslu překližka, případně lamelované dřevo a uhlíkovými lamelami.

Základ sestavy velkoplošných prvků a materiálů na bázi rostlého masivního dřeva je tvar a rozměr daného vymanipulovaného elementu masivního dřeva, způsob jejich skládání mezi sebou a způsob jejich spojení [6].

Přednosti velkoplošných prvků a bloků na bázi masivního dřeva [6]:

- nízký rozptyl vlastností materiálu
- cílené zvýšení pevnosti materiálu
- redukování vlhkostních změn délky a tloušťky
- rozměrová stálost
- velkoplošnost
- izotropnost a homogenní struktura bez chyb
- široký sortiment (velký výběr tlouštěk, hustot, pevností, hmotností na jednotku plochy, speciální úpravy, atd.)
- nízká hodnota tepelné vodivosti
- dobré akustické vlastnosti
- možnost spojování (lepením, napojováním, případně různými mechanickými prostředky jako hřebíky, spony, vruty)
- možnost různé povrchové úpravy
- všeobecně dobrý estetický vzhled
- využití druhotných surovin

## 6 Kompozitní materiály na bázi dřeva

Taxonomii lze provést podle několika hledisek, nás bude zejména zajímat, v jakém stavu a stupni je dřevo nebo jeho odvozený materiál.

Tabulka 2 - Kompozitní materiály na bázi dřeva - přehled

Ve formě lamel nebo sendvičů nebo identifikovatelných vrstev	Ve formě třísek	V jiné nebo speciální formě
CFRP lamely [3,4]	Cementotřískové desky	Cementovláknité desky
GFRP pruty [10]	Werzalit	Durisol
GFPR lamely [3]	Heraklit	Sádrovláknité desky
GFW [8]	Sádrotřískové desky	Sádrokartonové desky
HFRP [9]	WAFERBOARD	Pykret
BFRP [11]	RECOFLEX	TETRA K
	a další	EUROPLY
		GRENAMAT
		STRAMIT
		a další

### 6.1 Vrstvovité kompozity s využitím dřevních materiálů

Jedním z druhů kompozitních materiálů na bázi dřeva jsou "vrstevové kompozitní materiály", tj. materiály na bázi dřeva, které jsou tvořeny z vrstev, kde každou jednotlivou vrstvu umíme identifikovat a vrstvy jsou tvořeny například z dýh, lamel. Stejně jako u kompozitních materiálů v současné době můžeme některou vrstvu tvořenou ze dřeva zaměnit za vrstvu z jiného materiálu pro posílení cílených vlastností jako je například zvýšení maximální zatěžovací síly při porušení nosníků, únosnost a tuhost v ohybu nebo tuhost.

Vrstvené materiály se skládají z jednotlivých vrstev dýh, které jsou slepeny do desek nebo tvarovaných dílců. Patří sem překližky, vrstvené dřevo, tvarované díly z vrstveného dřeva a zahuštěné dřevo se syntetickou pryskyřicí [7].

Pro použití ve stavebnictví na dřevěné konstrukce se mohou použít pouze materiály, které díky své výrobě a použité technologii, si uchovají svoji celistvost a pevnost po předpokládanou životnost konstrukce [6].

#### 6.1.1 Překližkované desky

Překližkované desky jsou především překližky, laťovky a sendvičové desky. Překližkované desky jsou slepeny z lichého počtu (nejméně tři) vrstev [3].

## **Překližka**

Ve stavebním truhlářství je nejpoužívanějším typem překližkované desky překližka, jejíž jednotlivé vrstvy jsou složeny z loupaných nebo krájených dýh tak, že dýhy sousedních vrstev svírají obvykle úhel  $90^\circ$  [6]. Důsledkem jejich "křížového" lepení jednotlivé vrstvy nemohou pracovat (odstraňuje se negativní efekt rozměrové nestálosti vlivem vlhkosti); jsou vzájemně vázané, odstraňují anizotropní charakter dřeva. Použité dýhy musejí mít stejnou tloušťku, musí být ze stejného druhu dřeva a musí mít stejný směr vláken. Proto se téměř vždy skládají z lichého počtu vrstev dýh, tedy minimálně 3, 5, 7, 9, 11 a více. Označují se pak jako třívrstvé, pětivrstvé v závislosti na počtu použitých dýh atd. Pro všeobecné použití (truhlářské) se vzhledem k malé míře pracování používají pro velkoplošné, ale ne pro samostatné dílce při výrobě nábytku a vnitřních zařízení, jako jsou zadní stěny, výplně stěn a dna zásuvek [7]. Díky lepení dýh v překližkách je zaručeno optimální rozložení hodnot pevnosti ve všech směrech a zároveň se eliminuje sesychání, bobtnání jednotlivých vrstev položených kolmo na směr vláken v celé tloušťce překližky. Překližky mohou být vyrobeny z jedné dřeviny anebo z kombinací dvou nebo více dřevin i na vzdory doporučení, ale sousední dýhy v překližce musí být vyrobené ze stejné dřeviny a musí mít stejnou tloušťku [3]. Typická tloušťka překližek je 3 - 7 mm tvořené dýhami s tloušťkou od 0,2 - 1,5 mm [5].

Pro překližky platí několik technických norem. Základní charakteristiku definuje norma ČSN EN 313-1 Třídění a terminologie. Část 1: Třídění aj. [5], ale tato norma nepředepisuje minimální požadavky pro jejich výrobu ani minimální požadavky na jejich mechanické vlastnosti s ohledem na různorodost možné skladby překližek vlivem velké palety množných druhů překližek v závislosti na druhu použité dřeviny, tloušťku dýh, počet vrstev a jejich orientaci, případně na druhu použitého lepidla. Orientační hodnoty parametrů překližek je možné stanovit výpočtem [3].

## **Laťovka**

Laťovky jsou desky, u nichž se mezi vrstvy dýh vkládá jádro, tvořené slepenými nebo neslepenými laťkami z masivního dřeva (spárovka), širokými 7 až 30 mm [5]. Laťovkové středy se vyrábějí z jehličnatého dřeva nařezáním radiálních laťek a jejich spojením špagátováním nebo lepením [6].

Laťovky můžeme rozdělit podle vrstev [6]:

- laťovky trojvrstvé (dýha / střed / dýha)
- laťovky pětivrstvé (2x dýha / 1x střed / 2x dýha)
- laťovky vícevrstvé zdvojené (2x dýha / 2x střed / 2x dýha)

### **Biodesky**

Jsou to desky podobné laťovkám, kde na místo tenkých vrchních vrstev dýh jsou na laťovkový střed nalisované tenké lamely tloušťky 5-8 mm, šířky 80-100 mm [6]. Takto spleené desky mají plochy vypadající stejně jako masivní dřeva, ale je možné tyto plochy uživatelsky profilovat, zaoblit rohy, vyfrézovat reliéf apod. [7].

### **6.1.2 Vrstvené lisované dřevo (LVL)**

Zkratka LVL je z anglického spojení Laminated Veneer Lumber, kde volný překlad je právě vrstvené lisované dřevo. Vrstvené lisované dřevo je materiál, který je velice podobný překližce, ale dýhy jsou lepeny všechny v jednom směru, nejčastěji ve směru vláken, nikoliv kolmo jako u překližky [3]. Dýhy jsou vrstvené a impregnované fenolickou pryskyřicí a lisované jako nezhuštěné nebo se deska lisováním zhušťuje [6]. Tloušťka dýh se pohybuje od 2,5 do 4,8 mm. Vytvrzení probíhá za vysokého tlaku a teploty kolem 145 °C. Po vytvrzení jsou tyto desky rozřezány na trámy a prkna. Vrstvené dřevo má velmi dobré parametry pevnosti a tuhosti a má vysokou objemovou stálost. Vrstvené dřevo je možno použít na nejnáročnější inženýrské konstrukce (např. na haly s velkým rozpětím) [3]. V Evropě je vrstvené dřevo k dostání pod označením KETRO. Na výrobu KETRO desek se používá smrkových dýh s tloušťkou 3,2 mm před zalisováním; po zalisování mají tloušťku 3 mm ve výsledném souboru. Skladba dýh je podélná za sebou s tím, že se překrývají ve vrstvách a následně se zalisují. Rozměry zalisovaných prvků jsou: délka 26 m, šířka 1,8 m a tloušťka od 21 do 75 mm a dále tyto prvky jsou rozřezány na lépe manipulovatelné prvky dle žádaných specifikací. Pokud jsou dýhy lepeny stejně a ve směru vláken a směru délky prvku, nese tento materiál označení KETRO-S. Mimo jiné existuje ještě model LVL KETRO-Q, u kterého je každá pátá dýha lepena kolmo na směr prvku, jako je tomu u překližky. [3, 5]. Mechanické vlastnosti, specificky, mez pevnosti v ohybu je přibližně 50-51 MPa a modul pružnosti přibližně 14 000 MPa [2, 3, 5].

### **6.1.3 Vrstvené dřevo z dýhových pásů a z dlouhých třísek**

Kromě vrstveného dřeva pod označením KETRO existují ještě dva typy vrstveného dřeva, který každý má svá specifika, Parallam a Intrallam.

Materiál na Parallam jsou opět dýhy, které se nařezou na pásy šířky 20 - 30 mm a délky až 2400 mm. Po aplikaci lepidla jsou zalisovány v kontinuálním lisu a vytvrzeny mikrovlnným ohřevem a výsledný materiál má mnohem vyšší pevnost v tlaku a tahu než masivní rostlé dřevo, ale nemá jeho negativní vlastnosti, zejména heterogenitu a hygroskopičnost, a má lepší požární odolnost, proto je vhodný do otevřených prostor. Rozměry Parallam prvků mají rozměry: tloušťka až 500 mm, šířka 300 mm a délka až 20 m vzhledem k jeho manipulaci a běžnými přepravními schopnostmi. Meze pevností Parallamu jsou podobné jako meze pevnosti u LVL. [3, 5, 6].

Technologie výroby Intrallamu je podobná s tím rozdílem, že vstupním materiálem nejsou dýhy, ale dlouhé třísky se šířkou až 30 mm a délkou až 300 mm. Mechanické vlastnosti jsou srovnatelné, ne-li stejné jako u BSH. [3, 6]

### **6.1.4 Lepené lamelové dřevo (BSH)**

Dle normy ČSN EN 386 lepené lamelové dřevo je definice následující: je to konstrukční materiál vytvořený slepením dřevěných lamel s převážně rovnoběžnými vlákny (s lepenými plochami kolmými k delší a ke kratší straně průřezu). Vzhledem k nenáročnosti lepení dřeva tyto lepené prvky se vyskytují hojně nejen kvůli lepení, ale i díky tomu, že se může použít i méně kvalitní (menší jakost) dřevo do méně namáhaných oblastí, může se použít i dřevo malých rozměrů, díky kterému se vyloučí přítomnost lokálních vad a anomálií jeho skládáním do funkčního celku, čím se zvyšují mechanické vlastnosti, zejména meze pevností a při nízké hmotnosti má velice vysokou pevnost. Výsledný lepený materiál má velmi dobrou požární odolnost s nízkou rychlostí ohořívání 0,5 - 0,7 za minutu s tím, že i za těchto podmínek nosník neztratí únosnost, proto se používá v oblastech, kde je vysoký výskyt lidí. V České republice se BSH prvky vyrábí od roku 1952; v současné době prvky mají rozměry: šířka 0,24 m, tloušťka 2 m a délka až 32 m [14]. Prvky z masivního rostlého dřeva jsou nahrazovány právě BSH prvky, zejména kvůli náročnosti na výrobu, protože BSH prvky jsou slepeny po délce do požadovaných délkových rozměrů. Nevýhoda BSH prvků tkví ve stanovení

jejich tuhosti a pevnosti, proto každý BSH nosník před uvedením na trh je testován na sérii namáhání, což může být problematické [3, 5, 6].

Tabulka 3 - hodnoty pevností a tuhostí lepeného lamelovaného dřeva [5]

Způsob namáhání	Třída pevnosti	
	SA	SB
Ohyb [MPa]	24	20
Tah rovnoběžně s vlákny [MPa]	17	15
Tah kolmo na vlákna [MPa]	0,45	0,35
Tlak rovnoběžně s vlákny [MPa]	24	21
Tlak kolmo na vlákna [MPa]	5,5	5
Smyk [MPa]	2,7	2,7
Průměrný modul pružnosti kolmo na vlákna [GPa]	11	10
Průměrný modul pružnosti rovnoběžně s vlákny [GPa]	0,360	0,330
Hustota [kg/m <sup>2</sup> ]	400	370

#### **Ohybové zkoušky nosníků z lepeného dřeva**

V laboratoři Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze byly provedeny ohybové zkoušky dvaceti komerčně vyrobených nosníků z lepeného lamelovaného dřeva se šířkou 100 mm a výškou 320 mm složená z osmi lamel po 40 mm a s celkovou délkou nosníku 4500 mm. Lamely byly napojeny zubovitým spojem, přičemž spoje byly rozděleny v nosníku náhodně a jedinečně a náhodně byly rozmístěny i samotné lamely [3].

Tabulka 4 - Měřené průhyby nosníků při srovnávacím a maximálním zatížení, včetně hodnot sil při destrukcích nosníků [3]

Nosník	$w_{srov}$ [mm]	$w_{max}$ [mm]	$F_{max}$ [kN]
1	19,15	42,4	51,54
2	19,09	22,3	27,03
3	17,13	20,08	27,22
4	17,11	25,72	35,08
5	18,85	29,12	35,34
6	18,64	35,34	43,24
7	18,77	39,65	47,21
8	19,09	32,57	39,17
9	20,15	27,26	31,31
10	18,88	40,88	47,25
11	19,34	29,65	35,32
12	16,87	29,13	39,19
13	19,12	36,53	43,28
14	18,24	37,68	47,25
15	21,71	32,98	35,24
16	18,8	28,67	35,21
17	19,65	37,22	43,2
18	18,41	25,1	30,93
19	17,56	23,81	31,17
20	21,03	48,3	51,36

Pro srovnání všech dvaceti nosníků bylo zvoleno zatížení, které je překonatelné všemi zvolenými nosníky 24 kN. V tabulce 4 je zaznamenáno prohnutí středu nosníku v momentě srovnávacího zatížení  $w_{srov}$  dále prohnutí středu nosníku v okamžiku, kdy praskl v důsledku maximálního zatížení  $w_{max}$  a nakonec výsledná síla  $F_{max}$ , která vedla k destrukci nosníku.

Statisticky vychází zkouška následovně:

Tabulka 5 - Zjednodušené statistické vyjádření výsledků měření průhybů nosníků [3]

Název	Hodnota [kN]
Minimální hodnota	27,03
Maximální hodnota	51,54
Průměrná hodnota	38,827
Směrodatná odchylka	7,434305684

## Měření modulů pružnosti dřeva ve směru vláken

Ve stejné laboratoři, jako byla provedena zkouška ohybu u lepených nosníků, bylo provedeno i měření lokálních modulů pružnosti ve směru vláken nedestruktivní metodou pomocí vpichu strojem Pilodyn 6J přibližně v polovině výšky každé lamely. V závislosti na této zkoušce odvodili rovnici popisující modul pružnosti ve směru vláken na základě hloubky penetrace trnu [3].

$$E = -564,1 * t_p + 19367$$

kde  $t_p$  odpovídá hloubce penetrace trnu do lamely v milimetrech a E je výsledná hodnota modulu pružnosti.

Statisticky zkouška vyšla následovně:

Tabulka 6 - Zjednodušené statistické vyjádření výsledků měření modulu pružnosti [3]

Název	Hodnota
Minimální hodnota	6,675 GPa
Maximální hodnota	16,55 GPa
Průměrná hodnota	12 GPa
Směrodatná odchylka	1,439

### 6.1.5 Křížem vrstvené dřevo (CLT)

Zkratka CLT je z anglického spojení Crossed Laminated Timber. Vstupní surovinou pro výrobu CLT jsou neopracovaná prkna a fošny z okrajových částí kmene. Tato prkna a fošny jsou levná při obstojných mechanických vlastností (tuhost a pevnost). Šířka vstupní suroviny je 80 - 240 mm, tloušťka 10 - 100 mm. Použitá dřevina je smrk, borovice nebo jedle s možným budoucím využitím tvrdých listnatých dřevin jako je buk nebo akát. Spojení fošen a prken mezi sebou i mezi jednotlivými vrstvami je provedeno zubovitým spojem s použitím fenolické nebo melaminové pryskyřice. Po slepení a slisování je prvek ofrézován. V současné době rozměry CLT prvků jsou: 16,5 m délka, šířka 3 m a tloušťka do 0,5 m. V případě větších délek lze CLT prvky napojit zubovitými spoji [3].

### 6.2 Vrstvovité kompozity s využitím nedřevních materiálů

Na základě technologického pokroku, pokroku ve vědě, můžeme ze dřeva vyrábět a přetvářet výrobky ze dřeva na materiály, které mají minimálně lepší



mechanicko-fyzikální vlastnosti. S tím souvisí potřeba tyto materiály nadále vylepšovat, zejména co se týče jejich využití například ve stavebnictví, v oblasti jejich vlastností. Z toho vychází, že můžeme jednotlivé vrstvy, které jsme schopni určit a identifikovat a které jsou ze dřeva, nahrazovat materiály syntetickými, případně přírodními, ale nemající základ ve dřevu. Tímto docílíme výrazného zvýšení například síly potřebné k průhybu nosného nosníku, zvýšení síly potřebné k porušení nosníku ve směru tloušťky.

Kompozity na bázi vláken se skládají z polymerů vyztužených uhlíkovými, skelnými nebo aramidovými vlákny, případně jinými materiály, které jsme schopny rozvláknit a udělat z nich plošný materiál na bázi vláken. Jsou čtyřikrát až šestkrát silnější než ocel a beton, ale mají jenom zlomek jejich hmotnosti. Dále jsou nekorozivní a nemagnetické a jsou používány v místech s vysokým nárokem na tuhost a odolnost proti silovému namáhání. V porovnání s konvenčními materiály jsou kompozity na bázi vláken levnější, robustnější, odolnější vůči silovému namáhání, jednodušší na sestavení (v porovnání s přípravou betonového nebo i dřevěného nosníku či pilíře). Z hlediska ekologického je žádoucí jejich nepotřeba další chemické úpravy at' samotného nosníku z těchto materiálu, tak ani jeho povrchu, případně není potřeba další rozsáhlá chemická údržba [2, 4, 17].

### **6.2.1 CFRP lamely**

CFRP (Carbon fiber reinforced plastic) je kompozitní materiál tvořen směsicí uhlíkových vláken orientovaných v jednom směru a vhodné pryskyřice, případně termosetického lepidla [4, 12, 13]. Výsledné vlastnosti CFRP lamel závisí na typu a množství použití uhlíkových vláken.

Tabulka 7 - Hodnoty jednotlivých uhlíkových vláken [4]

	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [MPa]	Relativní prodloužení [%]
Carbon: high strenght	4300 - 4900	230 - 240	1,9 - 2,1
Carbon: high modulus	2740 - 5490	294 - 329	0,7 - 1,9
Carbon: ultra high modulus	2600 - 4020	540 - 640	0,4 - 0,8

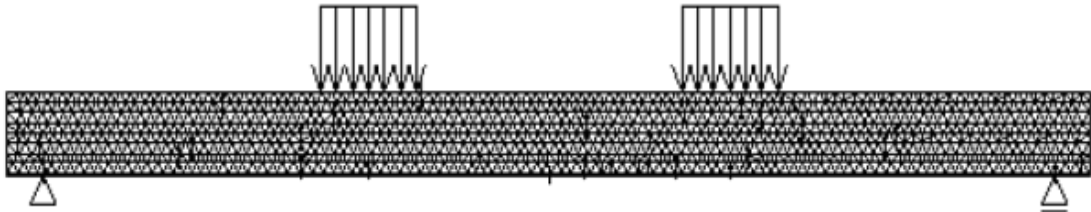
Vzhledem k tomu, že vlákna v CFRP lamelách jsou orientována jednosměrně v podélném směru, jsou v podélném směru zaznamenávány mechanické vlastnosti, které jsou velice příznivé, zejména vysoká tahová pevnost a tuhost. CFRP lamely mají vysoký modul pružnosti a mají schopnost přenášet dlouhodobě působící zatížení. Mezi další pozitivní vlastnosti CFRP lamel patří jejich jednoduchá manipulace vzhledem k "pultrusion" procesu výroby, nekorozivnost, nízká hmotnost, velmi vysoká pevnost, po správné instalaci téměř neviditelné, vynikající trvanlivost a odolnost vůči únavě, vysoká odolnost vůči ohni a jejich využití je standardizováno ve světě, existují mnohé certifikáty, které se zabývají od výroby CFRP lamel až po jejich instalaci [3, 4, 12].

Tabulka 8 - Vlastnosti CFRP lamel vyráběných pod názvem CarboDur [13]

Materiálové charakteristiky	Jednotky	CarboDur S	CarboDur BC Rods	CarboDur H
Modul pružnosti	MPa * 10 <sup>-3</sup>	>165	>140	>300
Výpočtová pevnost v tahu	MPa	2400	2800	1400
Napětí při porušení v tahu	MPa	3100	3100	1600
Poměrné prodloužení při porušení v tahu	%	>1,9	>1,7	>0,8

Stejně jako tomu bylo u měření průhybů u nosníku typu BSH, Katedra stavební, České vysoké učení technické, vykonala destruktivní ohybové zkoušky na BSH nosníky, které byly vyztuženy vysoko-pevnostní lamelou na bázi uhlíkových vláken. Pro tuto zkoušku na každý nosník BSH z rostlého dřeva byla nalepena lamela na uhlíkové bázi v tloušťce 2, 4 a 6 mm s tím, že výška nosníku z lepeného dřeva použitého v této zkoušce je stejná jako u nosníků, které nebyly vyztuženy, tj. 32 cm, tj. 8 lamel po 4 cm výšky s náhodným umístěním lamel a spojů ovšem s tím, že další vrstva je tvořena právě vysoko-pevnostní lamelou. Další rozměry nosníku odpovídají rozměrům nosníku z předchozí zkoušky, tj. délka 4,5 metrů a šířka 10 cm. Výsledná únosnost každého nosníku je reprezentovaná maximálním přeneseným ohybovým

momentem v momentu porušení nosníku. Byla prokázána nelineární závislost momentu při porušení na tloušťce výztužné lamely. Každý nosník s přídatnou vysoko-pevnostní lamelou byl měřen pětikrát. Pro schopnost porovnání nosníků mezi sebou bylo zvoleno srovnávací zatížení 24 kN a byl měřen průhyb uprostřed rozpětí. Dál byl měřen průhyb nosníku individuálně těsně před jeho poškozením.



Obrázek 1 - Schéma ohybové zkoušky, zdroj: <http://stavba.tzb-info.cz>



Obrázek 2 - Nosník vyztužen uhlíkovou lamelou na spodním povrchu, zdroj: <http://stavba.tzb-info.cz>

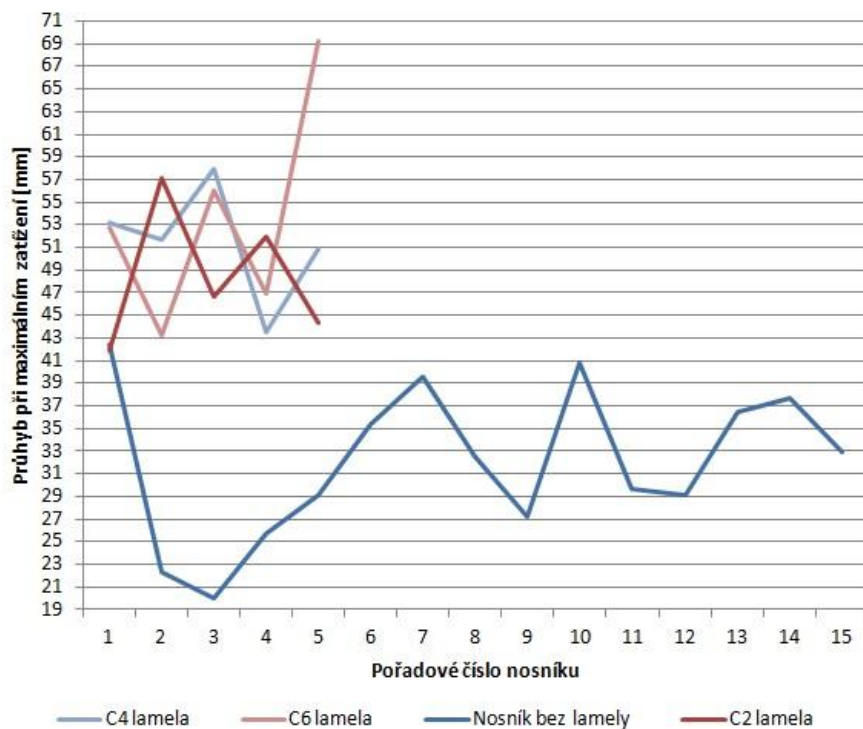
Tabulka 9 - Porovnání výsledných průhybů při srovnávacím a maximálním zatížení a výsledné síle u lamel na bázi uhlíkových vláken [3]

Typ lamely a tloušťka	Průhyb při srovnávacím zatížení [mm]	Průhyb při maximálním zatížení [mm]	Maximální síla [kN]
C2	15,98	41,89	59
C2	17,68	57,07	67
C2	15,43	46,65	68
C2	16,12	51,97	68
C2	16,74	44,4	59
C4	14,1	53,16	80
C4	13,95	51,7	80
C4	15,53	57,91	67
C4	14,29	43,54	71
C4	15,53	50,92	71
C6	14,43	52,77	75
C6	12,71	43,28	71
C6	11,95	56,01	92
C6	12,88	46,92	80
C6	13,02	69,25	92

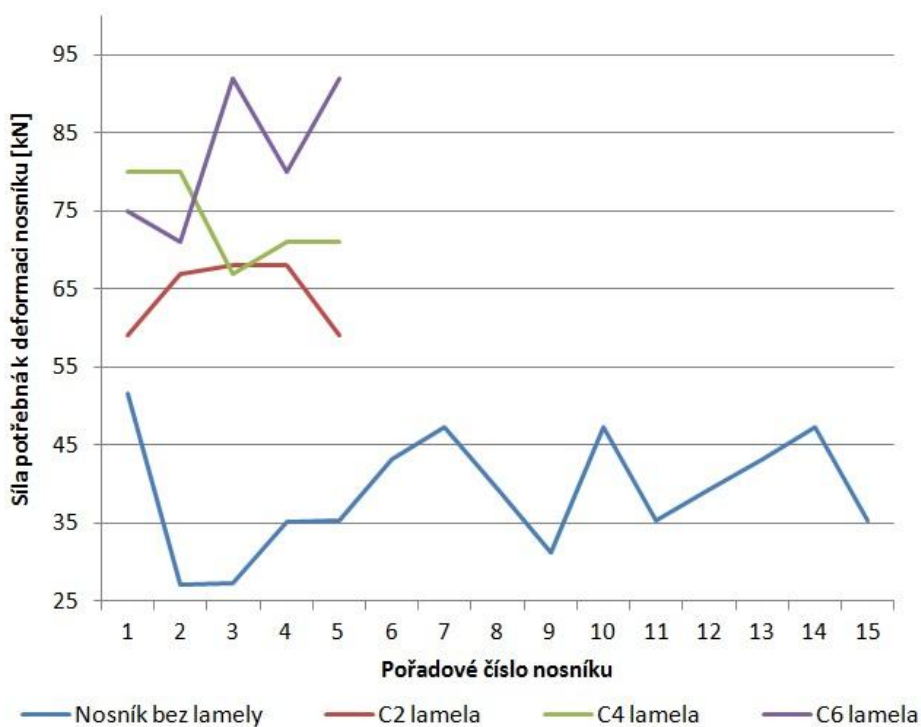
Tabulka 9 popisuje výsledné průhyby při maximálním zatížení při maximální síle a průhyb ve srovnávacím zatížení 24 kN. Z té vyplývá, že tloušťka vysoko-pevnostní lamely z uhlíku má dopad na výsledek maximální síly potřebné k deformaci nosníku. První sloupec označuje typ lamely - C jako Carbon - uhlík a číslo označuje tloušťku v milimetrech, tudíž například C2 je lamela z uhlíkových vláken v tloušťce 2 milimetrů.

#### **Srovnání s materiálem na bázi dřeva bez použití nedřevního materiálu**

Z tabulek 4, 5 a 9 vyplývá, že použití vysoko-pevnostních lamel na BSH nosníku jednoznačně zvyšuje jeho ohybové vlastnosti a je potřeba vyvinout sílu potřebnou k jeho deformaci mnohonásobně větší. Cenově vycházejí přibližně 600 Kč za běžný metr [13] s tím, že se prodávají ve 100 metrových rolích. Tento faktor by mohl být limitující zejména pro malé provozy, kde by si nemohli dovolit koupit celou roli těchto vláken.



Obrázek 3 - Srovnání průhybů při maximálním zatížení u různých typů nosníků [3]



Obrázek 4 - Srovnání sil při destrukci u různých typů nosníků [3]

Z výše uvedených grafů jasně vyplývá, že uhlíková lamela výrazně zvyšuje sílu potřebnou k deformaci nosníků, zvyšuje "efektivní" průhyb nosníku než dojde k jeho deformaci a čím silnější je vrstva uhlíkové lamely na nosníku, tím lepší jsou výsledky.

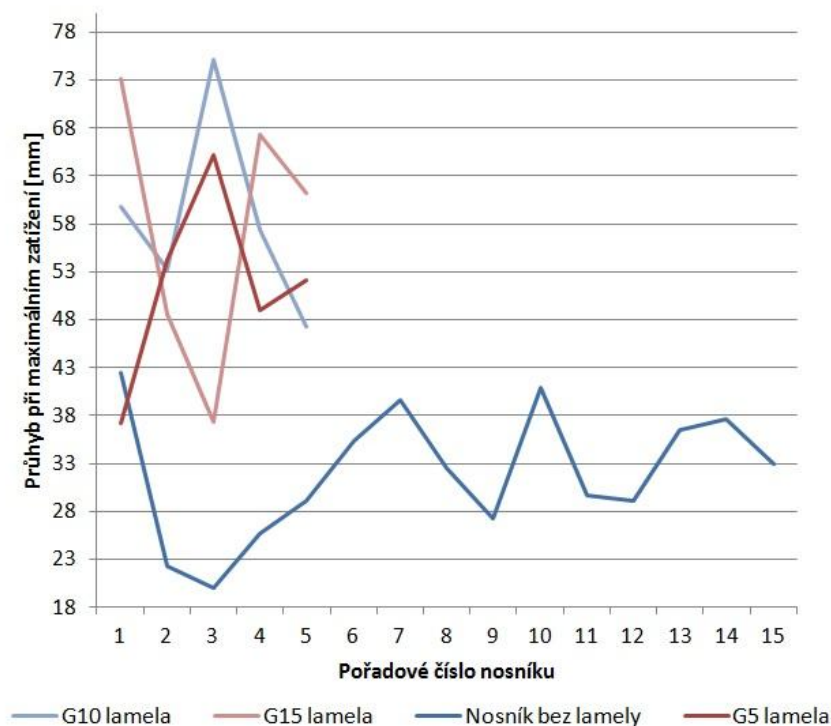
### 6.2.2 GFRP lamely

GFRP ("glass fiber reinforced polymer) lamela nebo výztuž je kompozitní materiál vyrobený z vysoko-pevnostních a nekorozivních skelných vláken impregnovaných odolným epoxidovým lepidlem nebo pryskyřicí a který je schopen nahradit, díky svými unikátními vlastnostem, obecně známé stavební materiály jako jsou galvanizované oceli a MDF desky. Prvky vyztužené GFRP mají obecně velice vysokou odolnost proti korozi, jsou takřka korozi odolné, mají vyšší pevnost v tahu než ocel a zároveň jsou lehčí, zanechávají menší uhlíkovou stopu, jejich údržba je nulová, jsou netoxické, lehce manipulovatelné a lépe se s nimi pracuje, co se týče přizpůsobování tvaru, délce a velikosti ohybu [15, 18, 19].

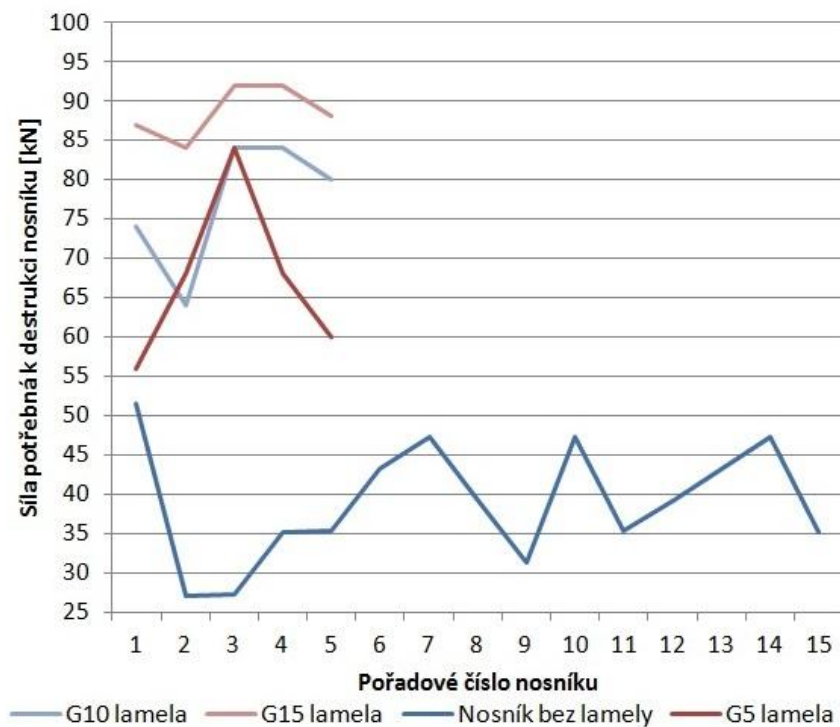
Katedra stavební České vysokého učení technického vykonala destruktivní ohybové zkoušky na BSH nosníky, které byly vyztuženy vysoko-pevnostní lamelou na bázi skelných vláken. Pro tuto zkoušku na každý nosník BSH z rostlého dřeva byla nalepena lamela na bázi skelných vláken v tloušťce 5, 10 a 15 mm s tím, že výška nosníku z lepeného dřeva použitého v této zkoušce je stejná jako u nosníků, které nebyly vyztuženy, tj. 32 cm, tj. 8 lamel po 4 cm výšky s náhodným umístěním lamel a spojů ovšem s tím, že spodní vrstva je tvořena lamelou na bázi skelných vláken. Rozměry nosníků jsou následující: délka 4,5 metrů a šířka 10 cm. Výsledná únosnost každého nosníku je reprezentovaná maximálním přeneseným ohybovým momentem v momentu porušení nosníku. Každý nosník s přídatnou vysoko-pevnostní lamelou byl měřen pětkrát. Pro schopnost porovnání nosníků mezi sebou bylo zvoleno srovnávací zatížení 24 kN a byl měřen průhyb uprostřed rozpětí. Dál byl měřen průhyb nosníku individuálně těsně před jeho poškozením.

Tabulka 10 - Porovnání výsledných průhybů při srovnávacím a maximálním zatížení a výsledné síle u lamel na bázi skelných vláken [3]

Typ lamely a tloušťka	Průhyb při srovnávacím zatížení [mm]	Průhyb při maximálním zatížení [mm]	Maximální síla [kN]
G5	15,41	37,15	56
G5	16,97	54,21	68
G5	15,18	65,19	84
G5	15,52	48,97	68
G5	15,62	52,09	60
G10	14,65	59,75	74
G10	13,8	53,24	64
G10	16,09	75,07	84
G10	14,29	57,41	84
G10	13,27	47,23	80
G15	13,05	73,13	87
G15	12,22	48,52	84
G15	13,05	37,4	92
G15	13,52	67,34	92
G15	13,32	61,27	88



Obrázek 5 - Srovnání průhybů při maximálním zatížení u různého typu nosníků [3]



Obrázek 6 - Srovnání sil při destrukci u různého typu nosníků [3]

Použité zkratky, G5, G10 a G15 označují typ lamely, respektive, G značí materiál lamely - "Glass" - sklo, tudíž tj. lamely na bázi skelných vláken a číslo za písmenem udává tloušťku lamely v milimetrech. G10 je tedy lamela na bázi skelných vláken s tloušťkou 10 milimetrů.

Z tabulky č. 10 a obrázků 5 a 6 vyplývá, že vyztužování lepených nosníků lamelami na bázi skelných vláken výrazně zvyšují sledované vlastnosti, zejména však u vysoko-pevnostní lamely s tloušťkou 15 mm můžeme sledovat skoro 100% nárůst v síle potřebné k destrukci nosníku, dále je vidět, že lamely zvyšují "efektivní" průhyb, tj. průhyb, při kterém ještě není nosník zničen.

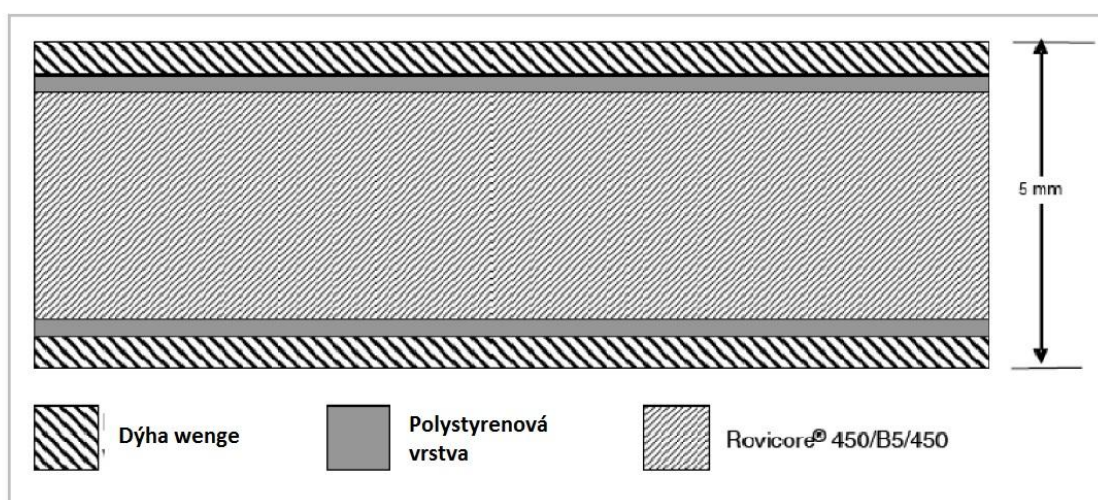
### 6.2.3 GFW

Vzhledem k možnému velkému environmentálnímu problému, který se týká klimatických změn vlivem skleníkového efektu s úbytkem lesů a zelených ploch obecně, vysokým výskytem požárů lesů, velkého výskytu oxidu uhličitého a jeho menší možností přeměny na kyslík díky menší celosvětové kapacitě fotosyntézy, je na místě množství dřeva nahrazovat materiály syntetickými, případně obsah dřeva v materiálech na bázi dřeva velice omezit nebo zužitkovávat odpad nebo sekundární, většinou



nežádoucí, produkty dřevozpracujícího průmyslu využívat k tvorbě právě materiálů na bázi dřeva například MDF desek a podobně [8].

Na oddělení Mechanického inženýrství fakulty Inženýrské univerzity v Portu v Portugalsku ve spolupráci Polytechnickým institutem Gaya a Institutem mechanického inženýrství a průmyslového managementu vyvinuli nový materiál s názvem GFW - glass fiber wood, který by měl být odpovědí na dvě velké environmentální otázky: plýtvání dřevem a velké nároky na energie k výrobě dřevěných laminátů. GFW má pouze minimální zastoupení dřeva a tím je povrchová vrstva z dýhy stromu wenge s tloušťkou 0,5 mm. Vyrábí se ve formě, kde se pod tlakem epoxidové lepidlo vstříkne a stmelí všechny vrstvy, když je forma plná lepidla. Až se vytvrdí lepidlo, resp. zesítuje, GFW je vyroben. Při exotermické reakci lepidla se zvyšuje teplota "GFW polotovaru" díky ní se polystyrén ztekutí a slepí dýhu společně s jádrem ze skelných vláken mechanickým ukotvením [8].



Obrázek 7 - Schéma GFW vrstev [8]

Dle obrázku 6 tvoří GFW 3 vrstvy, jádro tvoří Rovicore 450/B5/450 ze skelných vláken s hustotou skelných vláken 450 gramů na čtvereční metr s tím, že jsou vlákna složena náhodně a spojena pomocí styrenu [16]. Z obou stran jádra je polystyrenová vrstva s tloušťkou 0,25 mm a ty jsou olemeny dýhou stromu wenge s tloušťkou 0,5 mm [8].

GFW a MDF desky byly otestovány na tah (dle normy ISO 527) a ohyb (dle normy ISO 14125) s tím, že oba tyto materiály byly na několik týdnů uloženy do

komory, kde byla nastavena teplota 24 stupňů Celsia a vlhkost vzduchu byla 95%. Když materiály byly nasyceny vodou, byly vyjmuty z komory a vysušeny. Oba testy, na tah a na ohyb, byly provedeny u stejných vzorků před a po vlhkostní degradaci [8].

Tabulka 11 - Výsledky ohybového testu [8]

Materiál	Stav	Prodloužení při prvním prasknutí [ε]	Napětí při prvním prasknutí [MPa]	Konečné prodloužení [ε]	Konečné napětí [MPa]	Youngův modul [MPa]
MDF	Nedegradovaná vlhkostí			0,014	68	6086
	Degradovaná vlhkostí			0,018	36,66	2014
GFW	Nedegradovaná vlhkostí	0,015	65,67	0,037	88,84	5617
	Degradovaná vlhkostí	0,016	59,17	0,028	74,77	4841

Tabulka 12 - Výsledky tahového testu [8]

Materiál	Stav	Konečné prodloužení [ε]	Konečné napětí [MPa]	Youngův modul [MPa]
MDF	Nedegradovaná vlhkostí	0,009	34,16	4556
	Degradovaná vlhkostí	0,018	16,72	1437
GFW	Nedegradovaná vlhkostí	0,017	68,09	5905
	Degradovaná vlhkostí	0,026	43,17	2596

V tabulce 10 sloupec "Prodloužení při prvním prasknutí" a sloupec "Napětí při prvním prasknutí" jsou uvedeny proto, že při daném testu praskla povrchová vrstva dřeva, ovšem jádro ze skelných vláken bylo schopno toto napětí snést až do konečného napětí. U MDF desky toto měřeno nebylo, protože první prasknutí je její i poslední.

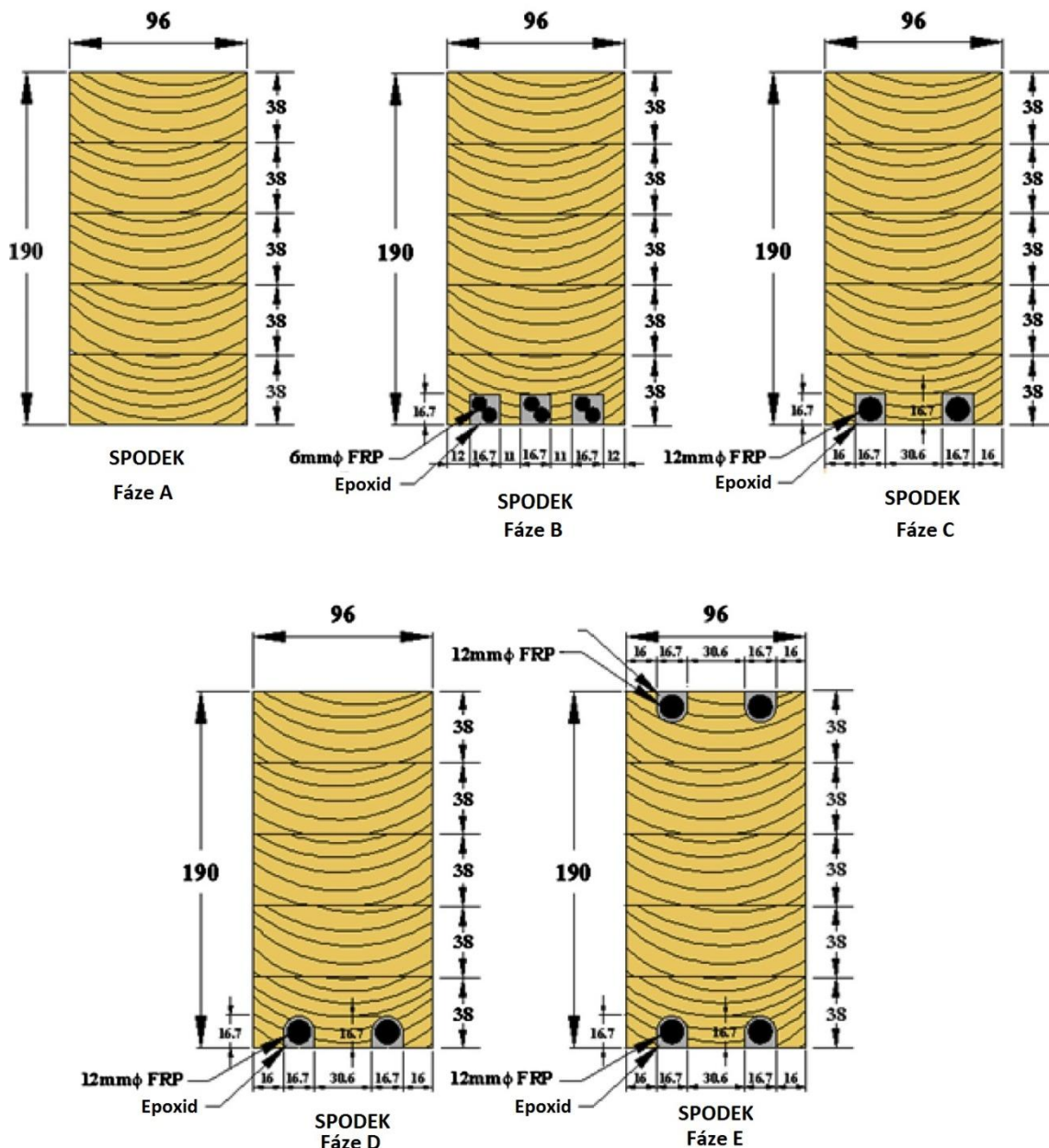
Podle tabulek 10 a 11 vyplývá, že GFW je adekvátní náhrada za MDF desky. Z hlediska výsledných naměřených hodnot GFW má schopnost snést ohybové napětí až přibližně o 25% větší u nedegradovaného materiálu a až o 60% větší než u degradovaného materiálu s tím, že degradací ztratil pouze kolem 20% své odolnosti. Co se týče tahového napětí, nedegradovaná GFW deska má skoro dvakrát větší odolnost než nedegradovaná MDF deska a GFW deska ztratí přibližně 37% své tahové odolnosti.

#### 6.2.4 GFRP pruty

Oddělení civilního a environmentálního inženýrství Fakulty inženýrské univerzity v Aucklandu na Novém Zélandu společně s Vysokou školou inženýrství a informatiky Národní univerzity Irsko v Galwayi v Irsku vykonalo výzkum, který měl vyšetřit, zda zesílení nízko-kvalitního lepeného dřeva třídy C16 podle EN 388 zapuštěnými pultrudovanými pruty na bázi skelného vlákna, má smysl. Nosníky z lepeného dřeva byly vyrobeny z nekvalitního smrku Sitka, který vyrostl v Irsku. Pruty na bázi skelného vlákna byly do nosníků zapuštěny pomocí epoxidové pryskyřice do předem připravených drážek různých tvarů na různých místech nosníků [10].

Fošny na nosníky měly výslednou vlhkost přibližně 18% po vysušení po zpracování na pile v Irsku a byly naformátovány na dimenze: 4200 mm v délce a s nominálními rozměry 96 mm \* 44 mm. Poté byly uloženy po dobu tří měsíců do větraného prostředí s 65% relativní vlhkostí a teplotou 20 stupňů Celsia. Po třech měsících výsledná vlhkost činila 12.4% s odchylkou 0.7%. Typ skelných prutů byl Aslan 100 [19]. Použité lepidlo na lepení fošen byl zvolen rezorcín formaldehyd (PRF). K lepení prutů k nosníkům bylo zvoleno dvousložkové epoxidové lepidlo [10].

Každý nosník byl tvořen pěti lamelami ve směru tloušťky po 38 mm, tudíž výsledná tloušťka nosníku byla 190 mm. Výsledná délka slepeného nosníku činila 3420 mm vzhledem k testovanému čtyřbodovému ohybu s poměrem tloušťky a délky 18:1. Z toho vychází, že mohli být vybrány pouze fošny, které jsou kvalitní, bez zjevných vad, případně mohli být dané vady vymanipulovány, či celý kus fošny, který byl mimo rozpětí, zlikvidován. Skelné pruty byly vloženy do drážek, které byly vyfrézovány na CNC stroji a následně zapuštěny do epoxidové pryskyřice a uloženy po dobu 30 dní do prostředí s teplotou 20 stupňů Celsia a relativní vlhkostí vzduchu 65% [10].



Obrázek 8 - Schéma nosníků vyztužených skelnými pruty a bez vyztužení [10]

Na obrázku 8 jsou vidět nosníky, které byly použity ve výzkumu. Fáze A zobrazuje nosník, který není zesílen ani vyztužen. Fáze B zobrazuje nosník, který je vyztužen šesti pruty ze skelných vláken o průměru 6 mm každý a umístěny po dvou do čtvercových drážek s rozměry 16.7 mm x 16.7 mm a zalité epoxidovou pryskyřicí. Fáze C zobrazuje nosník vyztužený dvěma pruty s průměrem 12 mm každý zalité epoxidovou pryskyřicí do drážky čtvercového tvaru. Fáze D zobrazuje nosník vyztužený dvěma pruty každý s průměrem 12 mm zalité epoxidovou pryskyřicí do drážky kruhovitěho tvaru. Fáze E zobrazuje nosník vyztužený dvěma pruty každý s průměrem 12 mm zalité

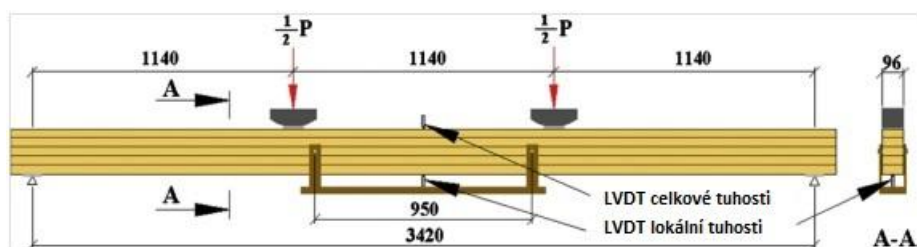
epoxidovou pryskyřici a umístěn ve spodní lamelle i ve vrchní lamelle se stejnými parametry. Všechny zmíněné i nezmíněné rozměry jsou v milimetrech [10].

Každý nosník byl zkoušen pětkrát, tudíž dohromady bylo zkoušeno 25 nosníků.

Tabulka 13- Souhrn použitých nosníků [10]

Fáze	Popis	Počet opakování	Pořadové číslo nosníku
A	Nevyztužen	5	1, 8, 15, 22, 29
B	Zesílení v jedné lamelle dvěma 6 mm pruty ve třech čtvercových drážkách	5	2, 9, 16, 23, 30
C	Zesílení v jedné lamelle 12 mm pruty ve dvou čtvercových drážkách	5	3, 10, 17, 24, 31
D	Zesílení v jedné lamelle 12 mm pruty v dvou kruhovitých drážkách	5	4, 11, 18, 25, 32
E	Zesílení ve dvou lamelách 12 mm pruty v dvou kruhovitých drážkách v každé lamelle	5	5, 12, 19, 26, 33

Testování nosníků čtyřbodovým ohybem bylo provedeno podle normy EN 408. Všechny nosníky byly otestovány v jejich nezesíleném stavu. Tudíž před umístěním prutů ze skelných vláken, aby byla k dispozici data pro srovnání [10].

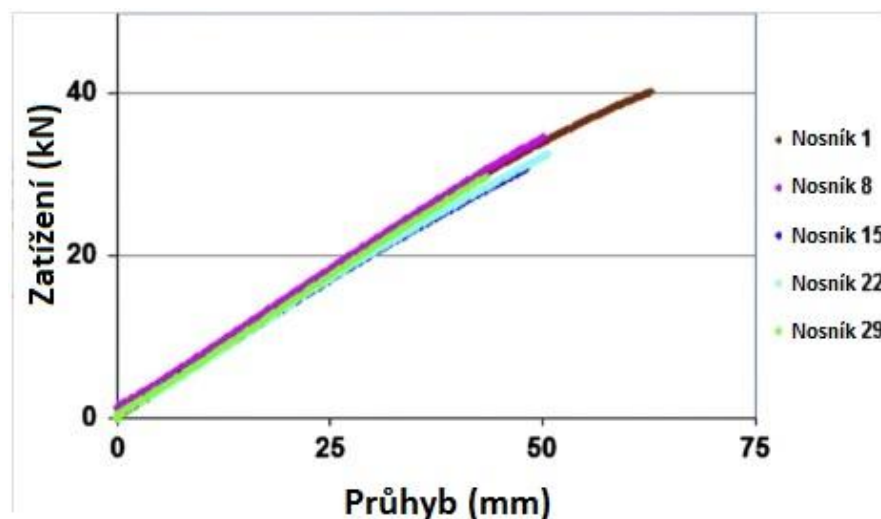


Obrázek 9 - Schéma zkoušky čtyřbodového ohybu dle EN 408 [10]

Obrázek 9 zobrazuje schéma zkoušky čtyřbodového ohybu dle EN 408. Všechny nosníky byly testovány na celkovou a lokální tuhost ve stavu, kdy nebyly vyztuženy, za použití 400 kN hydraulického pohonu. Celková tuhost byla měřena prostřednictvím LVDT - "linear variable differential transformer" - lineární rozdílový transformátor [20], který byl umístěn doprostřed nosníku horní lamely. Výsledky průhybu byly přijaty ke vztahu k podpěrám, a proto můžeme předpokládat stejné průhyby na celém rozpětí nosníku. Lokální tuhost byla striktně měřena v místě maximálního ohybového momentu, kde nebylo žádné smykové napětí. Druhý LVDT byl umístěn na rameni,

kteřé bylo umístěno od neutrální zóny nosníku ve vzdálenosti odpovídající pětinasobku tloušťky nosníku měřící lokální tuhost nosníku [10].

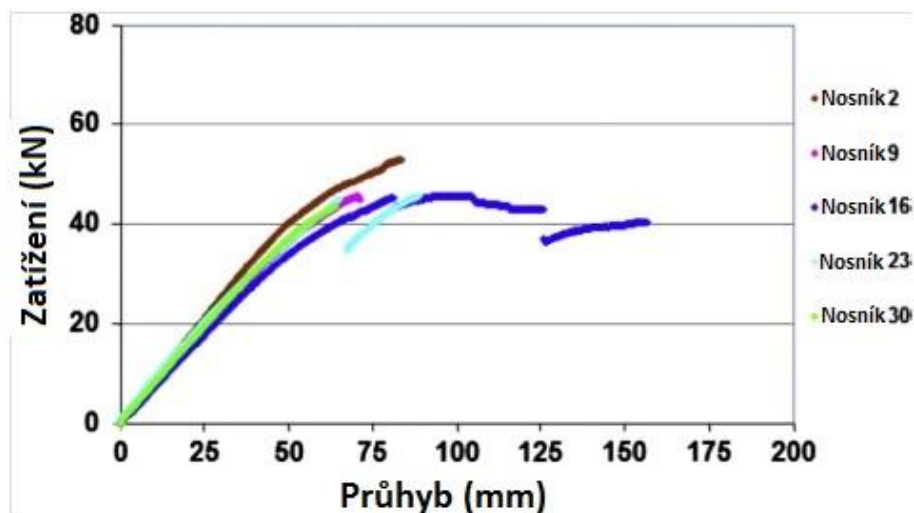
Výsledné průhyby při zátěži pro nosníky ve fázi A, které nebyly nijak vyztuženy, pro ně bylo typické, že vlivem použití nízko kvalitního řeziva na nosníky v dolní lamele, kde bylo největší tahové napětí, vznikla prasklina vlivem defektů a anomálií vlivem stavby dřeva, které nebyly zřejmé nebo nebyly vidět. V průběhu výroby je snaha udržet tyto defekty v největší vzdálenosti od nejmíc namáhané části nosníků. Pro dříví s defekty obecně platilo to, že průměrná odolnost v tahu byla menší než pevnost v tlaku vlivem defektů. Tudíž mez namáhání v tahu je dosaženo v nosnících před dosažením meze v tlaku [10].



Obrázek 10 - Výsledné průhyby u nosníků fáze A [10]

Obrázek 10 zobrazuje průběh průhybů u nevyztužených nosníků, kde osa X zobrazuje výsledný průhyb v milimetrech a osa Y zobrazuje výsledné napětí, při kterém nosník byl zdeformován v milimetrech.

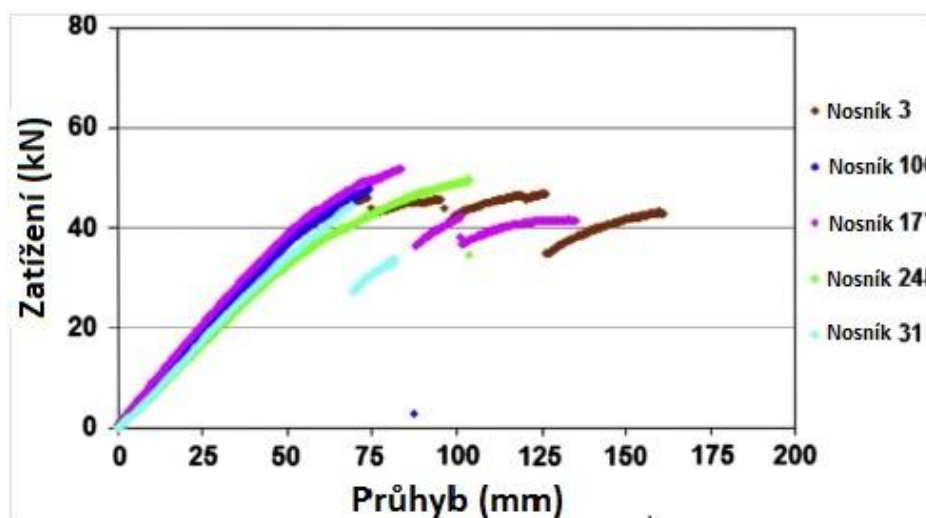
U nosníků fáze B byl výsledný průhyb vyšší než u nosníků fáze A z důvodu, že GFRP pruty byly umístěny v dolní nejmíc namáhané lamele a z důvodu, že lokální dřevní anomálie byly ve větší míře nahrazeny právě pruty s epoxidovou pryskyřicí. U nosníku č. 2 byly zjištěny zvýšené hodnoty maximálního napětí právě z výše uvedených důvodů. V místě lepeného spoje bylo až výrazné porušení dřevní struktury v místě anomálií [10].



Obrázek 11 - Výsledné průhyby u nosníků fáze B [10]

Obrázek 11 zobrazuje průběh průhybů u nosníků vyztužených pruty ve spodní lamelle dvěma 6 mm pruty ve třech čtvercových drážkách, kde osa X zobrazuje výsledný průhyb v milimetrech a osa Y zobrazuje výsledné napětí, při kterém nosník byl zdeformován v milimetrech.

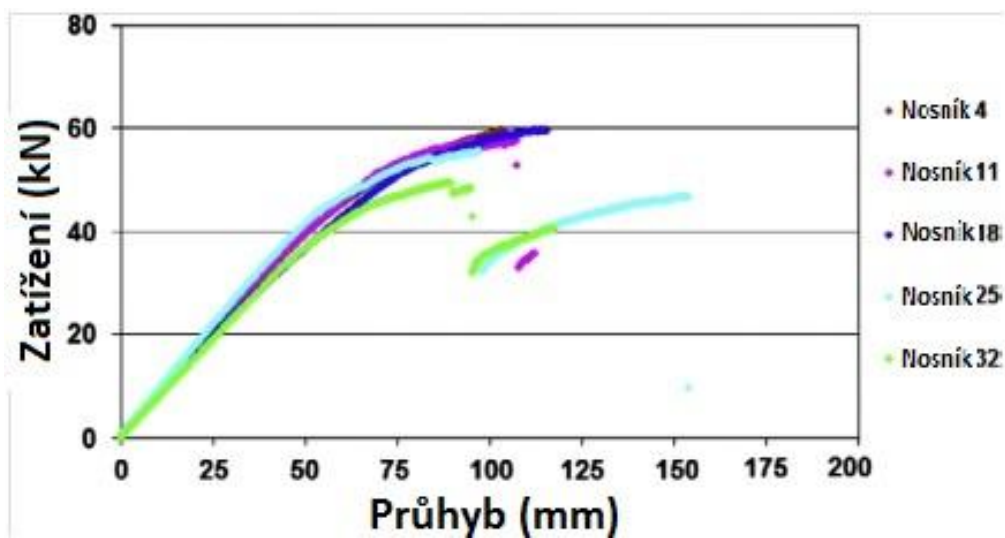
U nosníků fáze C byl velice podobný průběh jako u nosníků fáze B. Je přítomno typické vrásnění dřeva ve vnitřních lamelách. Opět všechny nosníky z této kategorie byly porušeny v místě lokální anomálie, nejčastěji zarostlého suku. Hodnoty nejsou vyšší než u fáze B, ovšem fáze C je mnohem lehčí na instalaci, protože jsou potřeba pouze dvě drážky a dva pruty. Lepený spoj nebyl porušen do doby masivní destrukce nosníku [10].



Obrázek 12 - Výsledné průhyby u nosníků fáze C [10]

Obrázek 12 zobrazuje průběh průhybů u nosníků vyztužených pruty ve spodní lamelle 12 mm pruty ve dvou čtvercových drážkách, kde osa X zobrazuje výsledný průhyb v milimetrech a osa Y zobrazuje výsledné napětí, při kterém nosník byl zdeformován v milimetrech.

U nosníků fáze D je vidět značné zlepšení výsledného napětí. Důvody mohou být tvar drážky, který je kruhovitý a také možnost výběru kvalitních fošen na lepený nosník. Díky tvaru drážky buď nedochází ke kumulaci napětí v drážce, nebo je výrazně menší, než je to u předchozích nosníků. Všechny tyto nosníky byly porušeny v dolní lamelle a zároveň byla zjištěna přítomnost zvrásnění horních lamel [10].

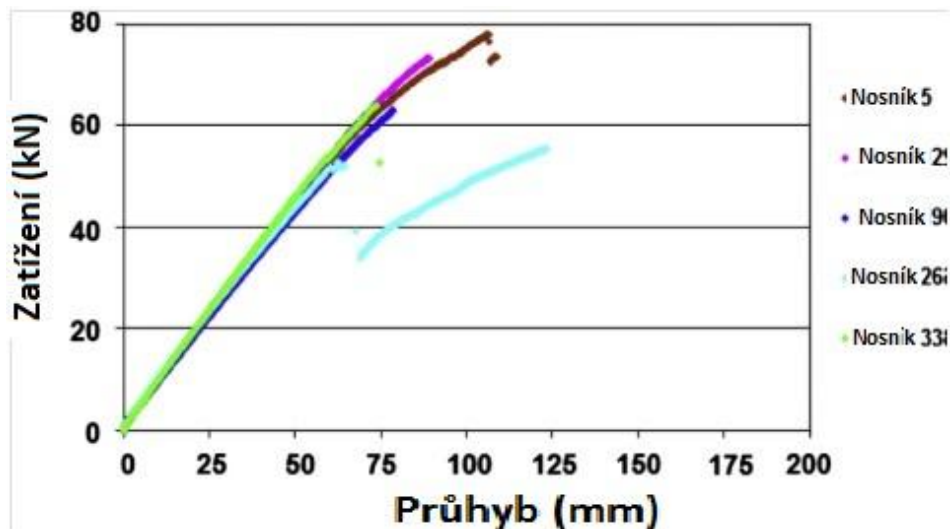


Obrázek 13 - Výsledné průhyby u nosníků fáze D [10]

Obrázek 13 zobrazuje průběh průhybů u nosníků vyztužených pruty ve spodní lamelle 12 mm pruty ve dvou kruhovitých drážkách, kde osa X zobrazuje výsledný průhyb v milimetrech a osa Y zobrazuje výsledné napětí, při kterém nosník byl zdeformován v milimetrech. Nosníky 25 a 32 vykazovaly schopnost snášet napětí ještě poté, kdy byla porušena spodní lamela vlivem napětí.

Nosníky fáze E vykazovaly nejvyšší hodnoty. Neutrální osa byla přibližně uprostřed nosníku v důsledku vyváženého zesílení GFRP pruty. V důsledku způsobu umístění GFRP prutů byl snížen výskyt oblastí s obsahem suků v horní lamelle a také byl snížen výskyt plastické deformace. Všechny nosníky byly porušeny v dolní lamelle v místě soku v místě napětí [10].





Obrázek 14 - Výsledné průhyby u nosníků fáze E [10]

Obrázek 14 zobrazuje průběh průhybů u nosníků vyztužených pruty ve spodní a horní lameli 12 mm pruty ve dvou kruhovitých drážkách, kde osa X zobrazuje výsledný průhyb v milimetrech a osa Y zobrazuje výsledné napětí, při kterém nosník byl zdeformován v milimetrech. Nosník 26i byl zdeformován při výrazně nižším napětí než ostatní z této skupiny vlivem výrazného suku v okrajové zóně namáhání [10].

Další část výzkumu byl výzkum tuhosti daných nosníků. Byly opět testovány nosníky, které byly součástí předešlé části výzkumu. Testovány byly dvě veličiny - lokální tuhost a celková tuhost.

U nosníků fáze A, což jsou nosníky nevyztužené, byla naměřena celková tuhost  $4.85 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$  a průměrná hodnota lokální tuhosti  $5.16 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$ . Důvody pro rozdílné hodnoty jsou, že v místě měření celkové tuhosti je přítomna smyková deformace, zatímco smyková deformace při měření lokální deformace přítomna není. Je zde pravděpodobnost odsazení v místech podpěr v důsledku nízké hustoty dřeva, ze kterého byl nosník vyroben [10].

Nosníky fáze B byly měřeny nadvakrát, poprvé po vytvrnutí lamel a podruhé po přidání GFRP prutů. U nevyztužených nosníků byly naměřeny hodnoty celkové střední tuhosti  $5.03 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$  a průměrná lokální tuhost  $5.91 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$ . V zesíleném stavu, po aplikaci zesílení, byly naměřeny hodnoty celkové střední tuhosti  $5.36 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$  a průměrná lokální tuhost  $6.41 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$ . Došlo ke zvýšení obou měřených hodnot přibližně o 6 a 8% v případě lokální tuhosti [10].

Nosníky fáze C byly měřeny v obou jejich stavech, nevyztužené a vyztužené. V nevyztuženém stavu dosáhly nosníky celkové střední tuhosti  $4.79 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$  a lokální střední tuhosti  $5.32 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$ . V stavu, kdy byly aplikovány zesilovací GFRP prvky byly naměřeny hodnoty celkové střední tuhosti  $5.29 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$  a lokální střední tuhosti  $5.58 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$ . Zvýšení obou hodnot o přibližně 10% vlivem vyššího procentuálního zastoupení zesilovacích prvků [10].

Hodnoty celkové střední tuhosti u nevyztužených nosníků fáze D byla naměřena  $5.22 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$ . Lokální střední tuhost u nevyztužených D nosníků byla naměřena  $6.05 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$ . V zesíleném stavu byly naměřeny hodnoty celkové střední tuhosti  $5.8 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$  a lokální střední tuhosti  $6.85 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$ . Zde je vidět rapidní nárůst o 11% a 14% ve prospěch lokální střední tuhosti [10].

U měření nosníků fáze E byly očekávány markantní rozdíly. U nevyztužených nosníků byly naměřeny hodnoty celkové střední tuhosti  $5.15 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$  a lokální průměrné tuhosti  $5.68 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$ . Zesílené nosníky dosáhly hodnot celkové střední tuhosti  $6.28 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$  a lokální průměrné tuhosti  $7.33 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2$ . Celková tuhost se zvýšila o 22% a lokální o takřka 30%. Důsledkem je relativně vysoké zastoupení vyztužovacích GFRP prutů [10].

Z výše uvedeného a z obrázků 10 - 14 vyplývá, že vyztužování GFRP má pozitivní účinek na nosníky z lepeného dřeva. Výsledky u nosníků nevyztužených (fáze A) se dosahuje přibližně polovičních výsledků, případně polovičních až třetinových nárůstů v měřených hodnotách než je to u nosníků vyztužených ve dvou lamelách (fáze E).

### **6.2.5 HFRP**

HFRP (Hybrid fiber reinforced polymer/plastic) je polymer skládající se z dvou nebo více typů zesilujících polymerů ve formě vláken v jedné matici. Vysoký modul pružnosti vláken zajišťuje tuhost a vysokou odolnost proti namáhání naproti tomu polymery ve formě vláken s nízkým modulem pružnosti mají tendenci k vyšší toleranci vůči poškození a přitom jejich cena není vysoká [9].

Hanshanova Univerzita v provincii Kuang-tung v městě Čchao-čou v Číně ve spolupráci v Shantou Univerzitou v provincii Kuang-tung v městě Shantou v Číně provedli výzkum, ve kterém nosníky z metasekvoje čínské [21] vyztužili deskami z CF

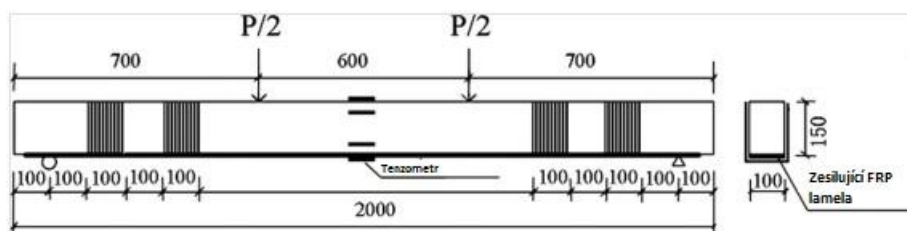
("carbon fiber" - uhlíkových vláken), GF ("glass fiber" - skelných vláken) a SGF ("high strength glass fiber" - vysoko pevnostních skelných vláken) a poté z kombinace CF/GF a CF/SGF desek [9].

Fošny z metasekvoje byly vysušeny na lokální pile na vlhkost 14.36% [9].

Byly použity desky nejdříve z CF, GF a SGF. Mez pevnosti v tahu SGF je skoro stejná jako mez pevnosti CF zatímco relativní prodloužení SGF je až 3.1 násobně větší než u CF a 2.1 násobně vyšší než u GF. Jako spojovací článek byla zvolena epoxidová pryskyřice s katalyzátorem, dibutylftalátem a formaldehydem [9].

Bylo vyrobeno 15 nosníků s rozměry 2000 mm dlouhé, 100 mm široké a s tloušťkou 150 mm. Každá deska z materiálu na bázi vláken byla nakrájena na 1980 mm dlouhé plátky a nalepena na lamelu, která je nejvíce namáhána v tahu, tj. spodní lamela. Po nalepení plátek byly pod tlakem vyvinutým 50 kilogramovou ocelovou lamelou nechány jeden týden, aby epoxidová pryskyřice vytvrdila v pokojové teplotě [9].

Po vytvrzení následoval samostatný čtyř-bodový ohybový test, který se řídil čínským standardem GB50329-2002, kde podpěry byly umístěny 100 mm od okraje nosníku se závažími umístěnými 300 mm od středu nosníku po obou stranách. Pomocí LVDT byly měřeny hodnoty: velikost průhybu středu nosníku, namáhání ve středu nosníku [9].



Obrázek 15 -Schéma testu měření vyztužených nosníků [9]

Obrázek 15 zobrazuje schéma zkoušky. 100 mm od kraje nosníku jsou umístěny podpěry, 700 mm od každého kraje nosníku je pohon, který zajišťuje požadované silové namáhání.

Tabulka 14 - Výsledky měření u čtyř-bodového ohybu [9]

Typ nosníku	Naměřené hodnoty mezi zatížení [kN]	Maximální průhyb ve středu nosníku [mm]
P <sub>1</sub>	42,300	21,257
P <sub>2</sub>	52,182	18,931
P <sub>3</sub>	57,753	20,538
C <sub>1</sub>	75,372	36,340
C <sub>2</sub>	57,549	21,558
C <sub>3</sub>	58,779	24,972
S <sub>1</sub>	58,447	28,162
S <sub>2</sub>	50,910	26,770
S <sub>3</sub>	57,039	28,790
H <sub>11</sub>	57,495	31,958
H <sub>12</sub>	69,907	35,960
H <sub>13</sub>	51,147	28,790
H <sub>21</sub>	62,468	61,875
H <sub>22</sub>	67,710	>29,491
H <sub>23</sub>	55,075	54,912

Tabulka 14 zobrazuje výsledky měření čtyř-bodového ohybu.

U nosníků typu P, což jsou nosníky, které nejsou vyztuženy žádnou deskou na bázi vláken, vyšla průměrná hodnota mezi zatížení 47.745 kN. V první části zkoušky byly zpozorovány malé trhlinky, v oblasti 80% výsledných mezi, v okolí lokálních defektů (suk). Při prasknutí nosníku byl zaznamenán hlasitý zvuk [9].

Nosníky typu C, nosníky vyztuženy CF vrstvou. V oblasti 85% celkové mezi byl slyšet zvuk lámajícího se dřeva společně s vytvořením mikrotrhlin ve spodní lamelě poblíž defektů. Ovšem CFRP vrstva zůstala netknutá. V okamžiku meze úměrnosti u nosníku C3 byl slyšet zvuk prasknutí lamel nosníku bezprostředně po něm praskla i vrstva CFRT desky. S ohledem na nosníky P byly naměřené hodnoty o 33.8% vyšší [9].

u S nosníků, vyztužené SGF vrstvou v oblasti 85% dřeva praskalo v oblasti lokálních defektů. Nosník byl porušen za doprovodu hlasitého zvuku společně s destrukcí SGF vrstvy. Naměřené hodnoty byly přibližně o 9% vyšší než u P nosníků [9].

U H<sub>1</sub> nosníků, vyztužené kombinací CF/GF vrstvami, mělo stejný průběh jako nosníky skupiny P, v oblasti 80% mezi úměrnosti dřeva praskalo v těsném okolí

lokálních defektů lamel. Nosníky byly zničeny v okamžiku maximální meze zatížení, když nosník praskl společně s CF/GF vrstvou. Výsledky byly přibližně o 25% vyšší než u P nosníků [9].

Poslední skupina nosníků H<sub>2</sub>, nosníky vyztuženy CF/SGF vrstvou, v první fázi, okolo 75% maximální meze, dřevo začalo praskat v okolí lokálních defektů. V poslední fázi průhyb uprostřed nosníku výrazně se zvýšil s malým zvýšením zatížení. Hodnoty u H<sub>2</sub> nosníků dosahovaly o 30% vyšší v oblasti nárůstu meze úměrnosti a maximální průhyb ve středu nosníku před destrukcí se zvýšil o 182% [9].

Z tabulky 14 a výše uvedených informací vyplývá, že obě možnosti, ať pouze jeden FRP ("fiber reinforced polymer/plastic) nebo společně ve formě HFRP mohou efektivně vyztužit a zlepšit vlastnosti již stojících dřevěných nosníků. V porovnání mezi sebou, hybridní polymer z CF a SGF zajišťuje větší relativní protažení doprovázející dřívější varování v případě destrukce (75% maximální meze). Oproti nosníkům nevyztuženým v oblasti čtyř-bodového ohybu jednoznačně je žádoucí nosníky vyztužovat jakýmkoliv hybridním polymerem nebo pouze vrstvou CFRP.

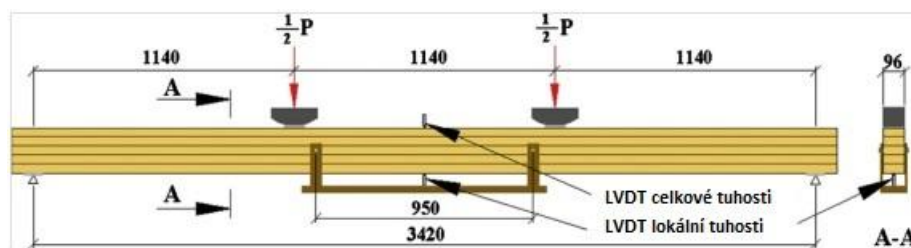
### **6.2.6 BFRP pruty**

BFRP ("basalt fiber reinforced polymer") se využívají nejčastěji k zesílení stojících betonových nosníků, případně jako výztuž kvůli jejich vlastnostem, jako je zvýšení odolnost proti korozi. Oproti GFRP mají BFRP materiály lepší mechanické vlastnosti při vystavení zvýšených teplot. Mezi další pozitivní vlastnosti BFRP materiálů patří vysoká chemická odolnost, menší hmotnost v porovnání s ocelovými pruty.

Oddělení civilního a environmentálního inženýrství Fakulty inženýrské univerzity v Aucklandu na Novém Zélandu společně s Vysokou školou inženýrství a informatiky Národní univerzity Irska v Galwayi v Irsku vykonalo výzkum, který měl vyšetřit, zda zesílení nízko-kvalitního lepeného dřeva třídy C16 podle EN 388 zapuštěnými pruty na bázi čedičových vláken. Nosníky z lepeného dřeva byly vyrobeny z nekvalitního smrku Sitka. Pruty na bázi čedičových vláken byly do nosníků zapuštěny pomocí epoxidové pryskyřice do předem připravených drážek kruhovitých tvarů na různých místech nosníku [11].

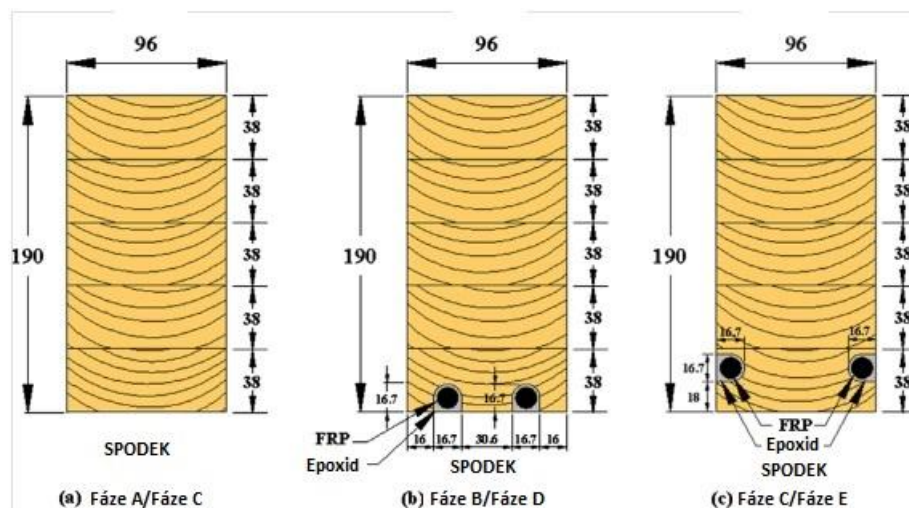
Nosníky byly vyrobeny v požadovaných rozměrech: délka 3610 mm, 190 tloušťka - pět lamel po 38 mm každá a šířkou 96 mm. Lamely byly mezi sebou slepeny PRF (resorcin formaldehydovou pryskyřicí). Poté se nechali nosníky v místnosti s teplotou 20 stupňů Celsia a relativní vlhkostí vzduchu 65% po dobu 24 hodin. Kruhové drážky byly vyfrézovány CNC strojem. Poté byly opět uloženy v klimatizované místnosti po dobu 30 dní pro jistotu plně vytvrzeného adheziva [11].

Nosníky po vytvrzení byly otestovány na čtyř-bodový ohyb, konkrétněji v EN 408 nejdříve v jejich nezesíleném stavu, tj. bez přítomnosti BFRP prutů a poté v jejich zesíleném stavu, tj. po zasazení BFRP prutů. Zesílení BFRP pruty bylo umístěno v místech, kde byly uměle poškozeny, protože účelem tohoto výzkumu bylo měření poškozených nosníků z lepeného dřeva právě GFRP pruty, proto vyřizli kotoučovou pilou drážku ve spodní lamele do hloubky poloviny lamely, které simulovalo poškození. Každé měření se opakovalo pětkrát [11].



Obrázek 16 - Schéma prováděného čtyř-bodového ohybu [11]

Obrázek 16 zobrazuje schéma zkoušky čtyřbodového ohybu dle EN 408. Všechny nosníky byly testovány na celkovou a lokální tuhost ve stavu, kdy nebyly vyztuženy, za použití 400 kN hydraulického pohonu. Celková tuhost byla měřena prostřednictvím LVDT - "linear variable differential transformer" - lineární rozdílový transformátor [20], který byl umístěn doprostřed nosníku horní lamely. Výsledky průhybu byly přijaty ke vztahu k podpěrám, a proto můžeme předpokládat stejné průhyby na celém rozpětí nosníku. Lokální tuhost byla striktně měřena v místě maximálního ohybového momentu, kde nebylo žádné smykové napětí. Druhý LVDT byl umístěn na rameni, které bylo umístěno od neutrální zóny nosníku ve vzdálenosti odpovídající pětinasobku tloušťky nosníku. Na výsledné měření deformací byly na každé lamele umístěny dva tenzometry, jeden na spodní lamele a jeden na horní lamele [11].

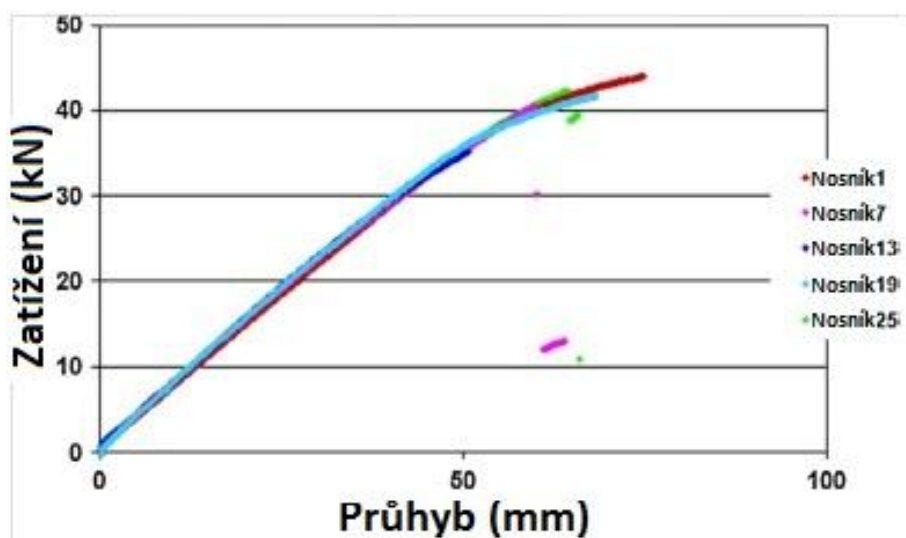


Obrázek 17 - výběr použitých nosníků při výzkumu [11]

Na obrázku 17 jsou vidět nosníky, které byly použity. Obrázek (a) zobrazuje nosník, který nebyl vyztužen na žádném místě. Obrázek (b) zobrazuje nosník, který byl po umělém poškození zesílen BFRP pruty na podhledové straně, které byly uloženy v kruhovitých drážkách. Na obrázku (c) je zachycen nosník, který byl vyztužen BFRP pruty v bocích spodní lamely do drážek kruhovitého tvaru.

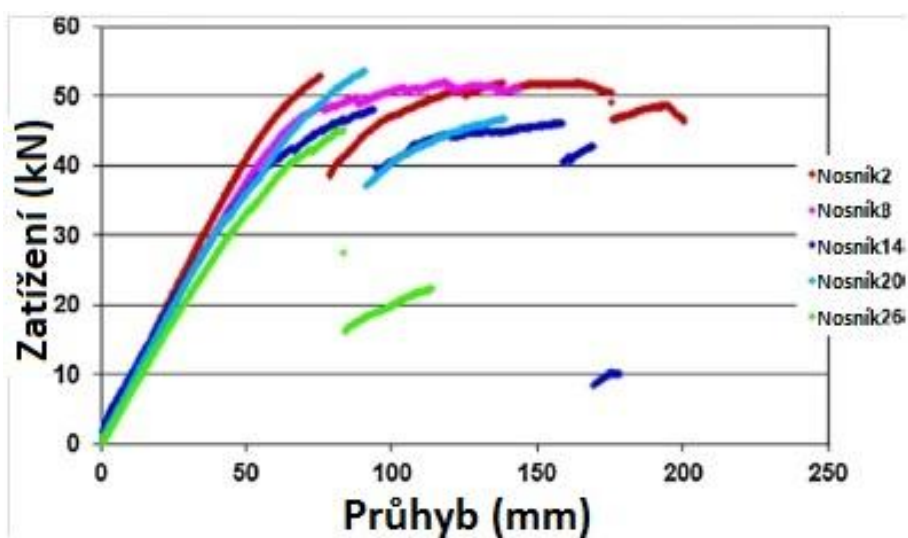
Tabulka 15 - Přehled použitých nosníků a jejich fáze [11]

Fáze	Popis	Počet opakování	Pořadová čísla nosníků
A	Nosník nezesílen BFRP prutem	5	1, 7, 13, 19, 25
B	Nosník zesílen ve spodní lamely z podhledové strany	5	2, 8, 14, 20, 26
C	Nosník zesílen ve spodní lamely z bočních stran	5	3, 9, 15, 21, 27
D	Nosník nezesílen, uměle poškozen	5	4, 10, 16, 22, 28
E	Umělé poškození nosníku opraveno zesílením v podhledové straně	5	5, 11, 17, 23, 29
F	Umělé poškození nosníku opraveno zesílením v boční straně	5	6, 12, 18, 24, 30



Obrázek 18 - Výsledné průhyby u nosníků fáze A [11]

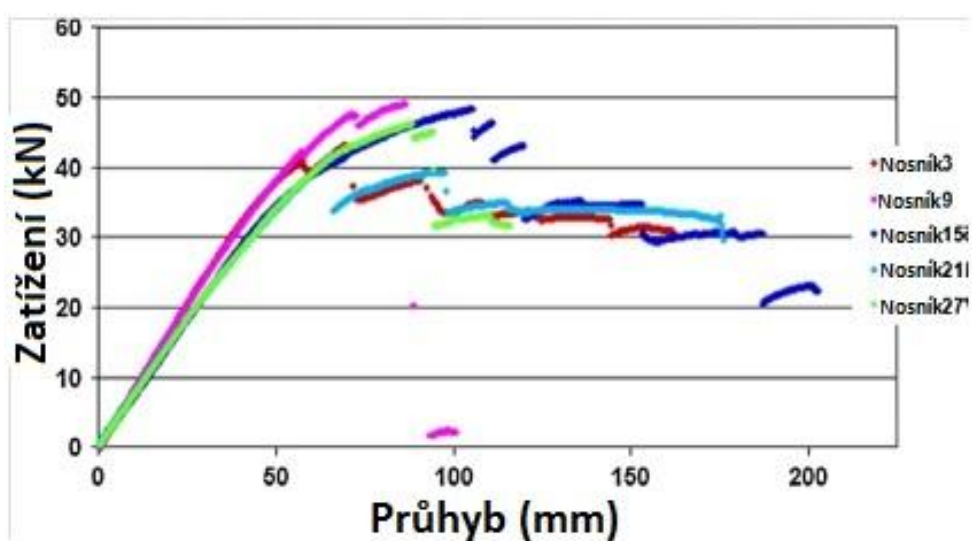
Obrázek 18 zobrazuje výsledné průhyby při zatížení u nosníků nevyztužených. Nosník 1 vykazoval nejlepší hodnoty - tj. při maximálním zatížení dokázal toto zatížení vydržet několik milimetrů, než praskl. Je to dáno především kvalitou lamel, ze kterých byl nosník vyroben. Nosník 19 praskl v místě suku, i když suk byl mimo oblast tahového namáhání. Obecně řešeno, důsledkem výběru nízko-kvalitního řeziva, všechny nosníky praskly právě v místě lokálního defektu, pokud byl přítomen v místě s vysokým tahovým namáháním. U nosníků fáze nedocházelo k typickému zvrásnění horní lamely vlivem tlaku.



Obrázek 19 - Výsledné průhyby u nosníků fáze B [11]

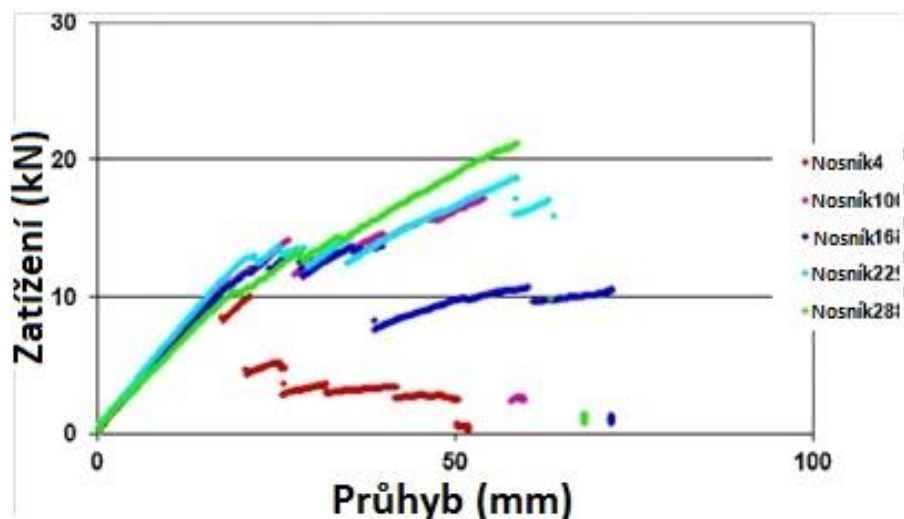


Obrázek 19 zachycuje maximální únosné zatížení a výsledné průhyby u nosníků fáze B. Nosníky fáze B oproti nosníkům fáze A vykazaly výrazné zvýšení výdrže při odolnosti maximální zátěži. Všechny nosníky byly porušeny v místech lokálních defektů v nejvíce namáhané spodní lamely. Všechny nosníky, kromě nosníku 8, dokázali odolávat napětí i po prvotním poškození spodní lamely. V žádných nosnicích nepraskly vyztužovací pruty. Lepený spoj BFRP prutů se dřevem povolil až po výrazné destrukci lamely, ve které byl spoj umístěn. Relativní průtažnost nosníků byla závislá na hustotě výskytu defektů ve spodní lamely, ačkoliv některé defekty byly odstraněny v důsledku výroby drážek na pruty [11].



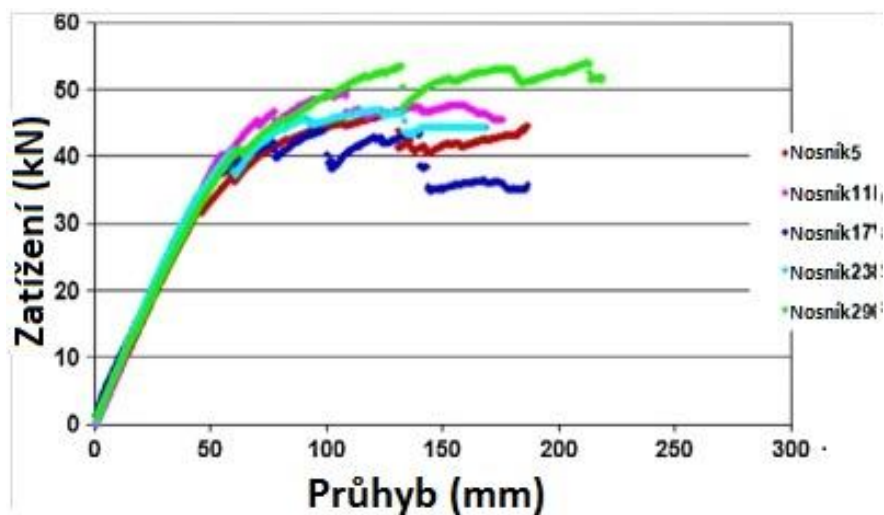
Obrázek 20 - Výsledné průhyby u nosníků fáze C [11]

Na obrázku 20 jsou zobrazeny průhyby u nosníků fáze C, které byly vyztuženy v bočních stranách lamely, tudíž nebyl snížen estetický vzhled nosníku z pohledové strany. V porovnání s nosníky fáze B je jasně vidět menší odolnost tahovému namáhání v důsledku umístění zesilovacích prutů mimo maximálně namáhané zóny ve spodní lamely. Všechny nosníky praskly v místech pod zesílením, tudíž čedičové zesílení bylo celistvé, ovšem nosník byl už zničen. Lepení spoj mezi pruty a nosníkem byl porušen až v okamžiku markantního porušení lamely, ve které byl nosník umístěn [11].



Obrázek 21 - Výsledné průhyby u nosníků fáze D [11]

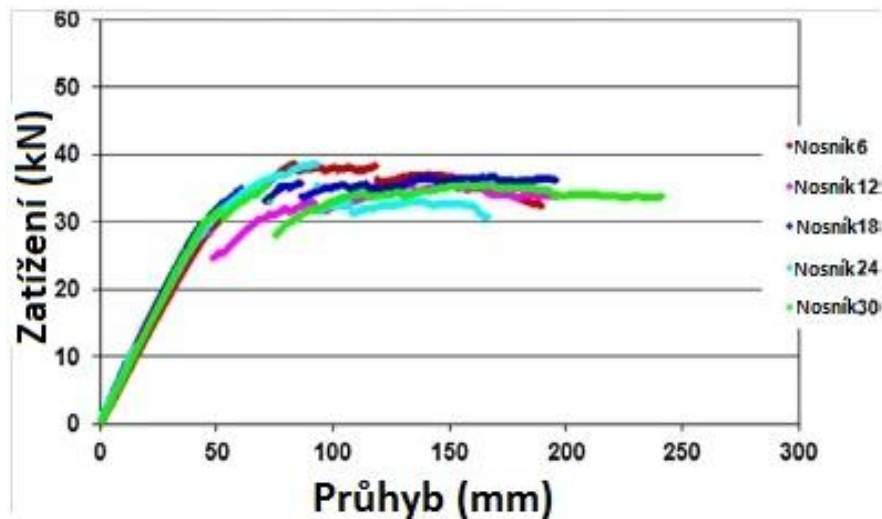
Průhyby nosníků fáze D, tj. nosníky nezesílené BFRP pruty, ale byly uměle poškozeny řezem v prostředku spodní lamely simulující poškozený prvek vyžadující opravu. Všechny nosníky byly poškozeny v místě umělého řezu. Žádný nosník nebyl poškozen jinde než v místě řezu. Nosník 4 vykazoval nelineární chování v důsledku velkého defektu blízko umělého řezu [11].



Obrázek 22 - Výsledné průhyby u nosníků fáze E [11]

Nosníky fáze E, tudíž nosníky uměle porušeny středovým řezem do spodní lamely a opraveny použitím 12 mm BFRP prutů v podhledové straně nosníku, a jejich průhyby jsou zobrazeny na obrázku 22. Chování E nosníků je podobné jako u nosníků fáze B, ačkoliv nosníky praskly při nižších hodnotách v oblasti blízko umělého

poškození. U jednoho nosníku bylo zaznamenáno, že praskl mimo oblast umělého poškození, ale v oblasti lokálního defektu ve spodní lamely. Bylo prokázáno, že BFRP pruty se chovali jako mosty přes umělá poškození a byly efektivní v problému spravení poškozených dřevěných nosníků [11].



Obrázek 23 - Výsledné průhyby u nosníků fáze F [11]

Nosníky fáze F, tj. nosníky, které byly uměle poškozeny a následně vyztuženy BFRP pruty v bočních stranách spodní lamely, a jejich průhyby společně s jejich chováním při testu, zobrazuje obrázek 23. Všechny nosníky praskly v místě spodní lamely v oblasti umělého poškození. Tato poškození se ale vyskytovala v mnohem vyšších hodnotách namáhání než jako je to u nosníků fáze D, to poukazuje na vysokou schopnost BFRP prutů opravy poškozených nosníků. Zesílení bylo efektivní až do okamžiku totální destrukce nosníku vlivem namáhání. Zesílení bylo umístěno v bočních stranách lamely, tudíž estetický vzhled dřeva zůstal zachován, než jako tomu bylo u E nosníků s vyztužením v podhledové straně spodní lamely. Protože zesílení bylo blíže neutrální ose v nosnících F a bylo výše než byla zóna maximálního tahového namáhání, deformace nosníku bylo při menších hodnotách a schopnost odolávat mezi byla menší než u E nosníků [11].

## 7 Závěr

Využívání materiálů na bázi vláken v interakci mezi kompozitními materiály na bázi dřeva je dle vypracované práce jistě žádoucí. V každém z uvedených a zpracovaných výzkumu vyšlo, že dřevní materiál, který byl jakýmkoliv způsobem vyztužen, nebo vrstva v něm byla nahrazena materiálem na bázi vláken, měl výrazně lepší mechanické vlastnosti, případně materiál na bázi vláken mohl vylepšit poškozený nosník takovým způsobem, že není potřeba poškozený nosník vyměnit, což by mohlo být u stojících staveb problémem. O to více byly lepší mechanické vlastnosti měřeného kompozitu s využitím nedřevních materiálů na bázi vláken, když byl materiál degradován vlhkostí a následně testován.

Výsledky byly víceméně očekávány, protože materiály na bázi vláken se ve velkém množství využívají v kosmonautice, v automobilovém průmyslu a ve stavebnictví a v dalších odvětvích a jejich spolehlivost je zaručeně vysoká. Zejména díky jejich vlastnostem, které jsou v porovnání se dřevem, relativně lepší, co se týče mechanicko-fyzikálních vlastností. Ale zároveň výsledky ukázaly, že v této oblasti není vhodné, případně není možné dřevo nahradit právě díky jeho výjimečným vlastnostem.

Co se týče rovině praxe, právě díky unikátnímu a velice vhodnému spojení materiálů na bázi vláken a kompozitních materiálů na bázi dřeva, v současné době probíhá řada prací, které mají za úkol právě stávající dřevěné nosníky vyztužovat vláknitými materiály, viz [17] v případě nahrazování dřevěných nosníků v přímořských mostech mimo jiné.

## 8 Zdroje

1. GANDELOVÁ, Libuše.; HORÁČEK, Petr.; ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila. *Nauka o dřevě*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009, 176 s.
2. KRÁL, Pavel.; HRÁZSKÝ, Jaroslav. *Kompozitní materiály na bázi dřeva. Část 2: Dýhy a vrstvené masivní materiály*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2006, 168 s.
3. KUKLÍK, Petr.; MELZEROVÁ, Lenka. *Kompozitní materiály na bázi dřeva*. ČVUT Praha, 2011, 76 s.
4. GRNIAK, Martin. *Výztužovanie drevených prvkov uhlíkovými lamelami*. Zvolen, 2003. Autoreferát dizertační práce. Technická univerzita vo Zvolene. Drevárska Fakulta.
5. SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-8076-007-1.
6. JOCHIM, Stanislav.; DUDAS, Juraj. *Konštrukčné drevené materiály pre drevené stavebné konštrukcie a výrobky*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008, 161 s.
7. NUTSCH, Wolfgang. *Průručka pro truhláře*. 2., přeprac. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006. ISBN 80-86706-14-1.
8. LOUREIRO, Nuno Calçada.; ESTEVES, José Luís. Glass-fiber wood the composite materials used to create a new wood laminate. *8th Global WPC and Natural Fibre Composites Congress and Exhibition*, 2010, s. 2-8, ISSN: 0018-3830
9. YANG, You-long.; LIU, Jin-wei.; XIONG, Guang-jing. Flexural behavior of wood beams strengthened with HFRP. *Constructions and building materials*, 2013, vol. 43, s. 118-124, ISSN: 0950-0618
10. RAFTERY, Gary M.; WHELAN, Conor. Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods. *Constructions and building materials*, 2014, vol. 52, s. 209-220, ISSN: 0950-0618
11. RAFTERY, Gary M.; KELLY, Fiona. Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber. *Composites Part B - Engineering*, 2015, vol. 70, s. 9-19, ISSN: 1359-8368

### Internetové zdroje

12. NIKKISO [online]. *What is CFRP?*. [2008]. [cit. 3. 3. 2016]. Dostupné z: <http://www.nikkiso.com/products/cfrp/outline.html>
13. SIKA CZE [online]. *Uhlíkové CFRP lamely a tyče. Katalog výrobků*. Neznámý rok. [cit. 3. 3. 2016]. Dostupné z: [http://cze.sika.com/cs/produkty\\_a\\_reseni/stavebnictvi/02a013/02a013sa06/02a013sa06ssa02.html](http://cze.sika.com/cs/produkty_a_reseni/stavebnictvi/02a013/02a013sa06/02a013sa06ssa02.html)
14. DEKWOOD [online]. *BSH - lepené lamelové dřevo. Stavební hranoly DEKWOOD*. 2013. [cit. 27. 2. 2016]. Dostupné z: [http://dekwood.cz/docs/dekwood\\_cz/dokumenty/lepene-lamelove-drevo-bsh\\_1ldBSH.pdf](http://dekwood.cz/docs/dekwood_cz/dokumenty/lepene-lamelove-drevo-bsh_1ldBSH.pdf)
15. CHOMARAT [online]. *Glass reinforcements selector guide*. 2014. [cit. 5. 3. 2016]. Dostupné z: <http://www.gazechim.it/files/SelectorGuideGlass-3Volets-GB-BAT.pdf>

16. Neznámý. *Styrene* [online]. Wikipedia, 2003 [cit. 6. 3. 2016]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Styrene>
17. State of Queensland (Department of Transport and Main Roads). *Fibre Composite Projects 2015*. 2015 [cit. 12. 2. 2016]. Dostupné z: <http://www.tmr.qld.gov.au/-/media/busind/techstdpubs/Technical-notes/Bridges-other-structures/TN54FibeCompositeProjects.pdf?la=en>
18. ARMASTEK IRAN. *GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) Rebar, The Alternative Solution! Reinforce safely without Steel*. 2009 [cit. 14. 2. 2016]. Dostupné z: [www.deik.org.tr/Contents/FileAction/5883](http://www.deik.org.tr/Contents/FileAction/5883)
19. Aslan FRP. *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Rebar - Aslan 100 series*. 2011 [cit. 4. 2. 2016]. Dostupné z: <http://www.aslanfrp.com/Media/Aslan100.pdf>
20. ZÁRYBNICKÝ, Tomáš.; JAROŠ, Miroslav.; TREFÍLKOVÁ, Dana.; VESELÝ, Bohumil.; JANYŠKA, Lubomír. Snímače polohy/Prostředky automatizace/Elektrotechnika. In: *Elektronická učebnice Olomouckého kraje* [online]. 2015 [cit. 15. 2. 2016]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/960>
21. Neznámý. *Metasequoia* [online]. Wikipedia, 2003 [cit. 6. 3. 2016]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Metasequoia>

## Normy

ČSN EN 338. *Konstrukční dřevo - Třídy pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009