



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

## MOŽNOSTI DODATEČNÉHO ZESILOVÁNÍ DŘEVĚNÝCH PRVKŮ

ADDITIONAL REINFORCEMENT OF WOOD ELEMENTS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radek Janoušek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAN VANĚREK, Ph.D.

BRNO 2021



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	NPC-SIM Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Specializace</b>	bez specializace
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Radek Janoušek
<b>Název</b>	Možnosti dodatečného zesilování dřevěných prvků
<b>Vedoucí práce</b>	doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2021
<b>Datum odevzdání</b>	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,  
dr.h.c.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Johnsson, H., Blanksvärd, A. Carolin, A. Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement. *Materials and Structures* (2006)40:47-56, DOI 10.1617/s11527-006-9119-7

Schober, K.U., Rautenstrauch, K. Post-strengthening of timber structure with CFRP´s. *Materials and Structures* (2006)40:27-35, DOI 10.1617/s11527-006-9128-6

Custódio, J., Broughton, J.G and Cruz, H. A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 29(2):173-185 2009

Stoeckel, F., Konnerth, J., Gindl-Altmutter, W. Mechanical properties of adhesives for bonding wood—A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Volume 45, 2013, 32-41

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V případě sanací dřevěných prvků nebo spojů s nedostatečnou únosností je jednou z variant dodatečného zesílení využití ocelových prvků nebo FRP materiálů. Na spoj FRP s dřevěným adhirendem je z kvalitativního hlediska požadováno zajištění dostatečné trvanlivosti spoje ve vztahu k objemovým změnám vyvolaných vlhkostí, a rovněž zajištění odolnosti spoje proti zvýšeným teplotám do 200°C. Aspekty FRP/dřevěných kompozitních systémů budou řádně popsány v teoretické části práci.

V praktické části práce se nejdříve provede optimalizace dostupných materiálových bází FRP materiálů především se zaměřením na odolnost proti zvýšeným teplotám, a poté bude experimentálně provedeno:

1. aplikace FRP (tkanin, lamel) na různé dřeviny využívané pro konstrukční účely (předpokládá se BK, AK, SM a MD);
2. ověření vlivu typu konstrukčních lepidel (příp. modifikovaných vláknů/částicemi) pro lepení FRP prvků;
3. trvanlivostní testy (smyk, delaminace) a testy odolnosti proti zvýšeným teplotám;
4. vyhodnocení typu materiálové báze FRP a typu lepidla na únosnost a trvanlivost těchto systémů.

Předpokládaný rozsah práce činí 60 až 80 stran.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi dodatečného zesílení dřevěných prvků s použitím různých typů BFRP materiálů. V rámci praktické části byl proveden experiment zesílení překližovaných desek externím zesílením za pomoci BFRP tkanin s odlišnou plošnou hmotností. V rámci provedených pevnostních zkoušek byly vzorky namáhány ohybovým a smykovým namáháním. Pro ověření kvality lepení překližovaných desek byla tělesa vystavena účinku zvýšené teploty a dále provedena zkouška delaminace pro stanovení kvality lepení spár překližované desky. Dosažené hodnoty byly vyhodnoceny a porovnány s dostupnou literaturou.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Překližovaná deska, čedičová FRP tkanina, plošná hmotnost, vrstvy výztuže, orientace lepené spáry, smyková plocha, teplota, pevnost v ohybu, modul pružnosti, pevnost ve smyku, kohezní porušení, delaminace lepených spár.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the possibilities of additional reinforcement of wooden elements using different types of BFRP materials. In the practical part, an experiment of reinforcing plywood with external reinforcement using BFRP fabrics with different basis weights was performed. As part of the strength tests performed, the specimens were subjected to bending and shear stresses. To verify the bonding quality of the plywood, the bodies were exposed to the effect of elevated temperature and a delamination test was performed to determine the bonding quality of the plywood joints. The achieved values were evaluated and compared with the available literature.

## **KEYWORDS**

Plywood, basalt FRP fabric, basis weight, reinforcement layers, orientation of the glued joint, shear area, temperature, bending strength, modulus of elasticity, shear strength, cohesion failure, delamination of glued joints.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. Radek Janoušek *Možnosti dodatečného zesilování dřevěných prvků*. Brno, 2022. 80 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Možnosti dodatečného zesilování dřevěných prvků* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2022

---

Bc. Radek Janoušek  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D. za odborné vedení, rady, trpělivost a poskytnutí potřebných materiálů pro zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Adamu Běťákovi za věnovaný čas, užitečné rady a výpomoc v laboratořích. Také děkuji všem pracovníkům vědeckovýzkumného centra AdMaS a VUT, kteří se podíleli na zhotovení a úpravě zkušebních těles. V neposlední řadě děkuji své rodině za umožnění studování, podporu a pochopení.

# Obsah

1. Úvod.....	1
2. Druhy FRP výztuže.....	2
2.1. Vlastnosti základních materiálů .....	2
2.1.1. Vlákna pro vyztužování polymerů .....	2
2.1.2. Matrice.....	6
2.2. Typy kompozitních výztuží.....	8
2.2.1. Vnější FRP výztuž.....	8
2.2.2. Vnitřní FRP výztuže .....	10
3. Způsoby zesilování dřevěných prvků pomocí FRP výztuží .....	13
3.1. Zesilování prvků externě lepenou FRP výztuží .....	14
3.1.1. Lepená lamela.....	14
3.1.2. Ovinutí tkaninou .....	15
3.2. Zesilování prvků FRP výztuží uloženou v drážce.....	17
4. Rešeršní analýza experimentálních studií k pevnostním parametrům systému FRP/dřevo .....	19
4.1. Zesilující účinek čedičových vláken s ohledem na umístění výztuže.....	19
4.2. Vliv zesílení FRP vláknou na smykové pevnosti překližované desky.....	22
4.3. Vliv délky a orientace výztužných vláken na elasticitu překližované desky .....	24
5. Cíl práce.....	26
6. Metodika práce .....	27
6.1. Specifikace použitých materiálů .....	27
6.1.1. Dřevěný adherend.....	27
6.1.2. BFRP výztuž.....	29
6.1.3. Lepidlo pro aplikaci kompozitního systému překližovaná deska/BFRP.....	30
6.1.4. Příprava zkušebních těles .....	31
6.2. Specifikace použitých metod .....	34

6.2.1. Stanovení pevnosti v ohybu a modulu pružnosti.....	34
6.2.2. Stanovení pevnosti ve smyku a podílu porušení ve dřevě.....	36
6.2.3. Stanovení pevnosti ve smyku za působení zvýšené teploty .....	39
6.2.4. Stanovení delaminace lepených spár.....	39
7. Výsledky experimentu .....	41
7.1. Pevnost v ohybu .....	41
7.2. Pevnost ve smyku.....	42
7.3. Pevnost ve smyku za působení zvýšené teploty.....	43
7.4. Delaminace lepených spár.....	44
8. Vyhodnocení výsledků .....	45
8.1. Stanovení pevnosti v ohybu .....	45
8.1.1. Březová překližovaná deska .....	45
8.1.2. Buková překližovaná deska .....	46
8.2. Stanovení modulu pružnosti v ohybu.....	47
8.2.1. Březová překližovaná deska .....	47
8.2.2. Buková překližovaná deska .....	48
8.3. Stanovení pevnosti ve smyku.....	49
8.3.1. Březová překližovaná deska .....	50
8.3.2. Buková překližovaná deska .....	52
8.3.3. Březová překližovaná deska za působení zvýšené teploty .....	53
8.4. Delaminace kompozitu BFRP/březová překližovaná deska .....	55
9. Shrnutí a diskuse.....	56
9.1. Vliv způsobu zesílení na ohybové pevnosti a moduly pružnosti .....	56
9.2. Vliv způsobu zesílení na smykové pevnosti a kohezní porušení .....	57
9.3. Ověření kvality lepení systému BFRP .....	59
10. Závěr .....	60
Citovaná literatura.....	62

Seznam obrázků.....	66
Seznam tabulek.....	69
Seznam grafů.....	70

# 1. Úvod

Provádění sanací stávajících dřevěných konstrukcí je z technologického hlediska provedení v zabudované konstrukci náročné. Kromě mnohých variant poruch a náročnosti provedení oprav je jedním z kritérií plánu renovace stavby i rozpočet projektu a zvýšení požadavků na šetrnost k životnímu prostředí. Vzhledem k těmto faktorům je zapotřebí optimálního výběru materiálu. Již mnoho let je k těmto účelům využívána FRP výztuž, která díky svým jedinečným vlastnostem nahrazuje dosavadní klasické výztuže. [1]

Kompozitní polymerní materiály vyztužené vlákny (FRP výztuže) v kombinaci s vysokými pevnostmi obsažených vláken a pryskyřičnou matricí dosahují díky jejich vysokému poměru pevnosti v tahu ku hmotnosti a snadné manipulaci k častému uplatnění v širokém rozsahu průmyslových aplikací. V moderním stavitelství je již zesilování konstrukcí pomocí FRP výztuží nedílnou součástí, kde si tento typ vyztužení našel uplatnění pro zesilování betonových a zděných konstrukcí. V posledních letech byly tyto techniky vyztužování rozšířeny i do oblasti dřevostaveb, kde aplikace FRP výztuže pro dodatečné zesílení dřevěných konstrukcí má mnoho výhod. Kromě vysokých pevnostních charakteristik výztuže je hlavní výhodou i všestrannost k tvarům vyztužovaného prvku a možnost vyztužení i v místech, kde by tradiční techniky vyztužování neměly dostatečný účinek. FRP výztuže ve formě pultrudovaných tyčí, lamel nebo pletených tkanin mohou být umístěny na kritická místa pro zvýšení nosnosti konstrukce a pro přenos působícího zatížení. Častým způsobem dodatečného vyztužení je i montáž již vyztužené části dřevěného nosníku, která je nahrazena za poškozenou část konstrukce. Tyto techniky vyztužování jsou obvykle založeny na postupech, které jsou běžné pro opravy či modernizaci betonových a kovových konstrukcí. [2]

Častým materiálem tvořící FRP výztuž je v přírodě se vyskytující čedič. Vzhledem k přírodnímu původu čediče se jedná o ekologický a snadno recyklovatelný materiál. Vlákna tvořená z tohoto typu materiálu dosahují výrazných tahových pevností a vysoké odolnosti vůči zvýšeným teplotám a na rozdíl od jiných typů polymerních vláken je cenově dostupnější. Vzhledem k těmto charakteristickým vlastnostem je čedičová BFRP výztuž velice často využívaná pro sanační účely.

## 2. Druhy FRP výztuže

Kompozitní FRP výztuže (*Fiber Reinforced Polymer*) slouží pro dodatečné zesílení betonových, dřevěných ocelových a jiných stavebních konstrukcí. Primárním cílem využití tohoto druhu výztuže je posílení únosnosti stávajících konstrukcí, či poškozených nosných prvků. Některé typy FRP výztuží lze také použít pro přímé vyztužení jednotlivých prvků, popř. celých konstrukcí, kde se nejčastěji objevuje v podobě rozptýlené výztuže v betonové směsi. [3]

### 2.1. Vlastnosti základních materiálů

Jedná se o vláknové kompozity s polymerní matricí vytvořené s prostorovým uspořádáním vyztužujících vláken spojených pryskyřičným pojivem. Polymerní matrice vytváří ochranné prostředí vložených ztužujících vláken, kde výztuž udržuje v požadovaném směru vůči namáhání, chrání vlákna před mechanickými a chemickými vlivy a umožňuje přenos vnějších napětí do výztuže. Vláknová výztuž plní funkci nositele pevnosti a tuhosti celého kompozitního systému. FRP výztuže mohou být také označovány jako polotovary tvořené z monovláken. Vlastnosti výsledného kompozitu jsou v porovnání s vlastnostmi jednotlivých komponentů, tj. vláken a pryskyřic, podstatně odlišné. [4]

#### 2.1.1. Vlákna pro vyztužování polymerů

Předností vláken obsažených v polymerních kompozitech je jejich pevnost, tuhost a nízká hmotnost. Pro efektivní využití výztuže je tedy u vláken požadován vysoký modul pružnosti, vysoká maximální pevnost a vyhovující prodloužení při porušení v tahu. Dále je u vláken požadována vysoká houževnatost, trvanlivost, minimální rozdíl pevností mezi jednotlivými vlákny a stabilita vlastností. [5]

Nejběžněji používanými vlákny pro výrobu FRP výztuží jsou skleněná (*glass fiber reinforced polymer, GFRP*), uhlíková (*carbon fiber reinforced polymer, CFRP*), aramidová (*aramid fiber reinforced polymer, AFRP*) a čedičová vlákna (*basalt fiber reinforced polymer, BFRP*). Jednotlivé skupiny vláken lze dále rozdělit podle jejich charakteristických vlastností do dílčích podskupin (viz Tabulka 1).

Tato vlákna vykazují během tahového namáhání lineární elastické chování bez jakékoli průtažnosti, a to až do porušení materiálu. Vzhledem k účinnosti vláken na směru působení se uhlíková a aramidová vlákna řadí mezi anizotropní látky s různými

hodnotami mechanických a tepelných vlastností v hlavních směrech. Skleněná a čedičová vlákna jsou izotropní. [5]

Tabulka 1) Průměrné hodnoty mechanických vlastností jednotlivých typů FRP vláken. [6]

Typ vláken	Dílčí podskupiny	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Modul pružnosti [GPa]	Tahová pevnost [MPa]	Max. přetvoření [%]	Teplota tavení [°C]
Skleněná	E	2570	72,5	3400	2,5	1100 - 1550
	A	2460	73	2760	2,5	
	C	2460	74	2350	2,5	
	S	2470	88	4600	3	
Uhlíková	SM	1700	250	3700	1,4	1200 - 2400
	HS	1800	250	4800	1,9	
	HM	1900	500	3000	0,6	
	UHM	2100	800	2400	0,3	
Aramidová	-	1440	70 - 125	3400 - 4100	-	~ 425
Čedičová	-	2700	93 - 110	3000 - 4800	-	1450

Pozn.: Skleněná vlákna: E–sklo (elektrické sklo), A–sklo (okenní sklo), C–sklo (alkalicky odolné sklo), S–sklo (vysoce pevné sklo); Uhlíková vlákna: SM (standardní modul pružnosti), HS (vysoká pevnost v tahu), HM (vysoký modul pružnosti), UHM (velmi vysoký modul pružnosti).

### Skleněná vlákna

Tento typ vláken je pro kompozity s polymerní matricí nejčastěji používaný z důvodů vysokých tahových vlastností. Při konstantní vysoké hladině zatížení jsou ovšem skleněná vlákna náchylná k dotvarování a náhlému porušení přetržením. Hlavní složkou je sloučenina oxidu křemičitého (SiO<sub>2</sub>) s příměsí oxidů Al, Ca, Mg, B a velmi malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K. Pro zlepšení smáčivosti vláken matricí a zajištění lepší adheze mezi složkami kompozitu je povrch vláken potažen spojovacím činidlem. Tato úprava poskytuje pružnou vrstvu na rozhraní vlákno/matrice, zlepšuje pevnost vazby a snižuje počet dutin v materiálu. Obecně jsou tato vlákna výbornými tepelnými a elektrickými izolanty, ale zároveň velice citlivá na vlhkost a pH okolního prostředí, kdy při dlouhodobém vystavení alkalickému prostředí dochází k výraznému

snížení tahových pevností. Pevnost v tahu se také snižuje působením trvalého zatížení vláken. [5; 6]



*Obrázek 1) Ukázka skleněných GFRP vláken (vlevo) a konečného produktu kompozitního „I“ nosníku vyrobeného z tohoto typu vláken (vpravo). [7; 8]*

### **Uhlíková vlákna**

Uhlíková vlákna vzhledem ke svým vlastnostem je možné používat v extrémně exponovaných aplikacích, jako jsou předpjaté konstrukce, nebo dodatečné zesilování při sanaci konstrukce. Uhlíková vlákna se vyznačují vynikajícími mechanickými vlastnosti, objemovou stálostí a odolností vůči vlhkému prostředí, únavovému a dlouhodobému zatížení, odolností vůči vysokým teplotám a jsou elektricky a tepelně nevodivá. Během působení vnějšího zatížení mají uhlíková vlákna pružný charakter až do doby porušení, kde selhávají „křehkým“ způsobem. Vzhledem ke vstupnímu materiálu a náročnému procesu výroby těchto vláken je značnou nevýhodou pořizovací cena, která je vztažená na typ, respektive požadovaný modul pružnosti a maximální dosaženou tahovou pevnost vláken. [6]

Uhlíková vlákna se převážně vyrábí tepelným rozkladem polyakrylonitrilu (PAN) za vzniku uhlíkových nebo grafitových vláken. Během procesu výroby vláken dochází při teplotách 200 až 300 °C k oxidaci vláken PAN, následuje karbonizace při 1000 až 1500 °C (vznik uhlíkových vláken) a nakonec ke grafitizaci za teplot 2500 až 3000 °C (vznik vláken grafitových). V případě grafitových vláken jsou atomy uhlíku uspořádány v krystalografických rovnoběžných rovinách pravidelných šestiúhelníků, a tedy tyto vlákna mají vyšší tuhost a pevnost v tahu než vlákna uhlíková. U uhlíkových vláken je vazba mezi vrstvami slabá, takže má dvourozměrné uspořádání. [5]



Obrázek 2) Ukázka uhlíkových CFRP vláken (vlevo) a konečného produktu výztužné lamely vyrobené z tohoto typu vláken (vpravo). [9; 3]

### Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (označována také jako Kevlar) jsou tvořené aromatickými polyamidy s pevnými aromatickými kruhy a při použití vhodného způsobu zpracování mohou vykazovat vysoké pevnosti, tuhosti a odolnosti vůči nárazu. Mají velmi dobrou odolnost vůči únavě v tahu a odolávají relativně vysokým teplotám, kdy při 180 °C si zachovávají více než 80 % svých původních pevností. Kevlarová vlákna jsou citlivá na UV záření a při vysokém obsahu vlhkosti mají vlákna tendenci v již existujících mikrodutinách vnitřně praskat a vytvářet podélné štěpení. I když jsou kevlarová vlákna odolná vůči mnoha chemikáliím, může vlivem působení některých kyselin a zásad dojít k jejich degradaci. [5]



Obrázek 3) Ukázka aramidových AFRP vláken (vlevo) a konečného produktu výztužné tkaniny vyrobené z tohoto typu vláken (vpravo). [10; 11]

Aramidová vlákna jsou skupinou organických vláken s nejnižší specifickou hmotností a nejvyšším poměrem pevnosti v tahu k hmotnosti ze všech současných vyztužujících vláken. Vzhledem ke způsobu použití existuje několik typů kevlarových vláken, jako například Kevlar 29 určený pro kompozity s maximální odolností vůči nárazu a poškození. Dalšími typy je Kevlar 49, který lze použít v zesíleném plastu

a Kevlar 149 s nejvyšším modulem pružnosti v tahu ze všech dostupných aramidových vláken. [5]

### **Čedičová vlákna**

Čedič (neboli také bazalt) se přirozeně vyskytuje v přírodě jako nerost vzniklý po sopečných aktivitách. Čedičová vlákna jsou jednosložkové materiály vzniklé tavením rozdrčených ložisek sopečné lávy s následným rozvlákněním taveniny do formy nekonečných fibril. Díky materiálové povaze čedičových vláken se jedná o snadno recyklovatelný a ekologický materiál. [5; 12; 13]



*Obrázek 4) Ukázka čedičových BFRP vláken (vlevo) a konečných produktů výztužných tyčí vyrobených z tohoto typu vláken (vpravo). [14; 15]*

Bazaltová vlákna vykazují v mnoha směrech řadu mimořádných vlastností, jako je vysoká pevnost a tuhost, tepelná odolnost, a tedy možnost použitelnosti v širokém rozsahu teplot či nehořlavost. Díky pracovní teplotě 982 °C a teplotě tání 1450 °C je možné čedičová vlákna využít v aplikacích, které vyžadují požární odolnost. Dalšími výhodami čedičového vlákna je chemická odolnost vůči většině alkálií, organickým kyselinám, anorganickým kyselinám, organickým rozpouštědlům, většině chemikálií a jiným agresivním látkám. V porovnání s jinými typy ztužujících vláken vykazují bazaltová vlákna zvýšené fyzikálně mechanické vlastnosti než skleněná vlákna a jsou výrazně levnější než vlákna uhlíková. Další kladnou vlastností je silná kompatibilita vláken s vyztužením různých termosetových polymerních matric jako jsou polyesterové, vinylesterové a epoxidové pryskyřice. [5; 12; 13]

#### **2.1.2. Matrice**

Jelikož jsou ztužující vlákna malých průřezových rozměrů, nemohou se v technických aplikacích používat přímo. Z toho důvodu jsou vlákna uložena do polymerní matrice. Hlavními funkcemi matrice je spojování uložených ztužujících vláken

do vhodné struktury tvořící celý FRP kompozit a jejich ochrana před povrchovým poškozením, které by mohlo způsobit úplnou ztrátu pevností kompozitu. Během účinku tahového namáhání dochází k přenosu vzniklého napětí z matrice do uložených vláken, které díky svým pevnostem a tuhosti přebírají působící napětí. Důležitá je tedy i styková plocha mezi maticí a vlákny, která musí zajišťovat přenos napětí. Nejčastěji používaným materiálem tvořící úložnou maticí jsou termosety nenasyčené polyestery (UP), vinylestery (VE) a epoxidy (EP). Jejich charakteristické vlastnosti jsou popsány v Tabulce 2. [4]

Tabulka 2) Charakteristické vlastnosti nejčastěji používaných polymerních matic. [16]

Vlastnosti	Typ matrice		
	Polyesterová	Epoxidová	Vinylesterová
<b>Objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1 200 – 1 400	1 200 – 1 400	1 150 – 1 350
<b>Tahová pevnost [MPa]</b>	34,5 - 104	55 - 130	73 - 81
<b>Modul pružnosti [GPa]</b>	2,1 - 3,45	2,75 - 4,1	3,0 - 3,5
<b>Poissonův koeficient</b>	0,35 - 0,39	0,38 - 0,4	0,36 - 0,39
<b>Koeficient teplotní roztažnosti [10<sup>-6</sup>/°C]</b>	55 - 100	45 - 65	50 - 75

### Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP)

Tento typ adhesiva je nejrozšířenějším pojivem pro výrobu FRP kompozitů. Tyto reaktivní pryskyřice jsou bezbarvé, až slabě nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech. Vytvrzování probíhá za normální nebo zvýšené teploty bez vzniku vedlejších těkavých produktů. Během vytvrzování dochází k uvolnění reakčního tepla a k objemovému smrštění o 5 až 9 %. Polyesterové pryskyřice jsou křehké a snadno v nich vznikají mikrotrhliny, které mohou nepříznivě ovlivnit vlastnosti pryskyřice. Tyto pryskyřice dobře smáčejí povrch vláken, ovšem pevnost vazby na rozhraní pojivo/vlákně je menší než u pryskyřic epoxidových. [17]

### Epoxidové pryskyřice (EP)

Díky svým vlastnostem a vysoké kvalitě patří epoxidové pryskyřice mezi velmi hodnotné termosety s nejvšestrannějším využitím v oblasti stavebních konstrukcí. Vyznačují se především velice dobrými mechanickými vlastnostmi, ale i vysokou rozměrovou stálostí a přilnavostí k podkladu. Tyto vlastnosti jsou silně ovlivněny širokým množstvím typů tvrdidel, která se často přizpůsobují pro speciální aplikace

lepení. V rámci aplikace lepidla je tedy zapotřebí vybrat vhodný typ pryskyřic, tvrdidel a případně přísad, aby byly dosaženy optimální a požadované vlastnosti vytvrzeného adhesiva.

Objemové smrštění epoxidové pryskyřice se pohybuje v rozmezí 2 % a vzniká převážně v již tekutém stavu. Kromě výborných mechanických vlastností mají tyto lepidla i dobré elektroizolační vlastnosti. Dále jsou odolné vůči roztokům alkálií, kyselinám a některým druhům rozpouštědel. Ovšem ve vodním prostředí dochází k navlhání lepidla a ke snížení teplotní odolnosti v důsledku plastifikačního účinku vody. Teplotní odolnost je závislá na typu tvrdidla a pojiva. V porovnání s ostatními reaktoplasty mají dobrou houževnatost. [6; 17]

### **Vinylesterové pryskyřice (VE)**

Tento typ pryskyřic kombinuje vlastnosti nenasycených polyesterových a epoxidových pryskyřic. Vinylesterové pryskyřice mají větší odolnost vůči tvorbě mikrotrhlin, větší mezilaminární smykovou pevnost a větší houževnatost než kompozity za použití nenasycených polyesterů a v porovnání s epoxidovými pryskyřicemi dosahují nižší viskozity adhesiva. Vzhledem k vlastnostem vinylesterových pryskyřic se tato lepidla používají zejména v prostředí s účinkem agresivních chemikálií, u konstrukcí vystavených velkému mechanickému namáhání a pro aplikace s požadovanou odolností vůči vysokým teplotám. [17]

## **2.2. Typy kompozitních výztuží**

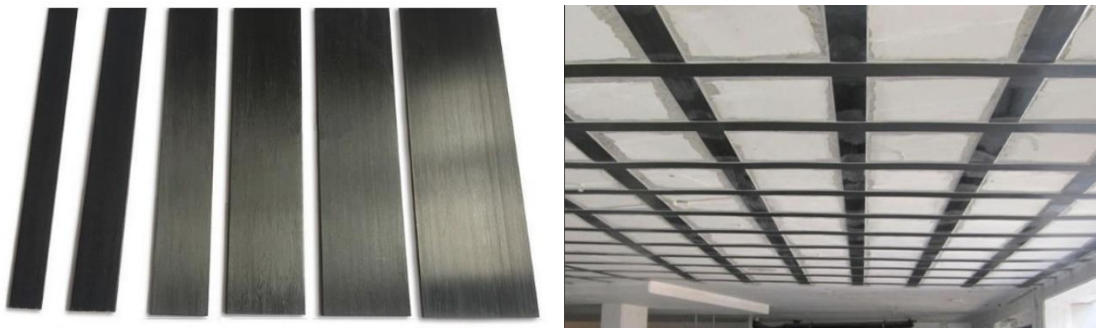
Vzhledem k širokým možnostem využití FRP kompozitů v různých aplikačních oblastech je k dispozici mnoho modifikací a druhů využívaných výztužných prvků. V následujícím textu jsou uvedeny pouze základní produkty pro vyztužování stavebních konstrukcí, a to jak pro stavby stávající, kde dochází k dodatečnému zesílení konstrukce, tak i pro prvky v novostavbách. [6]

### **2.2.1. Vnější FRP výztuž**

Vnější (externí) výztuže se využívají především pro dodatečné zesílení stávajících staveb, namáhané normálovými silami, ohybovými, respektive kroutícími momenty nebo kombinací těchto uvedených namáhání. Nejčastěji se využívají tahové výztuže v podobě FRP lamely, či výztužné FRP tkaniny. [6]

## Lamely

Výztužné FRP lamely se výhradně vyrábějí z uhlíkových vláken spojených epoxidovou pryskyřicí. Jednosměrně orientovaná vlákna obsažená v matrici zaujímají minimálně 70 % celkového objemu v celém kompozitu. Ve srovnání s ocelí je využití uhlíkových vláken praktičtější, jelikož polymerní kompozit má nízkou objemovou hmotnost ( $1650 \text{ kg/m}^3$ ), je lépe zpracovatelný a dosahuje vysokých tahových pevností srovnatelných s ocelí. Díky své vysoké pevnosti v tahu ve směru vláken a odolnosti vůči únavě se tyto lamely používají primárně pro dodatečné zesílení nosných konstrukcí staveb. Výhodou je dlouhá životnost a odolnost vůči povětrnostním vlivům a korozi. Lamely se k podkladu upevňují lepením, nejčastěji s pomocí epoxidové pryskyřice. [18]



Obrázek 5) Ukázka uhlíkových CFRP lamel (vlevo) a jejich využití způsobem povrchového zesilování stropní konstrukce (vpravo). [19; 20]

## Tkaniny

Ztužující FRP tkaniny jsou polotovary tvořené jednosměrně nebo obousměrně orientovanými monovláknny, jedná se tedy pouze o spletená vlákna bez polymerní matrice. Spojující matrice se vytváří během procesu upevňování tkaniny na ztužující prvek, kde se v průběhu lepení ztužující tkanina prosytí pryskyřicí, čímž dochází ke vnesení polymerní matrice do mezivláknového prostoru tkaniny. Nejčastější materiál FRP tkanin jsou uhlíková, skleněná, aramidová a čedičová vlákna aplikovaná za pomoci epoxidové pryskyřice.

Kromě výborných pevnostních charakteristik, snadného zpracování a manipulace má FRP tkanina výhodu použití u složitých tvarů konstrukce, kde lze výztužnou tkaninu přizpůsobit tvaru prvku. FRP tkanina je vhodná pro zesilování konstrukcí při zvýšeném zatížení v ohybu (stropní konstrukce), zatížení příčným tahem (hlavy a paty sloupů), zatížení smykem (podporové průřezy ohýbaných prvků) a při stříhovém zatížení. Výsledný povlak je tenký i při nanesení více vrstev tkaniny a umožňuje na svůj povrch

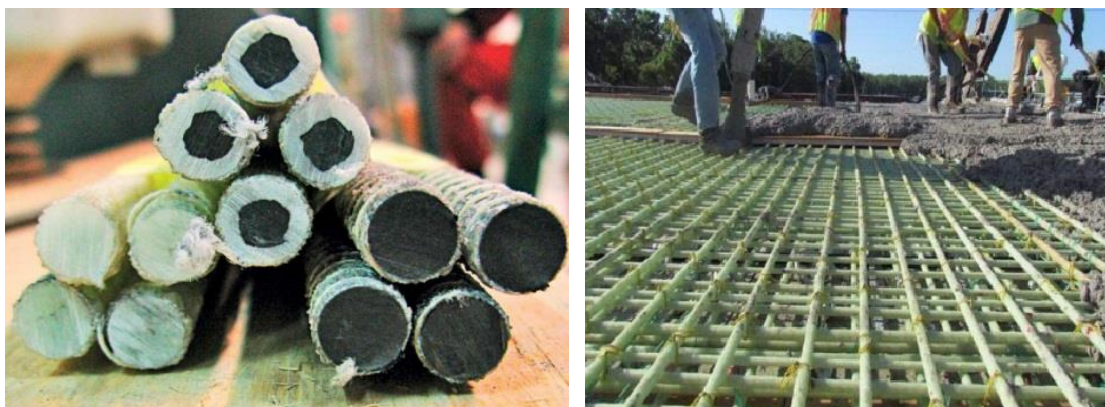
aplikaci polymerních nebo cementových vrstev, které plní funkci ochranného faktoru, či funkci estetickou. [18]



Obrázek 6) Ukázka uhlíkové CFRP tkaniny (vlevo) a její využití způsobem povrchového zesilování stropního trámu (vpravo). [21]

### 2.2.2. Vnitřní FRP výztuže

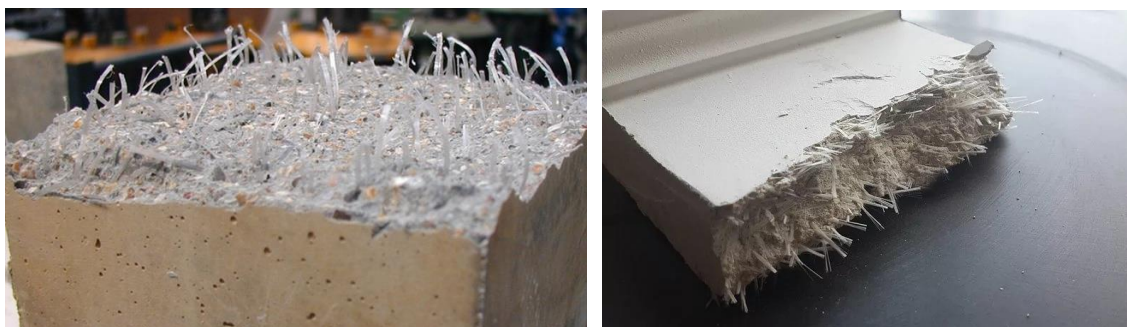
Pro vyztužení nových monolitických betonových konstrukcí se využívají právě vnitřní FRP kompozity, zpravidla ve formě výztužných tyčí na bázi jednosměrně orientovaných skleněných či uhlíkových vláken s polymerní matricí, nejčastěji typu epoxidové pryskyřice. Tato výztuž je vyráběna ve tvaru spirálovitě ovinuté tyče vlákny, často o rozměrech 5–18 mm, kde povrch výztuže je z důvodů lepší soudržnosti s betonem opatřen křemičitým pískem. Využívají se převážně ve značně environmentálně exponovaných prostředích, jako například v chemickém průmyslu, energetice (potrubní kanály, kolektory apod.) či v konstrukcích v trvalém kontaktu se zeminou, kanálech a sanitární infrastruktuře. [3; 6]



Obrázek 7) Ukázka skleněné, uhlíkové a kombinované FRP výztuže ve formě tyčí (vlevo) a jejich využití způsobem uložení do betonové směsi (vpravo). [3; 22]

## Rozptýlená výztuž

Rozptýlená výztuž uložená v nových betonových konstrukcích může nahrazovat klasické výztužné ocelové drátky. Výztužná vlákna v betonu zachycují převážně tahová namáhání a brání vzniku mikrotrhlin způsobené smršťováním ztuhlého betonu a rozvoji tahových trhlin v konstrukci. Vlákna obsažená v betonové směsi vytváří houževnaté vlastnosti zatvrdlého betonu a činí ho méně křehkým. Při překročení tahové pevnosti betonového dílce umožňují polymerní vlákna betonu se deformovat a převzít tahová namáhání i po vzniku trhlin ve struktuře dílce. Nejčastěji se jedná o FRP vlákna skleněná, polypropylenová, polyamidová, uhlíková, polyetylenová a další. Jsou to krátká, oddělená a nespojitá vlákna s náhodnou orientací rozptýlená po celém objemu betonového dílce. Z hlediska kritéria karcinogenity pro vlákna musí být průměr vláken větší než 3  $\mu\text{m}$ . [6; 18]



Obrázek 8) Ukázka skleněných FRP vláken rozptýlených v betonových prvcích. [23]

## Kompozitní předpínací lana

Pro vyztužení prvku vnesením předpětí do konstrukce se využívají FRP kompozity ve formě tyčí, vícedrátových (*multi-strand*) lan, případně i lamel na bázi uhlíkových, aramidových a skelněných vláken. Do FRP výztuže se pomocí hydraulického zařízení vnáší tahové napětí, vytvářející významné tlakové napětí ve spodní části prvku. Vlivem vnějšího zatížení dochází v zesíleném nosníku k tahovým napětím, které je ovšem v rozporu s tlakovým napětím, čímž dochází ke zvýšení ohybové pevnosti nosníku. [6; 24]



*Obrázek 9) Ukázka způsobu vyztužení předpětím betonových dílců pomocí interně uložených lan (vlevo) a externě přiložených uhlíkových lamel (vpravo). [25; 26]*

### 3. Způsoby zesilování dřevěných prvků pomocí FRP výztuží

V moderním stavitelství je již nedílnou součástí možnost dodatečného zesilování stavebních konstrukcí za pomoci externě uložených polymerních FRP výztuží. Tento typ výztuže je primárně využíván při provádění rekonstrukcí a sanací u betonových, zděných, dřevěných i ocelových stávajících konstrukcí, a to za účelem jejich dodatečného zvýšení únosnosti (zatížitelnosti) a stability. Pro restaurování dřevěných konstrukcí existuje mnoho různých metod oprav. Systém vyztužení závisí na způsobu poškození rekonstruovaného prvku, od kterého se následně odvíjí vybraná metoda způsobu zesílení. Nejčastěji používanými metodami dodatečného vyztužování je aplikování externí lepené FRP výztuže na povrch vyztužované konstrukce (*EBR „Externally Bonded Reinforcement“*) nebo jejím vložením do vytvořených drážek (*NSM „Near Surface Mounted“*), často s epoxidovou pryskyřicí sloužící jako pojivo. Možnosti využití kompozitních FRP výztuží jsou velmi rozsáhlé především díky různým variantám a typům těchto výztuží. FRP výztuže ve formě tyčí nebo lamel mohou být použity například u vyztužování trámů a desek, kde se docílí navýšení ohybových pevností, či při aplikaci na boční strany trámů, kde zvyšují odolnost ve smyku. Obalení prvku FRP tkaninou dochází u sloupů k zajištění ztužení a zvýšení únosnosti v prostém tlaku. Kompozitní FRP výztuže mohou nahrazovat běžné ocelové výztuže a oproti standardním metodám zesilování mají řadu výhod. Hlavními přednostmi kompozitních FRP výztuží je vysoká pevnost v tahu, nízká hmotnost, odolnost vůči vlhkosti a odolnost vůči elektrickému a magnetickému poli. [27; 28]

Oblast použití FRP kompozitních výztuží může zahrnovat:

- opravu návrhových či konstrukčních poruch a nedostatků;
- zesilování z důvodů změny působícího zatížení;
- omezení vlivu seismického namáhání;
- vyztužování lícních stran desek či trámů z důvodu zvýšení pevnost v ohybu;
- obalování sloupů tkaninami pro zajištění stability a zvýšené průtažnosti;
- zesilování stěn proti účinkům větru, seismiky apod.;
- zesilování nádrží, sil a potrubí z vnější strany z důvodu zajištění vyšší odolnosti vůči působícím tlakům apod. [27]

### **3.1. Zesilování prvků externě lepenou FRP výztuží**

Vzhledem k nízkým objemovým hmotnostem a malým rozměrům těchto výztuží je způsob aplikace vnějšího zesilování prvků velice rychlá a snadná. U všech materiálových typů konstrukcí je metoda aplikace téměř stejná, jelikož v závislosti na typu materiálu není zapotřebí speciálních úprav povrchů vyztužovaných prvků. Ve všech případech externího vlepení je nutné ošetření povrchu plochy prvku, kde má být výztuž uložena. Je zapotřebí docílit celistvého a zpevněného rovného povrchu bez vad a obsahu nečistot ve formě prachu, mastnot, volných částic či vlhkosti, které by mohly způsobit nedostatečnou adhezi lepidla k povrchu ztužujícího prvku. Povrch konstrukce je často obrušován či jiným způsobem zbaven vrstvy, která by mohla snižovat účinek zesílení či přilnavosti lepidla. Nejčastěji používaným typem lepidla je epoxidová pryskyřice, která má vysokou přilnavost k širokému množství různých materiálů. Proces vlepení se provádí v suchém prostředí při teplotě kolem 20 ° C, kde rozmezí teplot udává pracovní teplota polymerního lepidla. [18]

#### **3.1.1. Lepená lamela**

Výhodou tohoto typu výztuže je především vysoká tahová pevnost při malém průřezu a nízké stavební výšce lamely. Formát lamely se často dodává o rozměrech 50 × 1,2 (1,4) mm nebo 30 × 1,0 mm o libovolné délce ve formě nekonečných pásů. Díky snadné manipulaci je možné FRP lamelu použít pro zesílení svislých ploch nebo na spodních stranách stropních konstrukcí. Výhodou je také možnost lamely mezi sebou překřížovat. Během aplikace ovšem nemohou být lamely ohýbány z důvodu mechanického rozrušení její struktury. [3]

Lamely jsou často opatřeny ochrannou fólií, která se v době aplikace odstraňuje. Na celistvý a očištěný povrch připravený pro aplikaci lamely je nanese pojivo o minimální tloušťce 1 mm. Lepidlem jsou zároveň vyplněny veškeré nerovnosti a póry v podkladu. Podobné množství lepidla se nanese i na lamelu, která se následně přiloží na povrch vyztužovaného dílce. Pomocí gumového válečku je lamela rovnoměrně přitlačena k povrchu a přebytečné vytlačené lepidlo se odstraní. Po zatuhnutí lepidla je možné celý systém překrýt maltou nebo opatřit nátěrem, což zabraňuje případné degradaci vlivem UV záření. [3]

Na Obrázek 10 jsou uvedené praktické příklady použití uhlíkových FRP lamel s možností aplikování ve vnitřním i vnějším prostředí. Aplikace lamel může být využita

pro zesílení ohybových pevností stropních i trámových konstrukcí, kde uložení FRP lamel na boční strany trámu dochází ke zvýšení smykových pevností. Obrázek dále znázorňuje i možnost křížení jednotlivých lamel, kde je docíleno obousměrného zesílení stropní desky. [27]



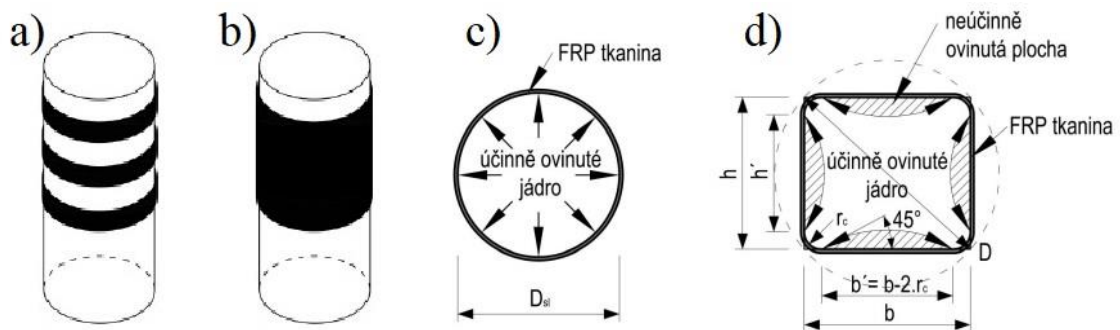
Obrázek 10) Ukázka způsobu dodatečného zesilování trámových a stropních konstrukcí pomocí uhlíkových CFRP lamel: a) + b) zesílení dřevěných trámových nosníků v ohybu, c) zvýšení ohybových a smykových pevností u železobetonového stropního nosníku, d) křížení CFRP lamel pro vyztužení stropní konstrukce. [29; 30]

### 3.1.2. Ovinutí tkaninou

FRP tkaniny se v oblasti sanace konstrukcí využívají především z důvodů jejich vysokých pevností v tahu, odolnosti vůči vlhkosti a velmi malým prostorovým nárokům. Konstrukce vyztužená FRP tkaninou si tedy ponechává téměř původní rozměry. Tento druh výztuže je ve formě polotovaru, tedy pouze jednosměrně či obousměrně propojená vlákna (více jak 98 % hm.) bez polymerní matrice. Matrice se vnáší do tkaniny během aplikace, kde lepidlo použité k upevnění tkaniny na povrch prvku zároveň prosycuje i strukturu tkaniny. Primárně se využívají pro zesílení převážně tlačných konstrukcí (sloupů), kde tkaniny zabraňují příčné deformaci prvku, což vede ke zvýšení jeho únosnosti. Dále se využívají například u dodatečného zesílení stropních trámů, kde

zvyšují ohybové a smykové pevnosti, či u aplikací složitějších tvarů a větších ploch potřebných k vyztužení.

Výsledný účinek zesílení je ovšem ovlivněn řadou faktorů. Z hlediska vyztužované konstrukce je důležitý tvar průřezu, rozměry, štíhlostní poměr a povrch prvku. V případě vyztužování betonových sloupů dochází vlivem rostoucího průměru a nepravidelného tvaru prvku (čtvercový průřez, obdélníkový průřez apod.) ke snížení účinnosti ovinutí FRP tkaninou. Pro efektivní účinek zesílení sloupů je tedy zapotřebí kruhový průřez menších rozměrů. Z hlediska výztužné tkaniny závisí účinek zesílení na modulu pružnosti tkaniny, orientaci vláken, počtu vrstev tkaniny a kvalitě provedení aplikace (viz Obrázek 11). [3; 6; 31]



Obrázek 11) Ukázka způsobů zesílení sloupů za pomoci FRP tkaniny a rozložení příčného napětí u sloupů různých průřezů: a) ovinutí jednosměrnou tkaninou, b) ovinutí obousměrnou tkaninou, c) kruhový průřez, d) rektangulární průřez. [31]

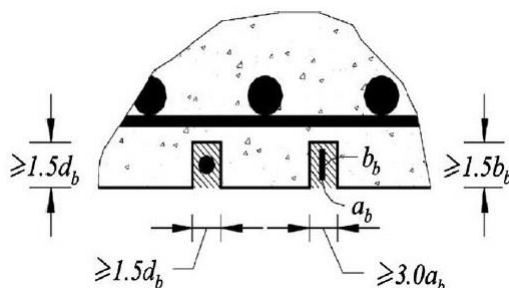
Stejně jako v případě FRP lamely je i u aplikace tkaniny zapotřebí povrch vyztužovaného prvku upravit natolik, aby bylo dosaženo rovného celistvého povrchu bez jakýchkoli faktorů ovlivňující přilnavost lepidla, a tedy soudržnosti celého FRP systému. Na připravený povrch se nanáší minimálně 1 mm vrstvy lepidla, do kterého je následně za pomoci gumového válečku tkanina rovnoměrně vtlačována. Množství lepidla musí být dostačující pro vyplnění nerovností a pórů povrchu, ale především také pro dostatečné smáčení vláken výztuže a prosycení tkaniny lepidlem. Důkladné prosycení tkaniny adhesivem je velice důležité. Špatné provedení vede k neefektivnímu účinku zpevňujících vlastností FRP tkaniny. Výhodou tkaniny je i možnost nanášení více vrstev výztuže. Po aplikaci výztužné tkaniny se zpravidla aplikuje ochranná vrstva (např. krycí vrstva betonu), která chrání výztuž pro dosažení požadované životnosti a trvanlivosti. [3; 31]



Obrázek 12) Ukázka způsobu vyztužení prvků aplikací FRP tkanin: a) + b) ovinutí betonového sloupu, c) vyztužení betonové stropní desky, d) zesílení betonových stropních trámů. [30; 32; 33]

### 3.2. Zesilování prvků FRP výztuží uloženou v drážce

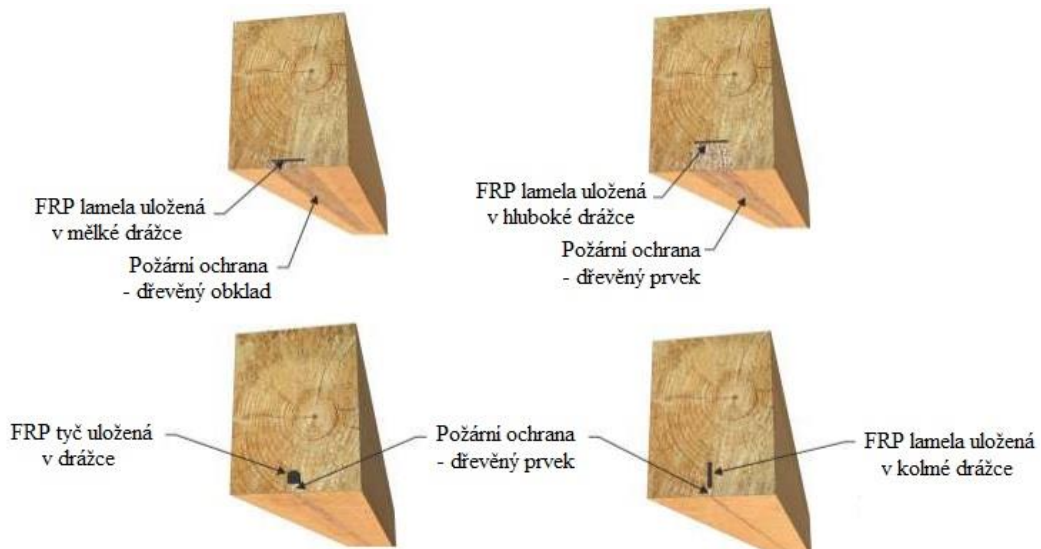
Tato metoda se nejčastěji uplatňuje u zesilování prvků z betonového a dřevěného materiálu, kde je FRP výztuž uložena do předem vytvořené drážky či vyvrtaných otvorů vyztužované konstrukce. Norma ACI 440.2 specifikuje a doporučuje rozměry drážek vzhledem k uložení tyčové nebo lamelové výztuže. V případě FRP tyče je stanovena hloubka a šířka drážky minimálně 1,5násobek průměru tyče. V případě FRP lamely jsou rozměry drážky stanoveny jako minimum 1,5násobku šířky  $\times$  3násobek tloušťky lamely, kde záleží na poloze uložení lamelové výztuže (viz obrázek níže). [34]



Obrázek 13) Schéma rozvržení rozměrů úložné drážky pro FRP výztuže u betonového prvku. [34]

Výztuže ve formě tyčí nebo lamel jsou umístěny do mechanicky vytvořených drážek/otvorů vyplněné cementovou zálivkou či lepidlem, často epoxidovou pryskyřicí, které vytváří pojivý element a úložné prostředí výztuže. Po zatvrdnutí cementové/polymerní matrice je zpravidla celý lepený systém v drážce opatřen ochranou

vrstvou. Tato vrstva bývá v případě zesilovaného betonového prvku na bázi cementu či sádky a u dřevěných konstrukcí ve formě dřevěného obkladu. Ochranná vrstva brání FRP systém před účinkem zvýšených teplot při požáru, proti UV záření a mechanického poškození, ale také plní funkci estetickou. Takto vyztužený dílec může nabývat na ohybových, tahových i smykových pevností. [35]



Obrázek 14) Příklady způsobu uložení FRP výztuží ve formě tyčí nebo lamel do drážek s polymerním pojivem. [35]

Vzhledem k různým požadavkům na zesílení a širokým možnostem porušení existuje u dřevěných konstrukcí i velké množství způsobů oprav. Níže uvedený obrázek představuje několik dalších častých způsobů sanace dřevěných trámů, kde je nové dřevo nadstaveno a různými technikami spojeno se stávající částí dřevěné konstrukce.



Obrázek 15) Způsoby propojení nového a stávajícího dřevěného prvku pomocí FRP výztuží: a) vnitřní vyztužení dřevěného nosníku, b) vnější vyztužení trámu s přímým spojem, c) vnější vyztužení zhlaví nosníku se zešíkmeným spojem. [36; 37]

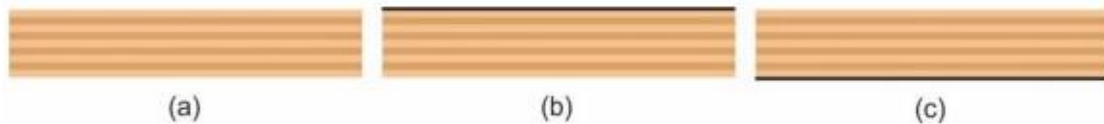
## **4. Rešeršní analýza experimentálních studií k pevnostním parametrům systému FRP/dřevo**

Ve stavebnictví je vždy důležitou otázkou konstrukce dřevěného kompozitu s vysokou pevností a odolností. Významné pokroky v oblasti polymerů vyztužených vlákny motivovaly řadu výzkumníků k hodnocení proveditelnosti výroby kompozitů vyztuženého dřeva s vysoce výkonnými syntetickými polymerními vlákny. V prvních aplikacích vyztužování dřevěných prvků byla používána skleněná vlákna, kterým později konkurovala uhlíková, čedičová a aramidová vlákna. Byla provedena řada studií zabývajících se použitím těchto materiálů, které v některých případech i nakonec vyústily v běžné vyztužování dřeva a dřevěných kompozitů. [38; 39]

### **4.1. Zesilující účinek čedičových vláken s ohledem na umístění výztuže**

Čedičová vlákna jsou v rámci dodatečného zpevnování dřevěných konstrukcí široce využívána. Pevnostními parametry téměř dosahují srovnání s nejvíce používanými uhlíkovými vlákny a svými vlastnostmi předčí i jiné často používané typy vláken jako jsou například vlákna skleněná. Plošná hmotnost čedičových vláken ( $2,7 \text{ g/m}^2$  až  $2,9 \text{ g/m}^2$ ) je srovnatelná s plošnou hmotností vláken skleněných ( $2,6 \text{ g/m}^2$ ). Modul pružnosti E–skleněných vláken je až 70 GPa, kdežto tuhost čedičových vláken dosahuje až 110 GPa. Lopresto a kol. [40] zjistili, že u polymerů vyztužených čedičovými vlákny je modul pružnosti v tahu navýšen přibližně až o 40 % než u polymerů se skleněnými vlákny. Liu a kol. [41] ovšem u skleněných a čedičových vláken nezjistili žádné významné rozdíly v mechanických vlastnostech. Kromě samotných vlastností závisí také na způsobu použití a aplikace těchto výztužných vláken. [42; 43]

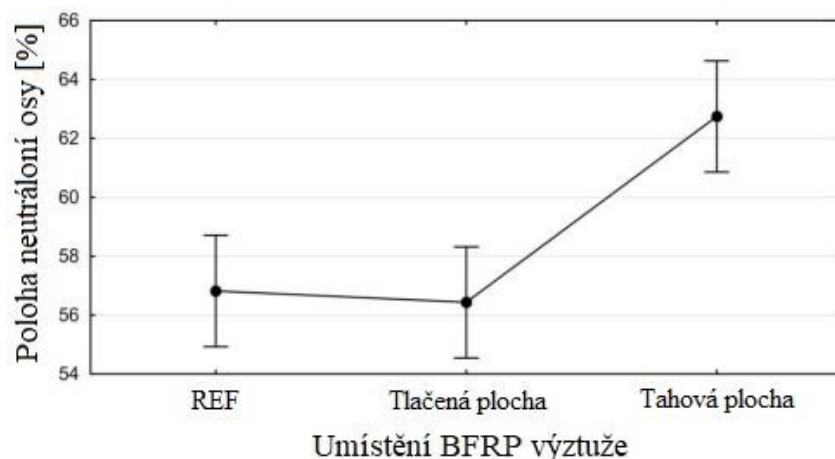
Studie [43] zabývajících se zesilujícími účinky čedičových vláken provedla experiment na bukové překlížované desce o tloušťce 21 mm, která byla externě zesílena čedičovými tkaninami o plošných hmotnostech 170; 210 a 340  $\text{g/m}^2$  spojené epoxidovým lepidlem. Zkoumán byl účinek tkaniny s ohledem na její plošnou hmotnost a polohu umístění v tlačené a tahové části překlížované desky při podélném i příčném směru dřevních vláken povrchových dých (viz Obrázek 16). Cílem tohoto umístění tkaniny bylo odděleně určit účinky zpevnění na tlačené a tažené straně vyztuženého vzorku. Následně byla provedena zkouška 3–bodovým ohybovým zatížením. [43]



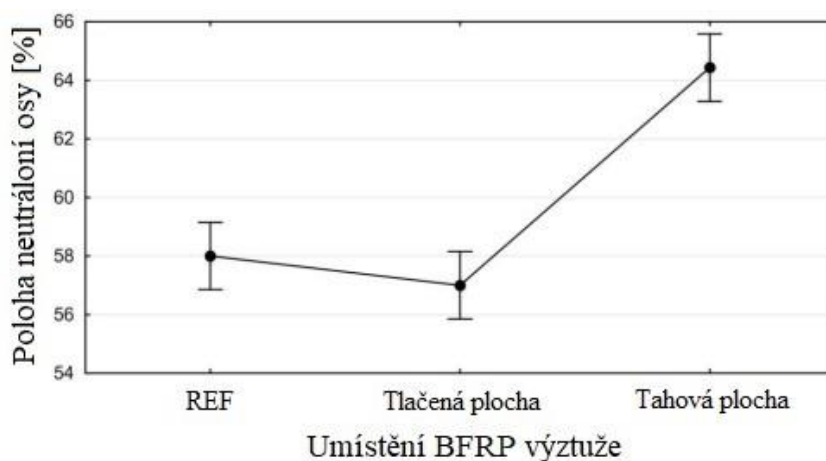
Obrázek 16) Umístění FRP výztuže: a) referenční nevyztužená buková překližovaná deska, b) BFRP na straně tlačené části desky, c) BFRP na straně tahové části desky. [43]

Výsledky ukázaly, že **vyšší plošné hmotnosti tkanin vedly k vyšším nárůstům ohybových pevností**. Nejefektivnějšího účinku použité čedičové výztuže bylo tedy dosaženo s nejvyšší plošnou hmotností  $340 \text{ g/m}^2$  umístěné v podélném směru dřevních vláken v tahové části nosného prvku, kde pevnost v ohybu byla navýšena o 15,7 %, zatímco vzorky vyztužené v tlačené části výrazných pevností nenabýly. Tkaniny s vyšší plošnou hmotností snížily modul pružnosti překližované desky vyztužené v tahu, ale v místě účinku tlaku nedošlo téměř k žádným tuhostním změnám. Většina vzorků s příčným směrem dřevních vláken s obsahem tkaniny  $340 \text{ g/m}^2$  umístěnou na tahovém místě těles selhala v důsledku delaminace, ovšem v podélném směru nedocházelo téměř k žádnému rozpojení a častěji docházelo k vyšším ohybovým pevnostem. Tento jev byl v jiné studii popsán jako prokluz výztuže kvůli rozdílům v pevnosti materiálu. [43]

Vyšší množství vláken výztuže také **kladně přispělo k pružnosti** překližované desky vyztužené na tahové straně vzorku. Stanovení těchto výsledků bylo podpořeno analýzou digitální korelace obrazu (DIC) posunutím neutrální osy. Neutrální osa je rozhraní mezi tlačnou a tahovou zónou v zatěžovaném předmětu, které při plastické deformaci anizotropního materiálu nezůstává v těžišti tělesa. [44] Čedičová BFRP **výztuž umístěná na tahové části vzorku výrazně posunula neutrální osu** směrem k tahové části tělesa a chránila tak překližovanou desku proti zlomení. Níže uvedené grafy představují posunutí neutrální osy v případě vyztužení v tlačené a tahové části vzorků při podélném a příčném směru dřevních vláken povrchové dýhy překližované desky. [43]

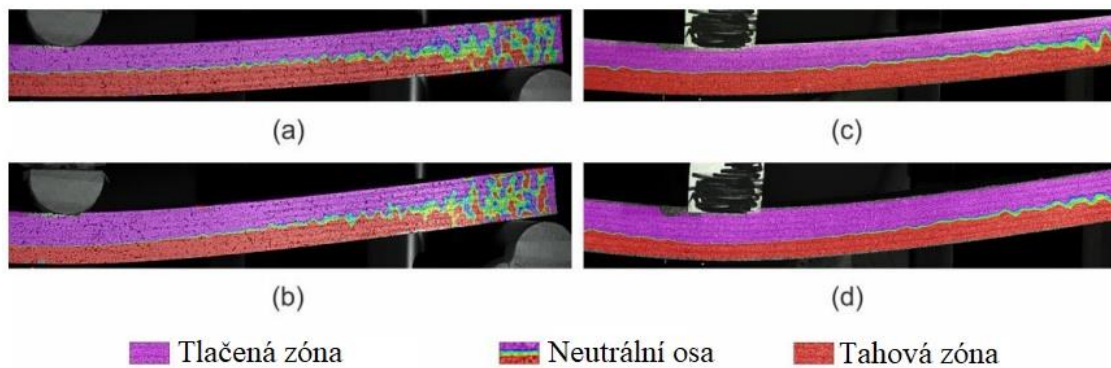


Graf 1) Změna polohy neutrální osy při maximálním zatížení u vzorků s podélným směrem dřevních vláken povrchové dýhy. [43]



Graf 2) Změna polohy neutrální osy při maximálním zatížení u vzorků s příčným směrem dřevních vláken povrchové dýhy. [43]

Výsledky ukazují **výraznější posunutí neutrální osy u vzorků vyztužené v tahové části těles**. Při porovnání orientace dřevních vláken dochází k vyššímu posunutí u příčného směru než u vzorků s dřevními vlákny v podélném směru. Na Obrázek 17 jsou uvedené snímky analýzy DIC znázorňující změny neutrální osy během ohybového namáhání. [43]

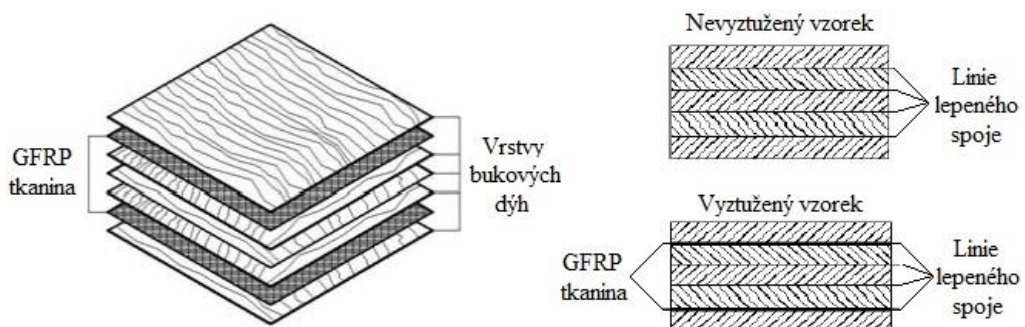


Obrázek 17) Ukázka změn poloh neutrálních os u vzorků s odlišným umístěním vyztužující BFRP tkaniny v tlačené/tahové části a jinou orientací dřevních vláken. [43]

V rámci uložení zesilující výztuže obecně platí, že výztuž umístěná v blízkosti neutrální osy nijak nepřispívá ke zvýšení ohybových pevností. Pro efektivní účinek zesílení se doporučuje co nejzevnější umístění výztuže. [45] Čedič v kombinaci se dřevem není ještě dobře prozkoumán, ovšem díky jeho recyklovatelnosti, nízké ceně, dobrým mechanickým vlastnostem a snadnější výrobě, než u klasických skleněných vláken činí jeho využití v zesilování konstrukcí zajímavým jako materiál nové generace. [46]

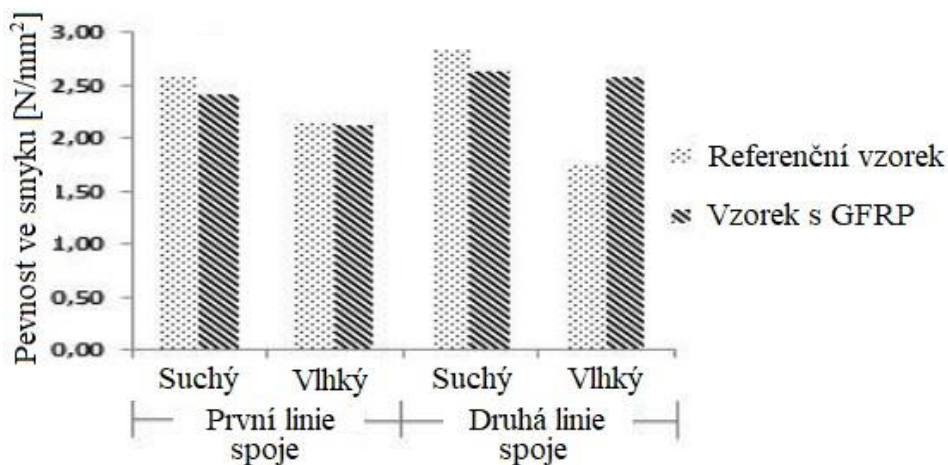
#### 4.2. Vliv zesílení FRP vlákný na smykové pevnosti překližované desky

Studie zabývající se tímto tématem [39] provedla experiment na bukové překližované desce vyztužené E–skleněnou tkaninou. Překližovaná deska byla tvořena pěti jednotlivě spojenými vrstvami dýh bukového dřeva o tloušťce 1,5 mm, mezi které byla vložena skleněná tkanina a umístěna vždy ve spodní části povrchové vrstvy překližované desky a spojena močovino–formaldehydovým pryskyřičným lepidlem (viz Obrázek 18). [39]



Obrázek 18) Rozložení lepených bukových dýh a skleněné vyztužné tkaniny (vlevo) a vazebné linie referenčních nevyztužených a vyztužených vzorků (vpravo). [39]

Zkoušky pevnosti ve smyku byly provedeny na linii prvního a druhého lepeného spoje u referenčních nevyztužených a tkaninou vyztužených vzorků dle TS EN 314–1 (ČSN EN 314–1), a to v suchém a mokřém stavu – uložení těles na 24 hodin ve vodním prostředí. Cílem bylo stanovit efekt výztužného komponentu na smykové pevnosti těles a určit kvalitu spojení těchto systémů. [39]



Graf 3) Grafické vyhodnocení výsledků smykových pevností vztažené na různé varianty vzorků. [39]

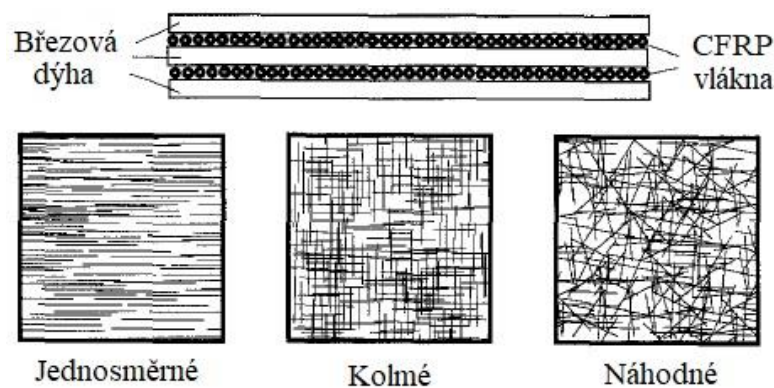
Výsledky ukázaly **vyšší pevnosti ve smyku u vzorků v suchém stavu** než u těles ponořené ve vodě, kde nejvyšších hodnot pevností nabyly referenční vzorky zkoušené v druhé lepené linii. Přítomnost výztuže téměř ve všech případech snížila pevnost překližované desky ve smyku (o 2,3 % až 8 %) v první i ve druhé lepené linii, tedy nejvyšších hodnot dosáhly referenční vzorky. Ovšem v případě druhé lepené linie u mokřých těles došlo k výraznému navýšení pevností u těles vyztužené tkaninou (až o 45 %) z důvodu zabránění přenosu vody do vnitřní vrstvy překližované desky. Z celkových závěrů byl zjištěn **nedostatečný vliv skleněné výztužné tkaniny na smykové pevnosti** vzorků. Vzorky umístěné ve vodním prostředí dosahují nízkých pevností z důvodu vlivu vody na adhezní vlastnosti lepidla. Vzhledem k typu porušení těles docházelo více ke koheznímu porušení v dřevní části vzorku u těles referenčních; u vzorků s GFRP tkaninou docházelo především k adheznímu porušení v místě uložené výztuže, což značí o snížené přilnavosti lepených vrstev bukových dýh. Autoři této práce dále usoudili, že pro dosažení zvýšených pevností je nutné použití tužšího lepidla než močovino–formaldehyd, jako je resorcin–formaldehyd, epoxidové lepidlo nebo izokyanátové lepidlo. [39; 47]

Ross a kol. [48] vystavil tahovému namáhání vzorky dřeva vyztužené pomocí skelných vláken, kde se jednotlivé vzorky lišily počtem vrstev přidané výztuže. Bylo

zjištěno, že pevnost spoje a tažnost se zvyšují se zvyšujícím se počtem vrstev výztuže. U vzorků s třívrstevným vyztužením spoje bylo tedy dosaženo o 33 % vyšších pevností než u nevyztuženého vzorku. Tento jev značí vysoký efekt vyztužení prvku s více vrstvy polymerních vláken. [48]

### 4.3. Vliv délky a orientace výztužných vláken na elasticitu překližované desky

Xu a kol. [38] zkoumali vliv krátkých uhlíkových vláken uložených v různých orientacích v lepených vrstvách březové dýhy. Zkoumán byl účinek délky a orientace vláken na elasticitu vytvořené překližované desky, tedy na modul pružnosti v tahu a modul pružnosti ve smyku. Vzorky se skládaly ze tří vrstev paralelně uložených březových dýh, které byly proloženy vrstvami uhlíkových vláken a spojené fenol–resorcin formaldehydovou pryskyřicí (viz Obrázek 19). [38]



Obrázek 19) Uspořádání systému CFRP/dýha (nahore) a orientace uložených krátkých uhlíkových vláken. [38]

Nasekaná uhlíková vlákna o délkách 3, 6 a 14 mm byla uložena o jednotné délce v jedné lepené vrstvě, a to o objemu 50 % lepené vrstvy. V experimentu byla vlákna umístěna ve třech způsobem – jednosměrně, kolmo na sebe a při náhodné orientaci, kde následně byla vystavena ohybovému a tahovému namáhání. V systému vyztužení krátkými vlákny (podle Coxovy teorie) délka vlákna přímo neovlivňuje vyztužení, pokud je jeho délka dostatečně dlouhá. Ovšem v případě, kdyby délka vlákna byla příliš dlouhá, docházelo by ke zmenšení zesilovacího účinku, který by byl menší než v případě kratších vláken. Důvodem snížených pevností je vytvoření můstku mezi vlákny a nárůstu otvorů v lepeném systému. Je tedy zapotřebí zvážit optimální délku vlákna. [38]

Z výsledků je tato teorie potvrzena. V experimentu docházelo u všech délek vláken delších než 3 mm k vysokým výsledkům zesílení. Tedy v této studii lze přímý **vliv délky vláken na vyztužení zanedbat, pokud ovšem jsou vlákna delší než 3 mm**. Pokud by vlákno dosahovalo větších délek, mohly by se při reálné aplikaci projevit vážné negativní efekty.

Dále bylo prokázáno, že **orientace vláken má výrazný vliv** na vyztužení. Ve studii jednosměrná, kolmá a náhodná orientace vykazovala různé účinky na elasticitu překližované desky. Překližka vyztužená **nahodile orientovanými vlákny vykazovala nejvýraznější zlepšení mechanických vlastností** zkoušených těles, tedy modulu pružnosti v tahu a ve smyku. [38]

## 5. Cíl práce

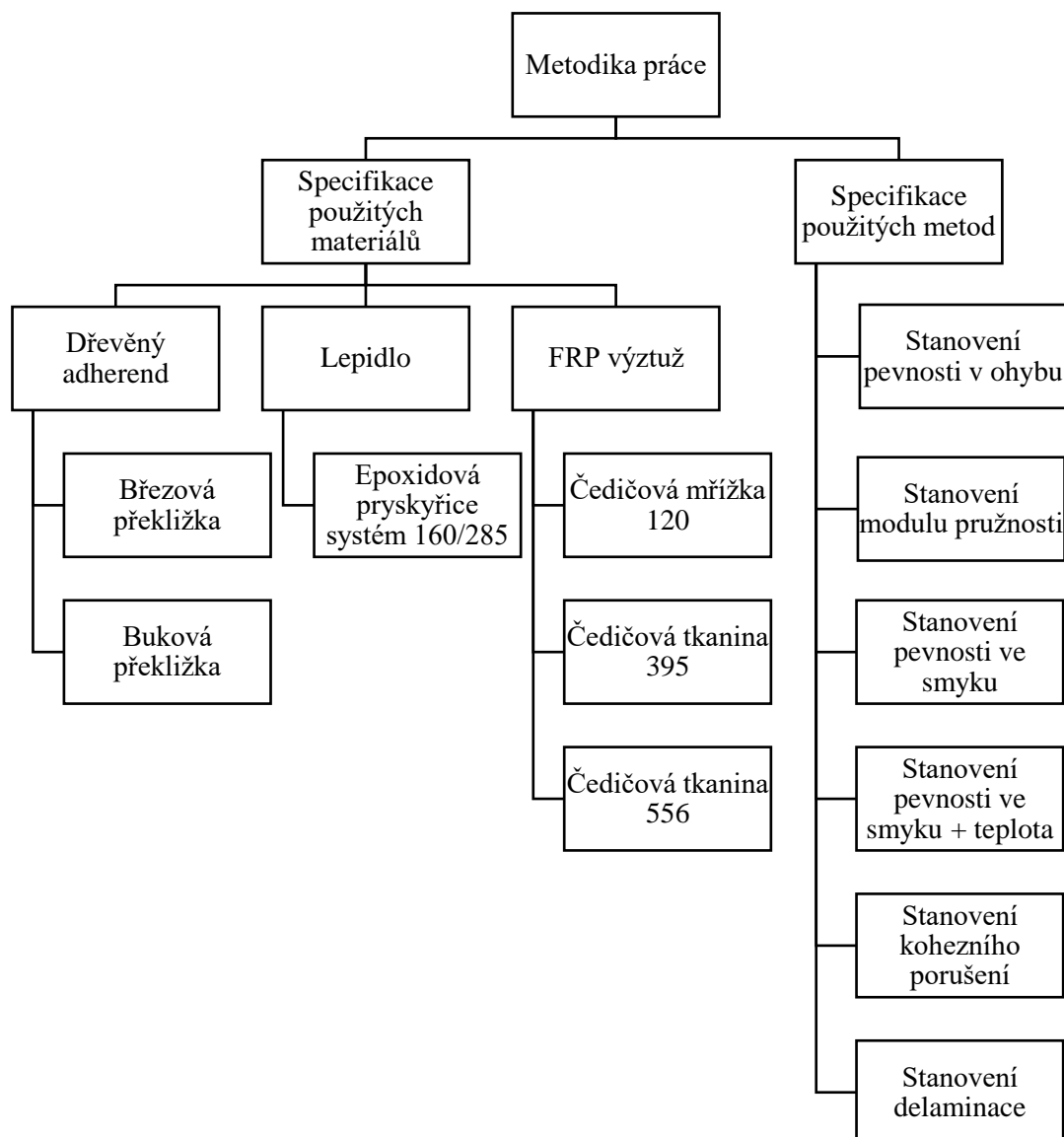
Hlavní náplní praktické části této diplomové práce bylo posouzení vlivu čedičové BFRP tkaniny na únosnost a odolnost vyztužených dřevěných kompozitů. V teoretické části práce byl proveden průzkum dostupných materiálových bází FRP materiálů a způsob jejich aplikace pro zesilování betonových a dřevěných konstrukcí. V teoretické části byl dále proveden rešeršní průzkum studií zabývajících se mechanickými vlastnostmi systémů FRP/dřevo, a to při různém mechanickém namáhání.

V experimentální části práce byl posuzován vliv použitého typu čedičové BFRP tkaniny na odolnost zesíleného systému vůči mechanickému zatěžování vyjádřený pevnostními parametry ohybových a smykových pevností. Čedičová tkanina se lišila různou plošnou hmotností. V rámci experimentu byl dále porovnáván vliv množství vrstev tkaniny, její orientace vůči působícímu zatížení, vliv umístění zkoušené smykové plochy a vliv použitého druhu dřeviny překližované desky. Dále bylo zkoumáno kohezní porušení ve dřevě a kvalita lepení systému BFRP při účinku zvýšené teploty a stanovení delaminace lepeného systému.

Výsledkem experimentu je vyhodnocení pevnostní odolnosti použitého typu čedičové tkaniny v systému BFRP/dřevěná překližovaná deska vůči mechanickému namáhání, kde se předpokládá rozšíření znalostí v oblasti dodatečného vyztužení pomocí čedičové tkaniny.

## 6. Metodika práce

Metodický postup prací je uveden níže v tabulkovém schéma, kde jsou blíže specifikovány použité materiály, typ vyztužení, orientace BFRP vyztužení a normativní postupy pro ověření základních fyzikálně mechanických parametrů vyvijeného kompozitu.



### 6.1. Specifikace použitých materiálů

#### 6.1.1. Dřevěný adherend

Pro výrobu zkušebních vzorků byly použity překližované desky z březového a bukového dřeva. Použití překližek je vhodné zejména díky jejich vynikajícím

vlastnostem, jako je například vysoká pevnost, houževnatost a pružnost za nízkých objemových hmotností. [49]

### **Březová překližovaná deska**

Byla vybrána 7-vrstvá překližovaná deska, kdy jednotlivé vrstvy dýh byly navzájem na sebe orientovány o 90° a které byly dle výrobce různé kvality, překližovaná deska byla lepena fenol-formaldehydovou pryskyřicí. Povrchové dýhy jsou vždy rovnoběžné ve směru vláken a orientované v podélném směru překližované desky. Překližovaná deska byla dodána o formátu 2500 × 1250 × 9 mm s jakostí CP/CP (deska s vyspravenou plochou) a třídou lepení 3, což zajišťuje použití jako konstrukční prvek do vlhkého prostředí (v exteriéru). [50; 51]

### **Buková překližovaná deska**

Byla vybrána 5-vrstvá překližovaná deska, kdy jednotlivé dýhy byly lepené močovino-formaldehydovým lepidlem s kvalitou lepení třídy 3. Směr dřevních vláken je u každé vedlejší dýhy na sebe kolmý a povrchové dýhy orientované v podélném směru desky jsou vždy rovnoběžné. Překližovaná deska byla dodána o formátu 2500 × 1250 × 9 mm s jakostí D/D, tedy plocha většinou nevyspravená s možným obsahem otvorů po sucích, je vodovzdorná a určena pro použití v exteriéru jako nenosný prvek. Při zpracování materiálů pro výrobu vzorků byly defektní části desky vyřazeny. [49]

Tabulka 3) Specifikace použitých překližovaných desek z březového a bukového dřeva. [51; 49]

<b>Technické údaje překližovaných desek</b>		
<b>Typ překližky</b>	<b>Bříza</b>	<b>Buk</b>
<b>Tloušťka [mm]</b>	9	
<b>Počet vrstev dýh [ks]</b>	7	5
<b>Pevnost v ohybu <math>f_m</math> v podélném směru vláken [N/mm<sup>2</sup>]</b>	78,3	85,4
<b>Pevnost v ohybu <math>f_m</math> v příčném směru vláken [N/mm<sup>2</sup>]</b>	60,2	53,7
<b>Modul pružnosti <math>E_{m,g}</math> v podélném směru vláken [N/mm<sup>2</sup>]</b>	8 967	-
<b>Modul pružnosti <math>E_{m,g}</math> v příčném směru vláken [N/mm<sup>2</sup>]</b>	5 763	-
<b>Kvalita lepení - průměr smykové pevnosti <math>f_v</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	$f_v \geq 1,83$	$f_v \geq 1,0$
<b>Orientační objemová hmotnost <math>\rho</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	-	730

### 6.1.2. BFRP výztuž

Jako vyztužující prvek pro vytvoření kompozitu z překližovaných desek byly použity tři různé typy FRP tkanin s obsahem čedičových vláken. Tyto tkaniny se lišily plošnou hmotností a v jednom případě i typem orientace vláken. Čedičové tkaniny byly vybrány díky svým charakteristickým vlastnostem a schopností efektivního dodatečného vyztužení konstrukcí. Teplotní odolnost čedičových vláken je přibližně do 560 °C, ovšem odolávají i krátkodobé teplotní expozici do 700 °C. [52]

Tabulka 4) Specifické vlastnosti čedičového vlákna v použitých výztužných tkaninách. [53]

Vlastnosti čedičového vlákna	
Průměr fibril [ $\mu\text{m}$ ]	9 až 13
Počet fibril [ks]	144
Hustota (při 20 °C) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	2 900
Navlhavost [%]	0,5
Modul pružnosti v tahu [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	100 000
Pevnost v tahu [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	1 850 až 2 150
Pevnost v tlaku [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	300
Změna pevnosti v tahu při 400 °C [%]	82
Pracovní teplota [°C]	-200 až +700

#### a) Čedičová mřížka s plošnou hmotností 120 g/m<sup>2</sup>

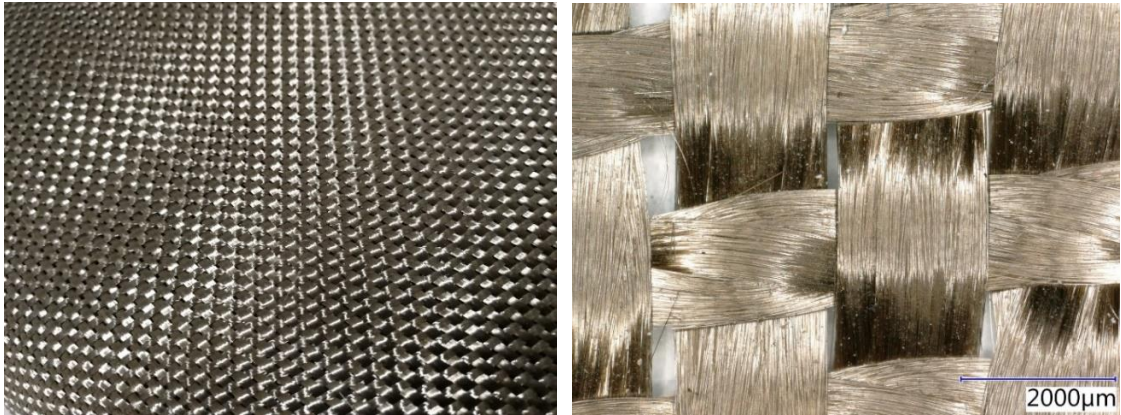
Tento typ tkaniny je tvořen jednosměrně uloženými čedičovými vlákny tvořící prameny, které jsou plátňovou vazbou propojeny s příčnými svazky vláken. Mezi jednotlivými prameny jsou patrné mezery (viz obrázek níže). Tkanina dle své hodnoty plošné hmotnosti bude pro účely práce označena jako čedičová mřížka 120 g/m<sup>2</sup>.



Obrázek 20) Čedičová mřížka s plošnou hmotností 120 g/m<sup>2</sup> (vlevo), zvětšena 20× (vpravo).

### b) Čedičová tkanina s plošnou hmotností 395 g/m<sup>2</sup>

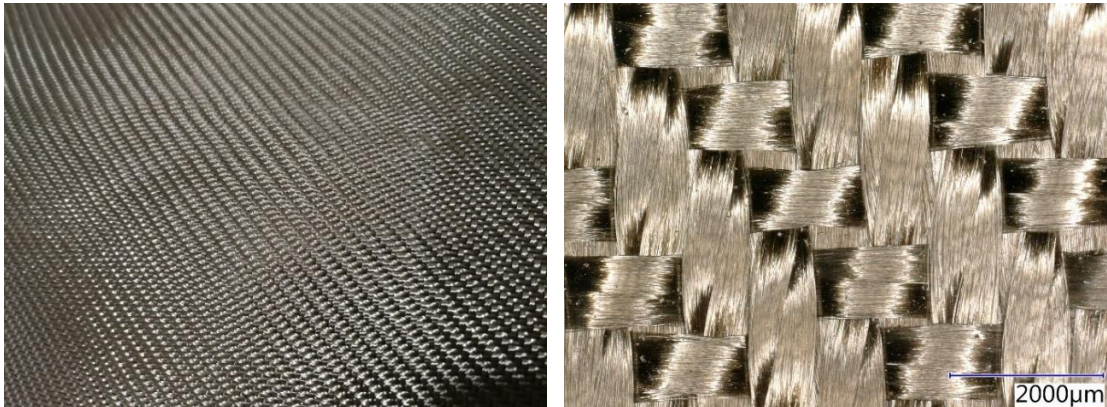
Tento typ čedičové tkaniny se od čedičové mřížky liší svou strukturou a plošnou hmotností. Prameny vláken jsou u této tkaniny spojeny plátnovou vazbou při obousměrné orientaci vláken v podélném i příčném směru. Na rozdíl od čedičové mřížky je tato tkanina tvárnější a lépe zpracovatelná.



Obrázek 21) Čedičová tkanina s plošnou hmotností 395 g/m<sup>2</sup> (vlevo), zvětšena 50× (vpravo).

### c) Čedičová tkanina s plošnou hmotností 556 g/m<sup>2</sup>

Podobné uspořádání vláken, jako v přechozím případě, má i tento typ tkaniny. Vlákna orientovaná v podélném i příčném směru jsou spojeny zesílenou keprovou vazbou, čímž tato tkanina získává větší plošnou hmotnost.



Obrázek 22) Čedičová tkanina s plošnou hmotností 556 g/m<sup>2</sup> (vlevo), zvětšena 50× (vpravo).

### 6.1.3. Lepidlo pro aplikaci kompozitního systému překližovaná deska/BFRP

Pro vytvoření dostatečně pevného spoje mezi překližovanými deskami a čedičovými tkaninami bylo vybráno dvousložkové epoxidové lepidlo s označením **LH 160** s tužidlem **H 285** (výrobce HAVEL). Toto nízkoviskózní lepidlo se vyznačuje dobrými

statickými a dynamickými vlastnostmi, průtažností (4 – 7 %) a výbornou přilnavostí k různým povrchům, jako je kov, dřevo, sklo, beton a některé druhy plastů. [54]

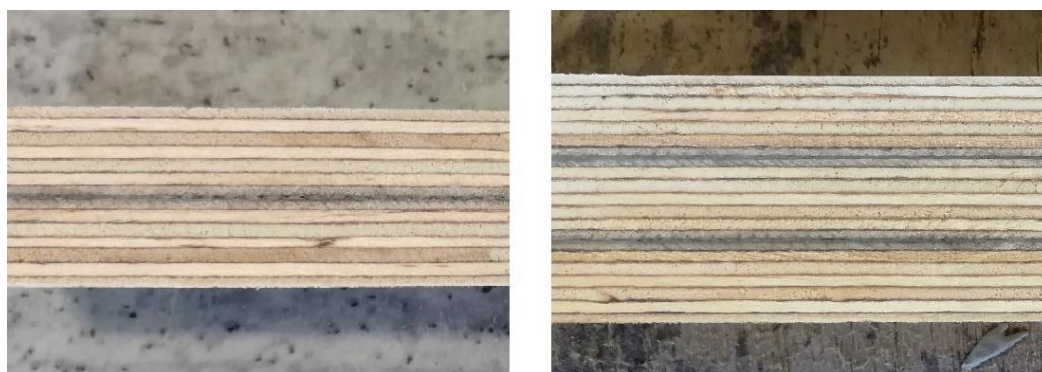
Tabulka 5) Technické údaje epoxidového lepidla systém 160/285 (HAVEL). [54]

Technické údaje epoxidového lepidla systém 160/285 (HAVEL)		
Produkt	LH 160	H 285
		epoxidová pryskyřice
Pevnostní stav	kapalný	kapalný
Průměrná hodnota epoxidu	0,56	-
Průměrná hodnota aminu	-	64
Vytvrzování	10 - 30 °C	
Viskozita při 25 °C [mPa.s]	700 - 900	50 - 100
Hustota při 25 °C [g/cm <sup>3</sup> ]	1,13 - 1,17	0,94 - 0,97
Mísící poměr s tvrdidlem	hmotnostně 100 : 40 (±2)	
Teplotní odolnost [°C]	-60 až 60	až do 100 °C

#### 6.1.4. Příprava zkušebních těles

V první řadě bylo zapotřebí navrhnout strukturu a rozměry zkušebních těles. Ze statického hlediska pro porovnání vlivu vodorovné a svislé orientace lepené spáry tedy vzorky nabyly tvaru čtvercových hranolů, a to ve dvou variantách:

- první variantu vzorků tvořily slepence dvou překližovaných desek, mezi které byla aplikována jedna vrstva BFRP tkaniny, příčné rozměry vzorků 18 × 18 mm;
- druhá varianta byla tvořena slepenci ze tří překližovaných desek, mezi které se aplikovaly dvě vrstvy BFRP tkanin, příčné rozměry vzorků 27 × 27 mm (viz obrázek níže).

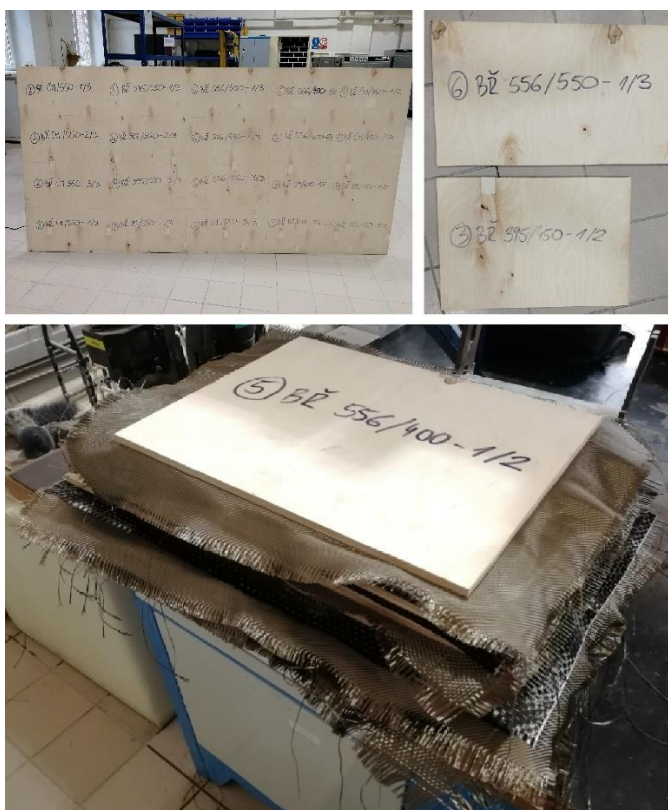


Obrázek 23) Ukázka navrženého uspořádání překližované desky a BFRP tkaniny – 1 × BFRP (vlevo), 2 × BFRP (vpravo).

Pro výrobu zkušebních těles byly tedy vytvořeny kombinace kompozitních systémů z březových i bukových překližovaných desek vyztužených čedičovými tkaninami o plošné hmotnosti 120 g/m<sup>2</sup>, 395 g/m<sup>2</sup> a 556 g/m<sup>2</sup>. Za referenční vzorek byl vytvořen kompozitní nevyztužený systém sestávající se ze dvou, resp. tří překližovaných desek. Pro dostatečně pevný spoj překližovaných desek a BFRP tkanin se použilo epoxidové lepidlo.

### **Lepení vzorků:**

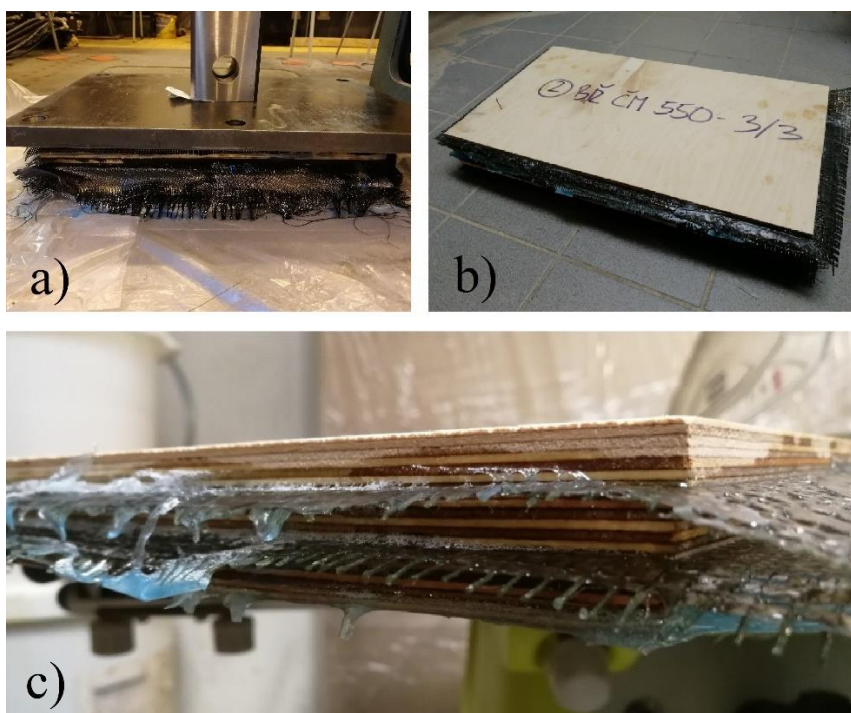
Pro efektivnější výrobu vzorků bylo zapotřebí nejdříve překližované desky naformátovat na rozměry odpovídající požadavkům normy, kdy délka vzorků je definována jako násobek tloušťky zkušebních těles. Délka vzorku korelovala s podélnou orientací dřevních vláken překližované desky. Jednotlivé zvolené BFRP výztuže se nastříhaly (s přesahem) na rozměry připravených naformátovaných desek (viz Obrázek 24). Podélný směr vláken byl orientován podle podélného směru dřevních vláken desky.



Obrázek 24) Ukázka formátování a přípravy na lepení překližovaných desek a BFRP tkanin.

Lepení desek s vkládanou tkaninou bylo provedeno při teplotě cca 20 °C, což odpovídalo teplotě pro vytvrzování lepidla, kterou uvádí výrobce. Po důkladném smíchání obou složek epoxidové pryskyřice byl pro rovnoměrné nanášení a důkladné

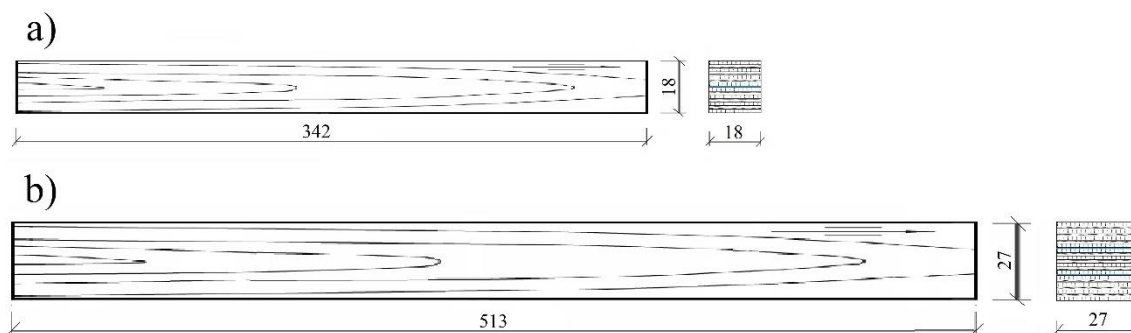
pokrytí ploch překližovaných desek a tkanin použit váleček. Během nanášení lepidla byl brán zřetel na dostatečnou vrstvu lepidla na plochách desek. Pro řádné slepení bylo lepidlo aplikováno i na tkaniny, aby došlo k jejich řádnému prosycení. Důvodem je dokonalé propojení jednotlivých komponentů adhesivem. Materiály opatřené lepidlem byly vrstveny na sebe a ponechány k vytvrzení pod lisovacím tlakem 0,9 MPa po dobu 8 hodin. Stanoveným lisovacím tlakem bylo dosaženo srovnání a plnoplošné slepení jednotlivých vrstev po výšce kompozitu, ale i k odstranění přebytečného množství lepidla ovlivňující vlastnosti výsledného lepeného kompozitního prvku.



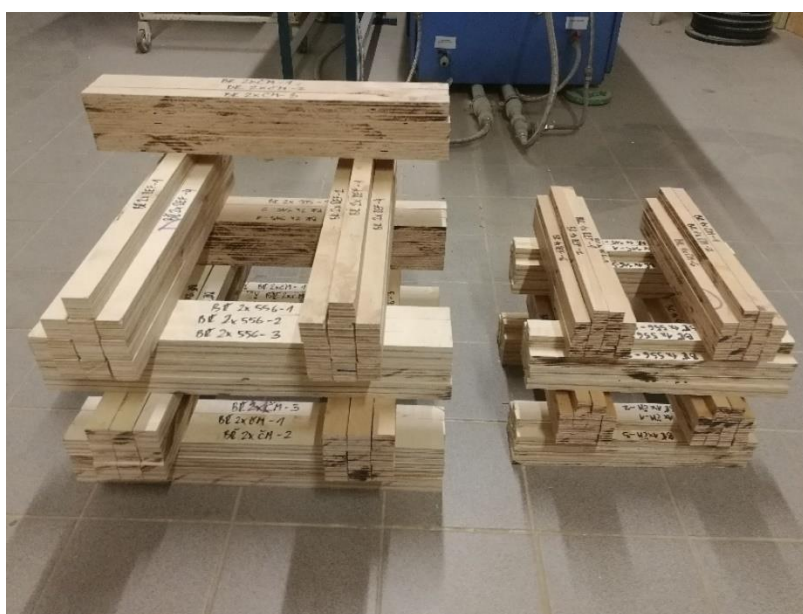
Obrázek 25) Ukázka způsobu lepení vzorků: a) lepení vzorků při působení lisovacího tlaku, b) výsledná vytvrzená deska s BFRP výztuží, c) boční pohled na jednotlivé lepené vrstvy systému dřevo/BFRP.

### **Výroba zkušebních vzorků:**

Po vytvrzení lepených desek došlo k finálnímu formátování zkušebních těles pomocí stolní kotoučové pily. Pro provedení zkoušky „Stanovení pevnosti v ohybu rovnoběžně s vlákny“ definuje norma ČSN EN 408+A1:2012 délku zkušebního vzorku jako 19násobek výšky průřezu. Březové i bukové překližované desky mají stejnou tloušťku 9 mm, tedy v případě první varianty vzorků s jednou vrstvou BFRP výztuže naformátované rozměry činí  $18 \times 18 \times 342$  mm; v případě druhé varianty se dvěma vrstvami výztuže jsou rozměry  $27 \times 27 \times 513$  mm (viz Obrázek 26 a Obrázek 27). [55]



Obrázek 26) Schématická ukázka těles vytvořených z březového dřeva se stanovenými rozměry a příčnými řezy: a) vzorek  $1 \times \text{BFRP}$ , b) vzorek  $2 \times \text{BFRP}$  (hodnoty uvedeny v mm). [56]



Obrázek 27) Připravená zkušební tělesa  $2 \times \text{BFRP}$  o rozměrech  $27 \times 27 \times 513$  mm (vlevo) a tělesa  $1 \times \text{BFRP}$  o rozměrech  $18 \times 18 \times 342$  mm (vpravo).

## 6.2. Specifikace použitých metod

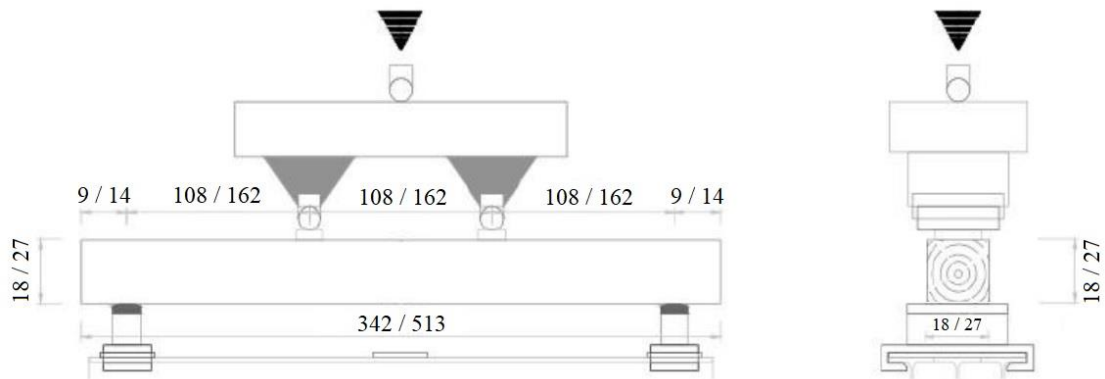
U zkušebních těles se následně provedly zkoušky:

- stanovení pevnosti v ohybu 4–bodovým zatížením;
- stanovení pevnosti ve smyku;
- ověření lepeného systému BFRP/překližovaná deska (pevnosti ve smyku za působení zvýšené teploty, stanovení delaminace lepených spár).

### 6.2.1. Stanovení pevnosti v ohybu a modulu pružnosti

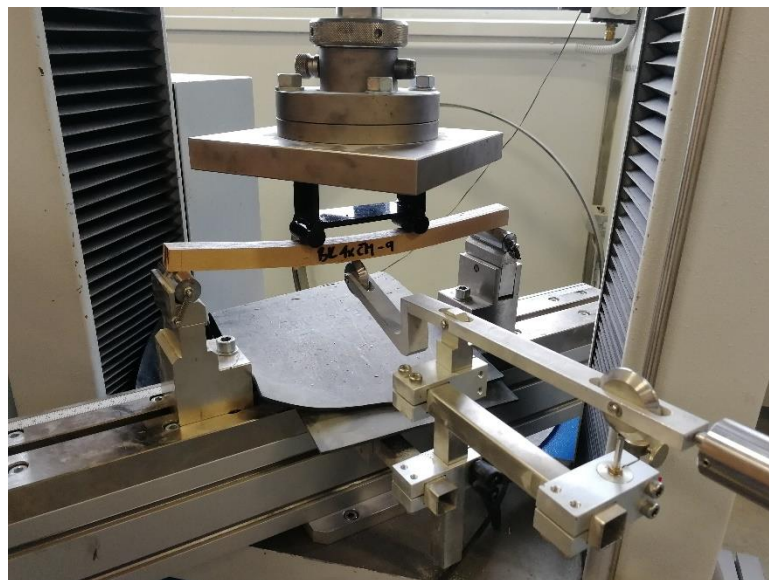
Stanovení pevnostních a tuhostních parametrů v ohybu bylo stanoveno dle normy ČSN EN 408+A1:2012, která uvádí rozměry i postup zkoušení zkušebních těles.

Zkušební vzorky jsou vystaveny ohybovému momentu od zatížení přenášeného zatěžovacími a podpěrnými válečky zkušebního přístroje. Během zkoušení je zaznamenáno nejvyšší dosažené zatížení. Na základě dosažené hodnoty byl proveden výpočet pevnosti v ohybu zkušebního tělesa a globální modul pružnosti. [55]



Obrázek 28) Grafická ukázka zatěžovacího přístroje pro stanovení pevnosti v ohybu za působení 4-bodového zatížení (hodnoty uvedeny v mm). [55]

Modul pružnosti se stanovil přepočtem naměřených hodnot za pomoci tenzometrického snímače měřící průhyb tělesa umístěného uprostřed zkoušeného vzorku v místě namáhaném ohybem (viz obrázek níže).



Obrázek 29) Zkouška pevnosti v ohybu za působení 4-bodového namáhání spolu se stanovením modulu pružnosti za pomoci tenzometrického snímače umístěný v místě namáhaném ohybem.

Měření bylo prováděno celkem na 128 zkušebních tělesech o rozměrech  $18 \times 18 \times 342$  mm a  $27 \times 27 \times 513$  mm (viz Tabulka 6). Zkoušené vzorky se lišily druhem

dřevěného adherendu (bříza, buk), typem a množstvím vrstev čedičové FRP výztuže a orientací lepené spáry při zatěžování. Lepená spára s výztuží byla během zkoušení orientována ve vodorovné nebo svislé poloze vůči směru zatěžování.

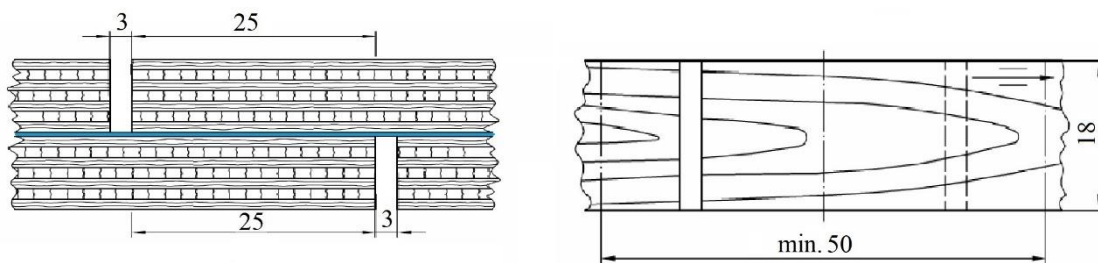


Obrázek 30) Ukázka porušení zkušebních těles po působení ohybového namáhání na vodorovnou (horní vzorky) a svislou orientaci lepené spáry (dolní vzorky).

### 6.2.2. Stanovení pevnosti ve smyku a podílu porušení ve dřevě

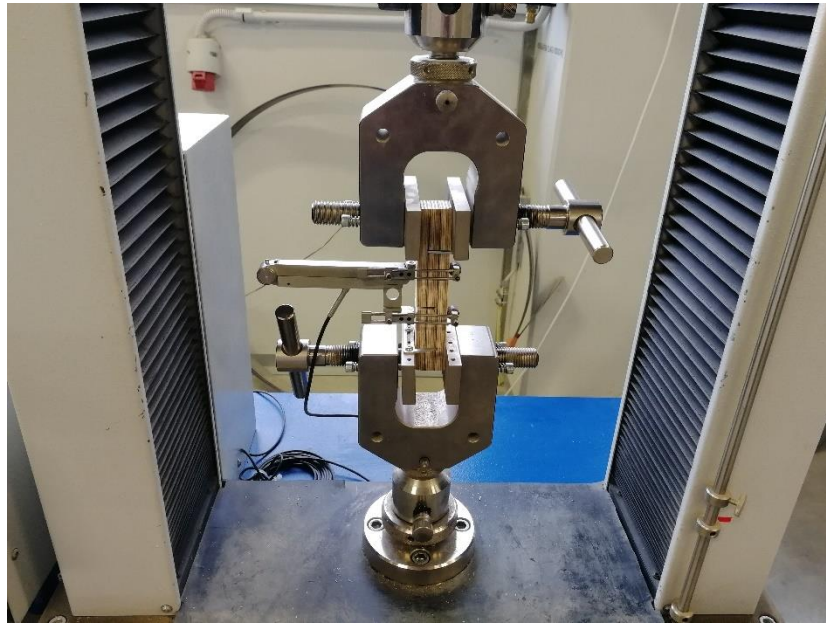
Metodu stanovení kvality lepených překližek smykovou zkouškou udává norma ČSN EN 314–1:2005. Norma uvádí tvar a rozměry vzorků, způsob jejich úpravy a metodu stanovení smykové pevnosti za účinku tahového namáhání.

Obrázek 31 znázorňuje úpravu zkušebních vzorků  $1 \times \text{BFRP}$  ( $18 \times 18 \text{ mm}$ ), které byly opatřeny drážkami ve vzdálenosti 25 mm, tedy délky smykové plochy. Šířka smykové plochy byla 18 mm a vzdálenost čelistí svírající zkušební vzorek je udávána normou o hodnotě minimálně 50 mm. Prořez pily musí být vždy proveden tak, aby řez končil ve zkoušené lepené spáře výztuže. [56]



Obrázek 31) Schématická ukázka úpravy vzorku  $1 \times \text{BFRP}$  pro smykovou zkoušku (hodnoty uvedeny v mm). [56]

Principem zkoušky je vystavení upraveného vzorku tahovému namáhání, kdy dochází ve zkoušené smykové ploše k rozrušení dřevěného materiálu či lepeného spoje. Výsledkem je tedy stanovení smykové pevnosti překližovaného kompozitu a podíl porušení dřevní části vzorku. [56]



*Obrázek 32) Zkušební vzorek upnutý v rýhovaných čelistech tahového zkušebního stroje s připevněným extenzometrem MFA2.*

Pro stanovení smykových pevností bylo použito celkem 88 vzorků o délce 150 mm a stejnou materiálovou skladbou jako v předchozím měření. Na vzorcích 1× BFRP byla zkoušena smyková plocha **ve výztuži**, u vzorků 2× BFRP **ve výztuži a v překližovaném dřevě** (viz Obrázek 33).



Obrázek 33) Úprava zkušebních těles: a) vzorek 1× BFRP se smykovou plochou ve výztuži, b) vzorek 2× BFRP se smykovou plochou ve výztuži, c) vzorek 2× BFRP se smykovou plochou v překližované části tělesa.

Po smykové zkoušce proběhlo vizuální stanovení kohezního porušení dřevní části překližované desky. Na každém vzorku po provedené zkoušce bylo provedeno posouzení procentuálního podílu kohezního porušení dřevní části a porušení lepeného spoje překližované desky (odhad na 5 %). Výsledek je udáván jako procentuální porušení dřevní části vzorku v rozmezí 0 % až 100 % (viz obrázek níže).



Obrázek 34) Ukázka porušení tělesa (1× 556 buk) po namáhání v místě smykové plochy výztuže s 55% kohezním porušením v dřevní části vzorku.

### 6.2.3. Stanovení pevnosti ve smyku za působení zvýšené teploty

V návaznosti na předchozí smykovou zkoušku byly vybrané vzorky vystaveny zvýšené teplotní expozici při 180 °C. Vybrány byly vzorky 1× BFRP z březového dřeva – referenční a s čedičovou tkaninou o plošné hmotnosti 556 g/m<sup>2</sup>, a to vždy při počtu 6 kusů.

Tělesa uložená v laboratorní sušárně byla vystavena teplotě 180 °C po dobu 120 minut. Po vyjmutí vzorků ze sušárny byla provedena zkouška smykové pevnosti a stanoven procentuální podíl porušení ve dřevě.



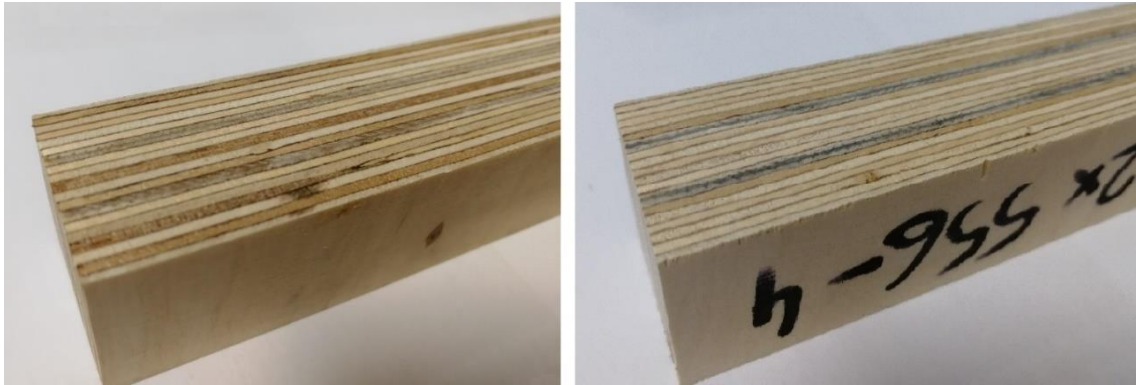
Obrázek 35) Ukázka zkušebních těles umístěné v expozičním prostředí o teplotě 180 °C a příklad porušení vzorku (1× REF bříza) po smykové zkoušce se 40% kohezním porušením ve dřevní části.

### 6.2.4. Stanovení delaminace lepených spár

Tuto metodu zkoušení popisuje norma ČSN EN 14080:2013. Podstatou zkoušky je zavedení vlhkostního spádu ve dřevě pro vyvození vnitřních napětí ve vzorku. Tím dochází k tahovým napětím kolmo k lepeným spárám mezi lamelami lepeného lamelového dřeva. Nedostatečná celistvost lepené spáry vede k delaminaci lepených spár. [57]

K provedení této zkoušky byly vybrány vzorky 2× BFRP z březového dřeva – referenční a s čedičovou tkaninou o plošné hmotnosti 556 g/m<sup>2</sup>, a to vždy při počtu 2 kusů těles z každé sady vzorků. Zkušební vzorky byly odebrány z plného průřezu zkušebního tělesa, odřezáním kolmo ve směru vláken dřeva. V rámci zkoušky delaminace byly sledovány lepené spáry adherendu a spáry s vloženou BFRP výztuží. Před vystavením

vzorků zkušebního cyklu zatěžování bylo provedeno změření celkové délky lepených spár v překližovaném kompozitu a u vzorků s vloženou výztuhou i délka lepené spáry s výztuží. Měření se provádělo na obou čelních plochách zkušebního tělesa. Těleso s hladkým povrchem o rozměrech  $27 \times 27 \times 150$  mm zaujímá celkem 18 lepených spár překližky a 2 spáry s výztuží (u reference pouze lepené spáry).



Obrázek 36) Ukázka referenčního vzorku (vlevo) a vzorku s čedičovou tkaninou o plošné hmotnosti  $556 \text{ g/m}^2$  (vpravo) před zkušebním cyklem zatěžování.

Následně byly vzorky vystaveny zkušebnímu cyklu uložením ve vodní lázni, kde setrvaly po dobu 72 hodin. Po uplynutí doby byly vzorky z vodní lázně vytaženy a vloženy do sušárny na dobu 10 hodin při teplotě  $65 - 75 \text{ }^\circ\text{C}$ . Během vysoušecího procesu byly vzorky od sebe vzdáleny minimálně 50 mm a zkoušené čelní plochy těles umístěny rovnoměrně se směrem proudění vzduchu.

Do 60 minut po vysušení se změřily délky vzniklých trhlin ve spárách a na základě trhlin byla procentuálně stanovena celková delaminace lepené spáry překližované desky a lepené spáry s výztuží. [57]



Obrázek 37) Ukázka způsobu porušení a měření delaminace zkoušeného vzorku  $2 \times \text{REF}$ .

## 7. Výsledky experimentu

Níže uvedené tabulky obsahují zprůměrované hodnoty výsledků zkoušek provedených na různém počtu vzorků překližovaných desek z březového a bukového dřeva. V popisu tabulek jsou zahrnuty i různé typy čedičových výztuží, jejich počet vrstev a orientace během vystavení namáhání prováděných zkušebních metod.

### 7.1. Pevnost v ohybu

Pro stanovení pevnosti v ohybu a modulu pružnosti za působení 4–bodového namáhání bylo použito celkem 128 zkušebních vzorků. Kromě základních parametrů těles se zkoušené vzorky také liší způsobem namáhání, kdy výztužná BFRP tkanina je orientována ve vodorovné a svislé poloze z pohledu zatěžování vzorku.

Tabulka 6) Průměrné hodnoty pevnosti v ohybu a modulu pružnosti systému dřevo/BFRP.

Typ dřeviny	Typ tkaniny	Počet vrstev tkaniny	Orientace BFRP	Pevnost v ohybu [N/mm <sup>2</sup> ]		Modul pružnosti [N/mm <sup>2</sup> ]	
				Průměrná hodnota $f_m$	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota $E_{m,g}$	Směrodatná odchylka
Březová překližka	REF	1	vodorovně	44,2	9,4	5,9	0,3
			svisle	51,8	6,8	7,1	0,2
		2	vodorovně	49,3	8,2	6,3	0,2
			svisle	52,5	3,2	7,8	0,1
	120	1	vodorovně	55,2	6,0	6,5	0,1
			svisle	57,0	2,1	7,8	0,2
		2	vodorovně	43,8	9,3	6,2	0,3
			svisle	52,5	2,7	7,6	0,1
	395	1	vodorovně	52,3	8,9	6,2	0,2
			svisle	58,6	3,9	7,2	0,2
		2	vodorovně	58,2	3,1	7,7	0,2
			svisle	65,8	2,2	9,2	0,6
	556	1	vodorovně	60,7	2,9	6,8	0,3
			svisle	63,1	3,7	8,3	0,3
		2	vodorovně	55,4	6,7	7,2	0,2
			svisle	56,1	3,5	8,3	0,3
Buková překližka	REF	1	vodorovně	77,1	10,7	9,9	0,3
			svisle	78,7	3,2	9,5	0,1
		2	vodorovně	84,4	1,6	10,1	0,3
			svisle	78,9	1,2	9,9	0,1
	120	1	vodorovně	83,1	10,5	10,4	0,5

Typ dřeviny	Typ tkaniny	Počet vrstev tkaniny	Orientace BFRP	Pevnost v ohybu [N/mm <sup>2</sup> ]		Modul pružnosti [N/mm <sup>2</sup> ]	
				Průměrná hodnota $f_m$	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota $E_{m,g}$	Směrodatná odchylka
Buková překližka	120	1	svisle	79,0	7,4	9,7	0,9
			vodorovně	79,3	5,6	10,8	0,5
		2	svisle	88,8	5,3	11,4	0,2
	395	1	vodorovně	90,7	8,0	10,7	0,2
			svisle	88,9	4,0	10,5	0,5
		2	vodorovně	92,8	5,6	11,3	0,0
			svisle	90,3	2,6	11,4	0,1
	556	1	vodorovně	78,2	3,0	9,7	0,3
			svisle	83,3	3,7	10,3	0,5
		2	vodorovně	77,4	7,4	10,4	0,3
			svisle	88,7	2,9	11,7	1,0

## 7.2. Pevnost ve smyku

Výsledky pevnosti ve smyku a kohezního porušení dřeva smykové plochy byly naměřeny na 88 zkušebních vzorcích. U této zkoušky bylo smykové namáhání vyvozováno buď v místě výztužné BFRP tkaniny (ověření únosnosti BFRP/epoxidového systému) a v místě překližované desky (stanovení smykové únosnosti překližovaného adherendu).

Tabulka 7) Průměrné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení systému dřvo/BFRP.

Typ dřeviny	Typ tkaniny	Počet vrstev tkaniny	Zkoušená plocha	Pevnost ve smyku [N/mm <sup>2</sup> ]		Průměrná hodnota kohezního porušení dřeva [%]
				Průměrná hodnota $f_v$	Směrodatná odchylka	
Březová překližka	REF	1	výztuž	4,6	0,8	70
			výztuž	5,2	0,2	85
		2	překližka	3,1	0,2	30
	120	1	výztuž	5,6	0,2	70
			výztuž	5,6	0,5	65
		2	překližka	4,4	0,4	85
	395	1	výztuž	6,1	0,3	70
			výztuž	5,8	0,8	80
		2	překližka	4,3	0,1	75

Typ dřeviny	Typ tkaniny	Počet vrstev tkaniny	Zkoušená plocha	Pevnost ve smyku [N/mm <sup>2</sup> ]		Průměrná hodnota kohezního porušení dřeva [%]
				Průměrná hodnota $f_v$	Směrodatná odchylka	
Březová překližka	556	1	výztuž	6,8	0,6	65
		2	výztuž	5,4	1,4	50
			překližka	4,6	1,1	65
Buková překližka	REF	1	výztuž	7,2	1,2	30
		2	výztuž	9,5	1,3	70
			překližka	6,9	2,7	25
	120	1	výztuž	7,6	2,4	20
		2	výztuž	8,2	0,4	20
			překližka	5,1	0,3	5
	395	1	výztuž	10,5	2,1	45
		2	výztuž	11,1	0,3	25
			překližka	4,5	0,2	40
	556	1	výztuž	9,8	1,6	30
		2	výztuž	9,3	1,1	20
			překližka	5,2	0,3	10

### 7.3. Pevnost ve smyku za působení zvýšené teploty

Zprůměrované hodnoty smykových pevností a kohezních porušení dřeva vytváří sada vzorků z březové překližované desky s jednou vrstvou lepené spáry. Vzorky byly namáhány ve smykové ploše lepené spáry referenčních vzorků a v místě uložené výztuže u vzorků s tkaninou o plošné hmotnosti 556 g/m<sup>2</sup>. Celkový počet vzorků činí 12 kusů.

Tabulka 8) Průměrné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení systému dřevo/BFRP po vystavení zvýšené teploty 180 °C.

Typ dřeviny	Typ tkaniny	Počet vrstev tkaniny	Zkoušená plocha	Pevnost ve smyku při 180 °C [N/mm <sup>2</sup> ]		Průměrná hodnota kohezního porušení dřeva [%]
				Průměrná hodnota $f_{v,t}$	Směrodatná odchylka	
Březová překližka	REF	1	výztuž	4,0	0,7	55
	556	1	výztuž	5,2	1,1	40

## 7.4. Delaminace lepených spár

Pro vyhodnocení delaminace lepených spár překližované části tělesa a spár s výztuží se celkem použily 2 vzorky pro referenci a 2 vzorky březové překližované desky s vlepovanou tkaninou o plošné hmotnosti 556 g/m<sup>2</sup>.

Tabulka 9) Průměrné hodnoty delaminace v lepených spárách překližované části tělesa a výztuže u systému dřevo/BFRP.

Typ dřeviny	Typ tkaniny	Celková délka lepených spár s výztuží	Celková délka lepených spár překližky	Delaminace lepených spár s výztuží	Delaminace lepených spár překližky	Průměrná celková delaminace lepených spár s výztuží	Průměrná celková delaminace lepených spár překližky
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]
Březová překližka	REF	600,0	5 400,0	0,0	131,0	0	2,4
	556	600,0	5 400,0	0,0	0,0	0	0

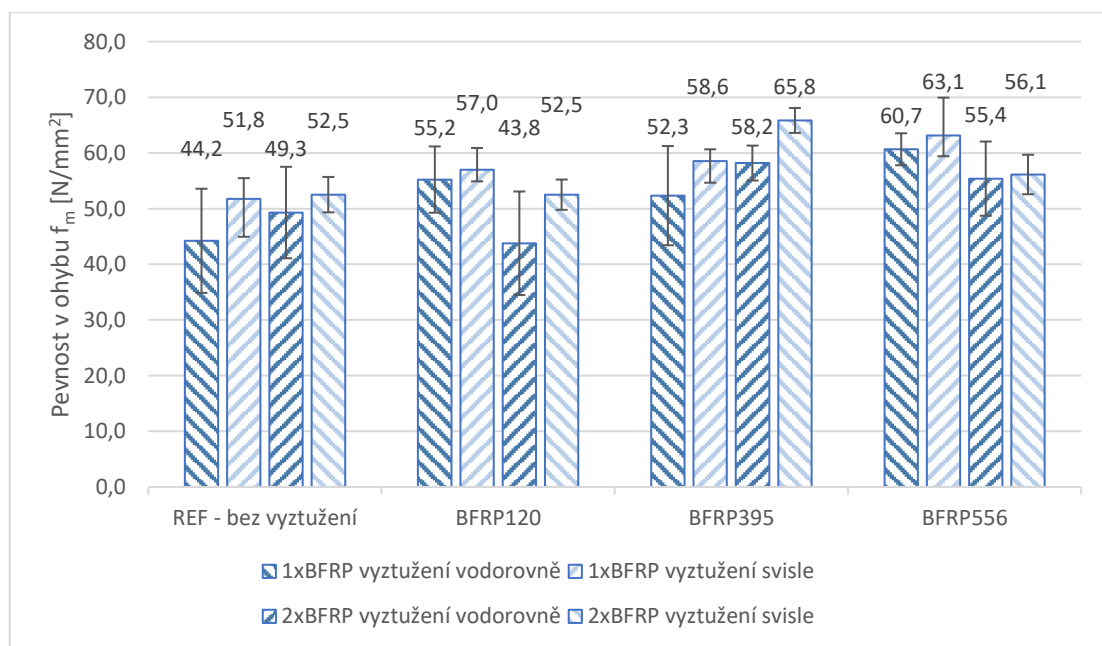
## 8. Vyhodnocení výsledků

### 8.1. Stanovení pevnosti v ohybu

Níže uvedené grafy znázorňují stanovené průměrné hodnoty ohybových pevností vzorků z březových a bukových překližovaných desek. U jednotlivého druhu dřeviny je provedeno porovnání dosažených pevností v ohybu v závislosti na typu, a tedy plošné hmotnosti výztužné BFRP tkaniny, na množství vrstev výztuže a na orientaci výztužného prvku během zatěžování.

#### 8.1.1. Březová překližovaná deska

Na následujícím grafu jsou znázorněny průměrné hodnoty pevností v ohybu tkaninami vyztužených březových překližovaných desek zkoušených při laboratorních podmínkách.



Graf 4) Grafické znázornění pevnosti v ohybu březové překližované desky v závislosti na typu, množství vrstev a orientace vyztužení.

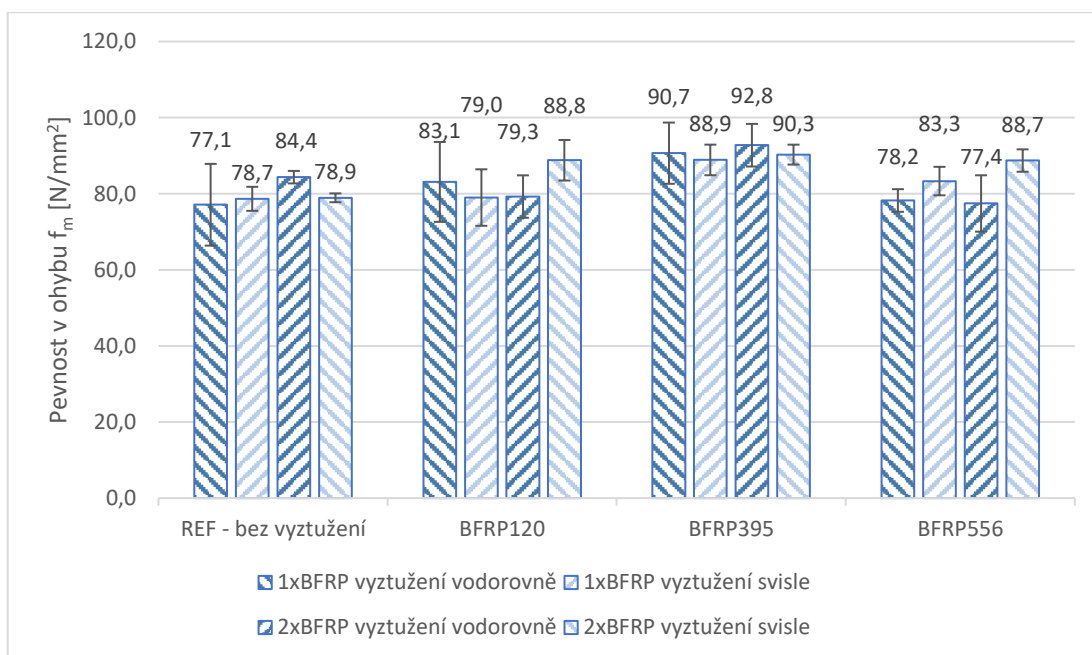
Z výsledků je patrné, že přítomnost BFRP tkaniny má dle předpokladu vliv na ohybovou pevnost zkoušených těles z březového dřeva. Téměř ve všech případech došlo vůči referenčním hodnotám (nevyztužené kompozitní systémy) k navýšení ohybových pevností. Při porovnání vlivu orientace BFRP tkaniny při zatěžování v porovnání s referenčními nevyztuženými vzorky bylo u vzorků s jednou i dvěma vrstvami výztuže

dosáhnuo vždy nejvyšších hodnot pevností v ohybu při svislé poloze výztužné vrstvy (vyjma vzorků se dvěma vrstvami tkaniny 120 g/m<sup>2</sup>).

V případě těles s jednou vrstvou BFRP výztuže dosáhly nejvyšších hodnot pevností vzorky s výztuhou ve svisle orientovaném směru o plošné hmotnosti 556 g/m<sup>2</sup>, a to s nárůstem pevností téměř až o 22 %. U těles se dvěma vrstvami výztuže nejvyšších nárůstů hodnot pevností bylo dosaženo u vzorků s výztuhou 395 g/m<sup>2</sup> orientovanou ve svislém směru s nárůstem pevností o 25 % vůči referenčním hodnotám. Celkově k nejméně efektivnímu účinku BFRP výztuže došlo dle předpokladu u vzorků s obsahem čedičové mřížky s plošnou hmotností 120 g/m<sup>2</sup>.

### 8.1.2. Buková překližovaná deska

Graf uvedený níže představuje naměřené průměrné hodnoty ohybových pevností naměřených u bukové překližované desky.



Graf 5) Grafické znázornění pevnosti v ohybu bukové překližované desky v závislosti na typu, množství vrstev a orientace vyztužení.

Podobně jako v předchozím případě i u bukové překližované desky vyztužené BFRP při porovnání s referenčními nevyztuženými vzorky dochází vlivem vyztužení ke zvýšení hodnot ohybových pevností. V rámci výztuže měla nejpriznivější vliv na ohybové pevnosti čedičová tkanina o plošné hmotnosti 395 g/m<sup>2</sup>, u které bylo dosaženo nejvyšších hodnot pevností. Vzhledem k orientaci výztuže došlo u vzorků se svislou polohou

výztužného prvku k významnějšímu navýšení hodnot (nárůst pevností o 14 % vůči referenčním hodnotám) než u těles s vodorovnou polohou.

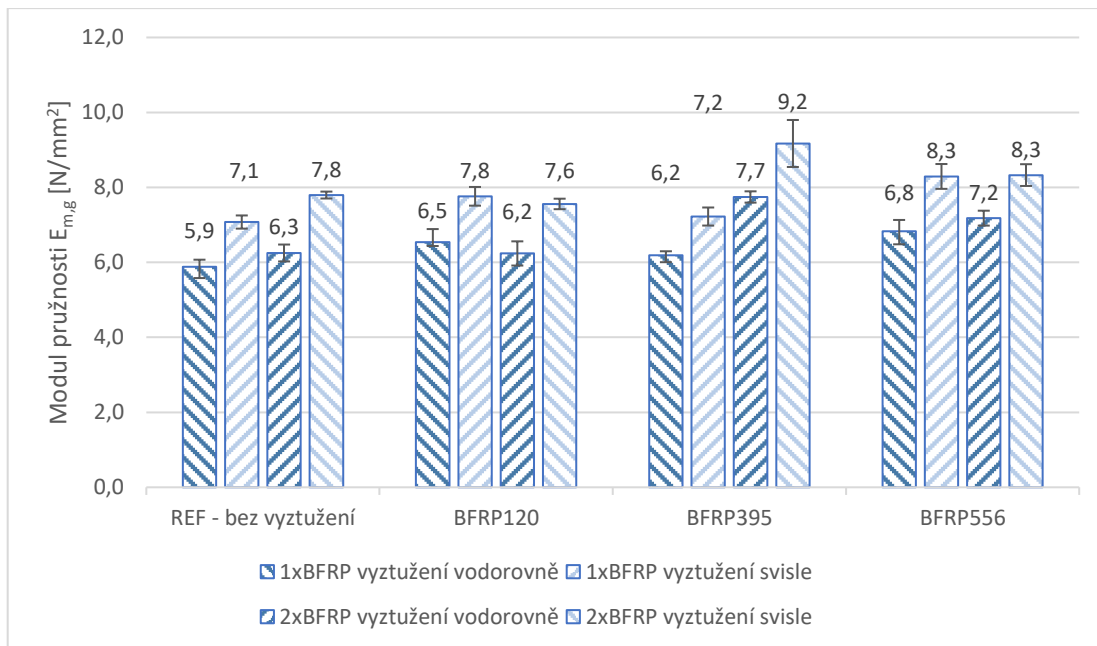
Vzorky s tkaninou 395 g/m<sup>2</sup> vykazovaly nejvyšších hodnot pevností s vodorovně orientovanou výztuží, kde v případě jedné vrstvy výztuže nabyl nárůst pevností o téměř 18 % a u těles s dvěma vrstvami BFRP o 10 %. Vliv orientace tkaniny (vodorovný, svislý) nebyl u bukových slepenců tak významný jako byl dosažen u vyztužených březových kompozitů vyztužených BFRP. Velmi neočekávaný výsledek byl zaznamenán u BFRP vyztužení tkaninou s plošnou hmotností 556 g/m<sup>2</sup>, kde příčinou nízkých hodnot pevností je vysoká hustota čedičových vláken v tkanině. Vysoká hustota vláken možná pravděpodobně způsobila nedostatečné prosycení čedičové tkaniny epoxidovým lepidlem, což vedlo ke snížené kompatibilitě vytvořeného kompozitu, a tedy ke sníženým pevnostem.

## **8.2. Stanovení modulu pružnosti v ohybu**

Následující grafy popisují stanovené průměrné hodnoty modulů pružnosti po provedené zkoušce ohybového namáhání vzorků z březové a bukové překližované desky. U obou typů kompozitních systémů je porovnáván modul pružnosti v závislosti na typu a množství vrstev výztuže a na orientaci výztužné vrstvy během zatěžování.

### **8.2.1. Březová překližovaná deska**

Níže uvedený graf obsahuje průměrné hodnoty modulů pružnosti získané z provedených zkoušek vzorků z březové překližované desky metodou ohybového namáhání se 4–bodovým zatížením.



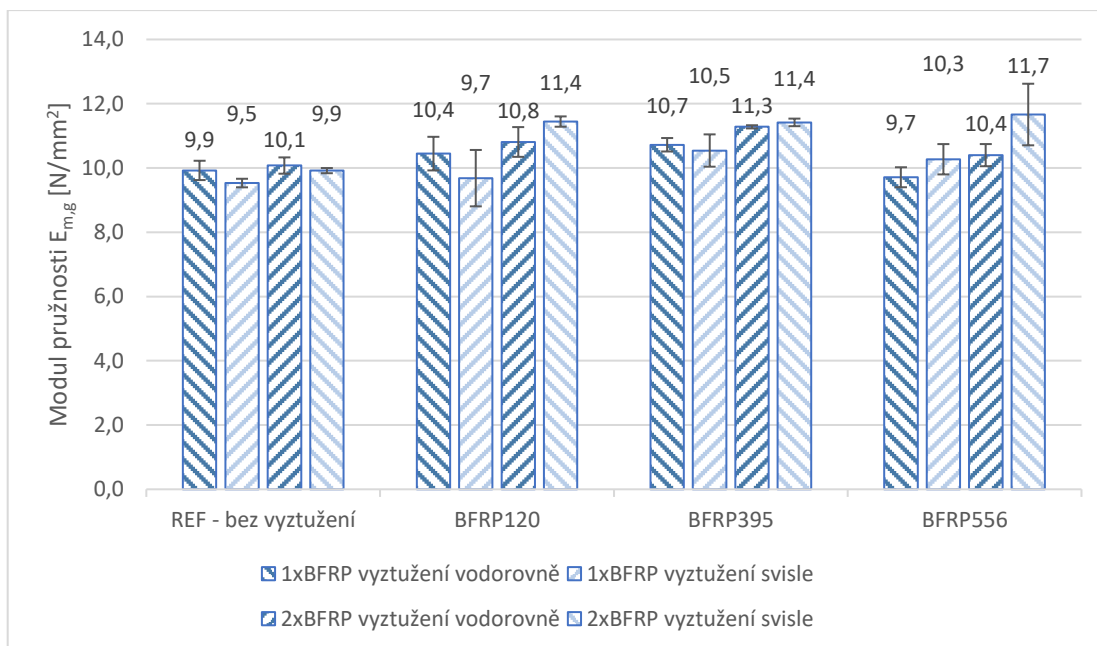
Graf 6) Grafické znázornění modulu pružnosti březové překližované desky v závislosti na typu, množství vrstev a orientace vyztužení.

Výsledky ukazují, že použitá BFRP výztuž má pozitivní vliv nejen na pevnostní charakter zkoušeného březového materiálu, ale i na tuhostní. V porovnání s referenčními hodnotami bylo dosaženo zvýšené tuhosti téměř ve všech případech. Vliv orientace vyztužné tkaniny na modul pružnosti je u vzorků s jednou vrstvou BFRP výztuže zcela ovlivněn ve svislém směru, kde při této orientaci bylo pokaždé dosaženo vyšších hodnot než u vzorků s orientací vodorovnou. U vzorků s vodorovnou orientací je dle předpokladu vliv minimální (umístění v neutrální ose).

V případě vzorků s jednou vrstvou čedičové tkaniny bylo nejvyšších hodnot modulu pružnosti naměřeno u těles s výztuží 556 g/m<sup>2</sup> orientovanou ve svislém směru, kde došlo k 17 % nárůstu tuhosti. Nejvyšších hodnot u těles se dvěma vrstvami BFRP výztuže bylo dosaženo za přítomnosti tkaniny 395 g/m<sup>2</sup> orientované ve svislém směru při nárůstu tuhosti o 18 %.

### 8.2.2. Buková překližovaná deska

Následující graf je tvořen průměrnými hodnotami modulů pružnosti zkoušených vzorků, které byly vytvořeny za použití překližované desky z bukového dřeva a různých typů BFRP tkanin.



Graf 7) Grafické znázornění modulu pružnosti bukové překližované desky v závislosti na typu, množství vrstev a orientace vyztužení.

Vliv aplikace čedičových výztuží na modul pružnosti bukové překližované desky je opět příznivý. Dle výsledků mají slepence se dvěma vrstvami výztuže dle předpokladu větší vliv na zvýšené hodnoty tuhostí než vzorky s jednou vrstvou tkaniny. Zvýšených hodnot vlivem orientace lepené spáry bylo častěji dosaženo u vzorků zatěžovaných ve svislém směru, a to především u těles se dvěma vrstvami tkanin. V případě vzorků s jednou vrstvou výztuže dochází k navýšení hodnot ve vodorovném směru.

Nejvyšších hodnot modulů pružnosti vzorků s jednou vrstvou tkaniny bylo naměřeno u těles s vodorovně orientovanou tkaninou o plošné hmotnosti 395 g/m<sup>2</sup> s nárůstem tuhosti o 8 % a u vzorků se dvěma vrstvami tkanin se svislým směrem o plošné hmotnosti 556 g/m<sup>2</sup> s nárůstem o více jak 18 %. Celkově nejvyšších hodnot modulů pružnosti dosáhly vzorky s tkaninou 395 g/m<sup>2</sup>.

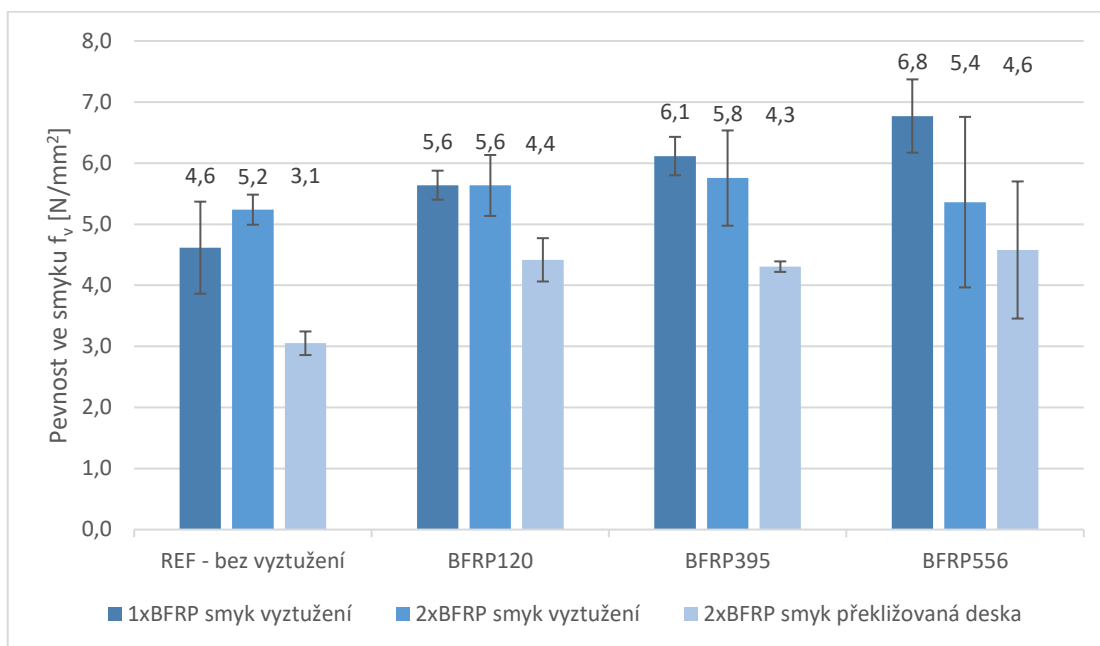
### 8.3. Stanovení pevnosti ve smyku

Níže uvedené grafy představují průměrné hodnoty smykových pevností a kohezních porušení vzorků vyztužených kompozitů překližované desky z březového a bukového dřeva, vyztužené různými typy čedičových tkanin. U obou druhů kompozitů byla sledována smyková pevnost v závislosti na typu a množství vrstev výztuže a na místě zkoušené smykové plochy. Smyková plocha byla zářezy stanovena buď v místě

překližované desky (smyk adherendu) nebo v místě BFRP výztuže (smyková únosnost lepené spáry s BFRP výztuží).

### 8.3.1. Březová překližovaná deska

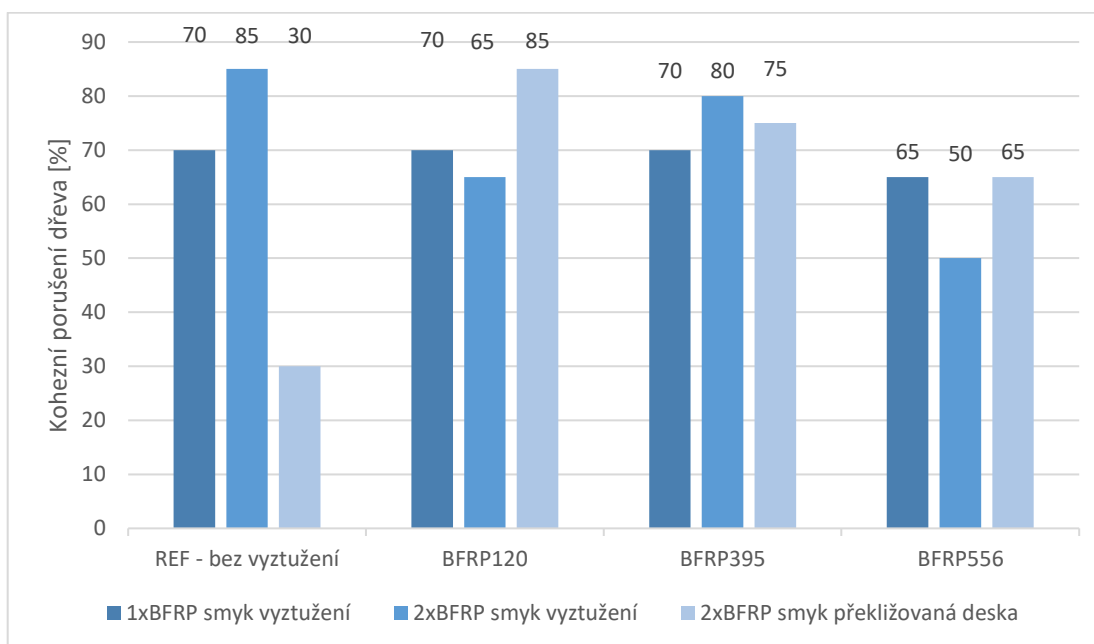
Průměrné hodnoty v grafu vycházejí ze vzorků z březové překližované desky vystavené tahovému namáhání a následným stanovením smykových pevností v místě zkoušené smykové plochy vzorku.



Graf 8) Grafické znázornění pevnosti ve smyku březové překližované desky v závislosti na typu a množství vrstev vyztužení a místa zkoušené plochy.

Výsledky stanovených pevností ukazují, že přítomnost vložených BFRP tkanin má u vzorků z březového dřeva **kladný vliv na navýšení smykových pevností**. Ve všech případech vyztužených vzorků došlo při porovnání s referenčními hodnotami k výraznému zvýšení hodnot smykových pevností, kde se jako nejúčinnější výztuž jeví tkanina s plošnou hmotností 556 g/m<sup>2</sup>. Z výsledků je evidentní, že smyková pevnost BFRP/epoxidového kompozitu je **ve všech případech vyšší** než smyková pevnost překližované desky. Z hlediska vyztužené vrstvy bylo vyšších pevností dosaženo u kompozitu s jednou vrstvou BFRP tkanin oproti kompozitu se dvěma vrstvami. U vzorků s jednou vrstvou BFRP se smykovou plochou v místě tkaniny bylo nejvyšších hodnot naměřeno za použití čedičové výztuže o plošné hmotnosti 556 g/m<sup>2</sup>, a to s nárůstem pevnosti ve smyku o téměř 48 %.

Následující grafické vyhodnocení popisuje kohezní porušení březové dřevní části vzorků. Hodnoty kohezního porušení byly vizuálně zjištěny po stanovení smykových pevností vzorků vyztužených různými typy čedičových tkanin a výsledky uvedeny v procentech. Hodnocení se vztahuje na typ a počet vrstev použitých čedičových výztuží a na variantě zkoušené smykové plochy, tedy v místě překližované desky či v místě uložené BFRP výztuže.

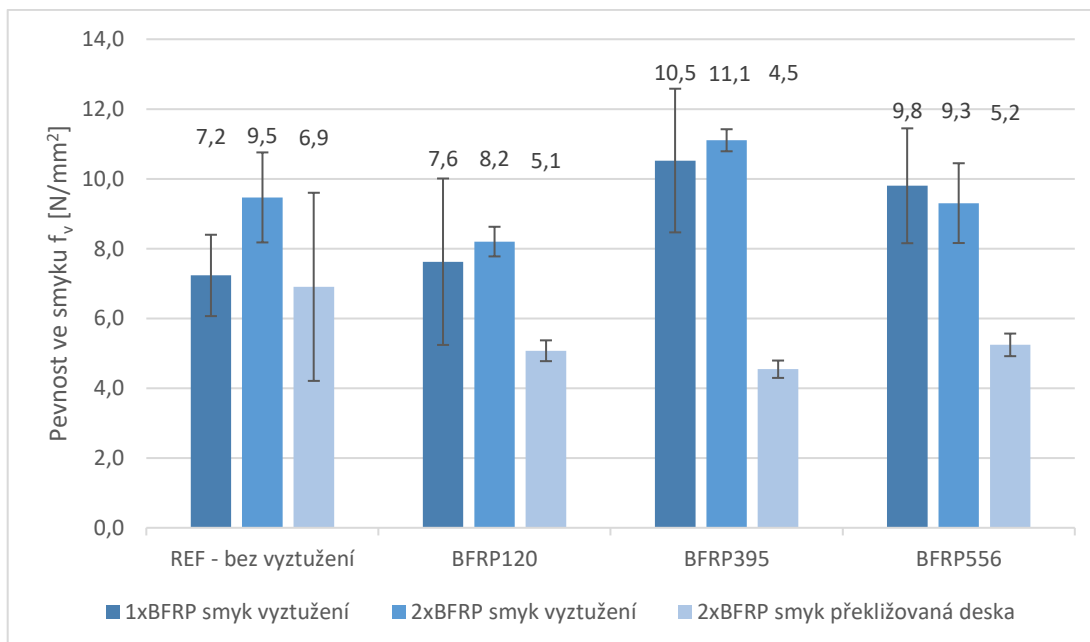


Graf 9) Grafické znázornění kohezního porušení březové překližované desky v závislosti na typu a množství vrstev vyztužení a místa zkoušené plochy.

Výsledky kohezního porušení vzorků vyztužených jednou vrstvou čedičové tkaniny se v porovnání s referenčními hodnotami nijak nemění; hodnoty porušení v dřevní části se pohybují v rozmezí 70 %. V případě vzorků se dvěma vrstvami BFRP tkaniny zkoušené v místě smykové plochy výztuže je nejvyššího kohezního porušení dosaženo u referenčních vzorků – 85 %. U ostatních druhů tkanin dochází ke snížení hodnot a nejnižšího kohezního porušení je naměřeno u vzorků s výztuží 556 g/m<sup>2</sup>, kde bylo naměřeno 50 % porušení ve dřevě. Výrazný vliv čedičové tkaniny se projevuje i u vzorků se zkoušenou smykovou plochou v místě dých překližované desky. U referenčních vzorků bylo naměřeno nejmenší 30% porušení ve dřevě, kdežto nejvyšších hodnot porušení (85 %) se stanovilo u vzorků s obsahem čedičové mřížky.

### 8.3.2. Buková překližovaná deska

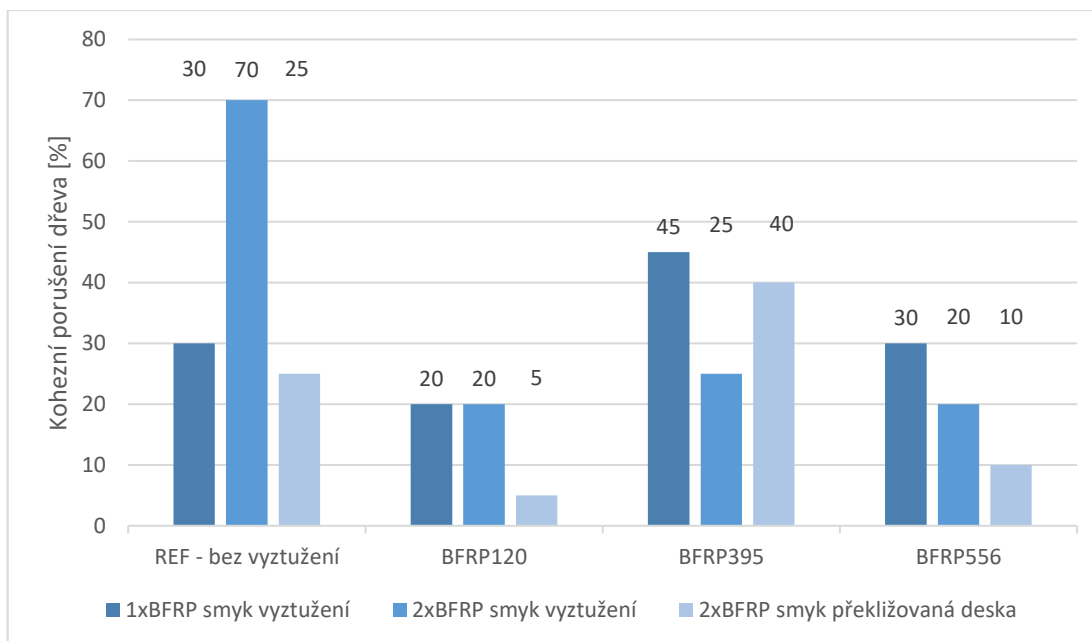
Na následujícím grafu jsou obsaženy průměrné hodnoty smykových pevností překližovaných desek z bukového dřeva vyztužené čedičovými tkaninami o různých plošných hmotnostech.



Graf 10) Grafické znázornění pevnosti ve smyku bukové překližované desky v závislosti na typu a množství vrstev vyztužení a místa zkoušené plochy.

Při porovnání stanovených smykových pevností vyztužené bukové překližované desky s referenčními hodnotami je zřejmé, že v případě zkoušené smykové plochy ve výztuži má použitá BFRP tkanina pozitivní vliv na smykové pevnosti, a to pouze v případě kompozitů s 1× BFRP. Smykové pevnosti u kompozitů byly vyšší u tkanin 395 g/m<sup>2</sup>, resp. 556 g/m<sup>2</sup>, a to pro oba dva typy vyztužení, tj. 1× BFRP, 2× BFRP vyztužením. Největších smykových pevností v místě tkaniny bylo naměřeno u vzorků s jednou vrstvou tkaniny o plošné hmotnosti 395 g/m<sup>2</sup>, kde byl zjištěn nárůst pevnosti o téměř 46 %. Z hlediska navýšení pevností je dle očekávání nejméně efektivní výztuží tkanina s nejnižší plošnou hmotností 120 g/m<sup>2</sup>.

V následujícím grafu jsou obsaženy procentuální hodnoty kohezního porušení dřevní části těles z bukového dřeva, zkoušené za laboratorních podmínek tahovým namáháním s následným vizuálním vyhodnocením. Hodnocení se vztahuje na typ a počet vrstev použitých čedičových výztuží a na variantě zkoušené smykové plochy, tedy v místě překližované desky či v místě uložené BFRP výztuže.



Graf 11) Grafické znázornění kohezního porušení bukové překližované desky v závislosti na typu a množství vrstev vyztužení a místa zkoušené plochy.

U vzorků s jednou vlepanou vrstvou čedičové výztuže bylo nejvyššího kohezního porušení v dřevní části tělesa dosaženo o hodnotě 45 % u těles s vyztužením o plošné hmotnosti 395 g/m<sup>2</sup>. Nejnižších hodnot bylo naopak dosaženo u těles s tkaninou 120 g/m<sup>2</sup> s 20 % porušení dřeva. Celkově nejvyšších hodnot kohezního porušení dřeva bylo dosaženo u referenčních těles se dvěma vrstvami lepených spár se smykovou plochou ve výztuži při 70% porušení ve dřevě. U ostatních typů těles se hodnoty porušení pohybovaly v rozmezí 20 %. Tělesa se dvěma vrstvami výztuže zkoušené ve smykové ploše překližované části vzorku dosáhly největšího porušení 40 % při obsahu tkaniny o plošné hmotnosti 395 g/m<sup>2</sup>, zatímco u čedičové mřížky byly naměřeny celkově nejnižší hodnoty porušení o hodnotě 5 %.

### 8.3.3. Březová překližovaná deska za působení zvýšené teploty

Tabulka uvedená níže představuje průměrné hodnoty smykových pevností stanovených v místě smykové plochy u vzorků z březového dřeva. Hodnoty tvoří referenční a vyztužené vzorky s čedičovou BFRP tkaninou, které byly vystaveny zvýšené teplotě 180 °C po dobu 120 minut.

Tabulka 10) Průměrné hodnoty pevností ve smyku březové překližované desky při referenční teplotě 20 °C a při vystavení zvýšené teplotě 180 °C.

Typ dřeviny	Typ tkaniny	Počet vrstev tkaniny	Zkoušená plocha	Pevnost ve smyku při 20 °C [N/mm <sup>2</sup> ]		Pevnost ve smyku při 180 °C [N/mm <sup>2</sup> ]	
				Průměrná hodnota $f_v$	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota $f_{v,t}$	Směrodatná odchylka
Březová překližka	REF	1	výztuž	4,6	0,8	4,0	0,7
	556	1	výztuž	6,8	0,6	5,2	1,1

Dle předpokladu vlivem zvýšené teploty 180 °C dochází ke snížení smykových pevností jak u vzorků referenčních, tak i vyztužených čedičovou tkaninou, jak je patrné z výše uvedené Tabulka 10.

V případě referenčních nevyztužených zkušebních těles dochází k poklesu pevností o 13 %; u vzorků vyztužených čedičovou tkaninou s plošnou hmotností 556 g/m<sup>2</sup> nastává snížení smykových pevností o téměř 24 % vlivem expozice zvýšené teplotě.

Níže uvedená tabulka obsahuje průměrné hodnoty kohezního porušení v dřevní části překližované desky z březového dřeva. Hodnoty představují vzorky ve formě referencí a těles vyztužených čedičovou tkaninou, před a po vystavení zvýšené teploty 180 °C po dobu 120 minut.

Tabulka 11) Průměrné hodnoty kohezního porušení březové překližované desky při referenční teplotě 20 °C a při vystavení zvýšené teplotě 180 °C.

Typ dřeviny	Typ tkaniny	Počet vrstev tkaniny	Zkoušená plocha	Kohezní porušení dřeva při 20 °C [%]	Kohezní porušení dřeva při 180 °C [%]
Březová překližka	REF	1	výztuž	70	55
	556	1	výztuž	65	40

Po vystavení těles teplotní expozici o teplotě 180 °C došlo ke snížení kohezního porušení v dřevní části vzorků. U referenčních nevyztužených těles došlo vlivem zvýšené

teploty k 21% poklesu kohezního porušení ve dřevě a v případě vyztužených těles tkaninou o plošné hmotnosti 556 g/m<sup>2</sup> nastal pokles až o 38 %.

#### **8.4. Delaminace kompozitu BFRP/březová překližovaná deska**

V rámci stanovení celkové delaminace lepených spár došlo k porušení pouze u referenčního vzorku, a to ke 2,4 % v místě březové překližované desky lepené fenol-formaldehydovým lepidlem. Kompozitní systém referenčních těles lepený epoxidovým lepidlem a systém BFRP/březová překližovaná deska nevykázal jakékoliv projevy delaminace.

## 9. Shrnutí a diskuse

### 9.1. Vliv způsobu zesílení na ohybové pevnosti a moduly pružnosti

Při porovnání výsledných ohybových pevností a modulů pružnosti u referenčních nevyztužených těles při použití překližovaných desek obou druhů dřevin je zjevné, že bukové dřevo dosahuje v porovnání s březovým dřevem vyšších hodnot pevností a tuhostí. Vzhledem k deklarovaným ohybovým pevnostem z technických listů výrobce dané překližované desky, kde pro březovou překližovanou desku je uvedena hodnota 78,3 N/mm<sup>2</sup> a pro bukovou 85,4 N/mm<sup>2</sup>, byl výsledný vliv typu dřeviny předpokládán.

Ze stanovených výsledků vyztužených těles pomocí BFRP tkanin lze konstatovat, že **nejvyšší vliv** z hlediska použité vlepané čedičové výztuže byl zaznamenán u těles tvořených překližovanou deskou z březového dřeva (nižší pevnostní parametr v porovnání s bukem), kde došlo v porovnání s počátečními referenčními hodnotami k nejvýraznějšímu navýšení pevností i tuhostí.

Vlivem přítomnosti vyztužující BFRP tkaniny bylo tedy dle očekávání u obou druhů dřevin překližovaných desek dosaženo zvýšených hodnot ohybových pevností, v případě vyztužení dvěma vrstvami BFRP i ke zvýšení modulů pružnosti. U březového i bukového dřeva se navýšení pevností a tuhostí nejvíce projevilo u vzorků vyztužených tkaninou o plošné hmotnosti 395 g/m<sup>2</sup>, kde průměrně docházelo k nárůstům pevností o 20 % a nárůstům tuhostí o 18 %. Nejméně efektivní vyztužení bylo dosaženo u obou druhů dřevin s BFRP tkaninou o plošné hmotnosti 120 g/m<sup>2</sup>. Nízká plošná hmotnost, a tedy menší obsah čedičových vláken v tkanině, je příčinou nízkých ohybových pevností čedičové mřížky, s čímž korelují i nízké nárůsty tuhostí vzorků. Tyto výsledky korelují se závěry experimentální studie [43], ve které byl zjištěn příznivý vliv čedičové výztuže na ohybové pevnosti vyztužených těles z bukové překližované desky, kde se zvyšující se plošnou hmotností čedičové tkaniny narůstají i hodnoty ohybových pevností.

Bylo předpokládáno, že výztužný systém tkanin s nejvyšší plošnou hmotností 556 g/m<sup>2</sup> bude vykazovat nejvyšších nárůstů pevností/tuhostí. Nicméně u obou typů překližovaných kompozitních systémů (BŘ, BK) nedošlo k tomuto jevu. Vyšší pevnostní charakteristiky byly dosaženy u tkaniny 395 g/m<sup>2</sup>. Vzhledem ke stejnému technologickému postupu sestavení a výroby zkušebních těles se předpokládá, že nižší pevnostní ohybové parametry byly u tkaniny 556 g/m<sup>2</sup> zapříčiněny nedostatečným prosycením tkaniny lepidlem. Hustá struktura a jiný typ úpletu tkaniny v rámci

experimentu znesnadnil úplné prosycení lepidlem, což vedlo k negativnímu ovlivnění výsledných pevností kompozitního zesíleného systému.

Výsledky u obou druhů testovaných dřevin dále ukazují, že tělesa s **vodorovně orientovanou jednou vrstvou výztuže** sice častěji dosahují vyšších nárůstů ohybových pevností než vzorky se dvěma lepenými vrstvami, ale z hlediska tuhostních parametrů dle předpokladu nebyl dosažen patrný nárůst (orientace vyztužení v neutrální ose). Nejvyšších nárůstů tuhostí ve vodorovném směru umístěného vyztužení bylo dosaženo u vzorků **se dvěma vrstvami BFRP tkanin**.

Pozitivní vliv orientace tkaniny byl ve všech případech zaznamenán v případě její orientace ve svislém směru vůči působícímu účinku zatížení, u kterého dochází k významnějším nárůstům tuhostí oproti vodorovně orientované výztužné vrstvě. Při posouzení počtu tkanin došlo k významně vyššímu nárůstu tuhostí při svislé orientaci u vzorků se dvěma vrstvami BFRP, a to průměrně o 17 %.

Lze tedy konstatovat, že experimentálně byl prokázán pozitivní účinek jedné vrstvy BFRP tkaniny na pevnostní parametr při orientaci výztužné vrstvy ve vodorovném směru; v případě dvou vrstev BFRP tkaniny pozitivní vliv na pevnostní i tuhostní parametr při orientaci výztužné vrstvy ve svislém směru namáhání.

## **9.2. Vliv způsobu zesílení na smykové pevnosti a kohezní porušení**

Při porovnání dosažených smykových pevností u referenčních nevyztužených těles bylo u překližované desky z bukového dřeva dosaženo vyšších smykových pevností než u vzorků tvořených březovým dřevem, přestože u březového dřeva byly naměřeny vždy vyšší hodnoty kohezního porušení v dřevní části vzorku. V obou případech použitých druhů dřevin bylo dosaženo vyšších hodnot pevností, než jaké deklarují technické listy překližovaných desek, které udávají minimální smykovou pevnost březové překližované desky  $1,83 \text{ N/mm}^2$  a bukové překližované desky  $1,0 \text{ N/mm}^2$ .

Při porovnání vlivu čedičové výztuže na smykové pevnosti u obou typů překližovaných desek vyztužených BFRP výztuží bylo dosaženo **nejefektivnějšího účinku vyztužení** čedičovou tkaninou u těles tvořených březovým dřevem, u kterých bylo vzhledem k referenčním poměrům pevností obou druhů dřevin dosaženo nejvyšších nárůstů pevností. V rámci stanovení kohezního porušení v dřevní části vzorků došlo v případě březové překližované desky k výrazně vyšším procentuálním hodnotám

porušení než u těles tvořené bukovým dřevem. Důvodem tohoto jevu je pravděpodobně horší smáčivost povrchu bukového dřeva lepidlem, což způsobilo nízkou adhezi lepidla k dřevěným dýhám překližované desky a dále vedlo k nižším nárůstům smykových pevností vzorků z bukového dřeva. Podobných výsledků dosáhla studie [39], ve které autor vyztužil bukové dýhy skelnými GFRP tkaninami spojené močovino–formaldehydovým lepidlem. Se stejným typem lepidla byla ve výrobě pojena i buková překližovaná deska použitá v této diplomové práci. Při stanovení smykových pevností a kvality spojení lepeného systému bylo zjištěno vysoké množství adhezního poškození v lepených spárách s výztuží. Autor z výsledků vyvodil nedostatečný efekt výztužné skleněné tkaniny a doporučil použití silnějšího typu lepidla než močovino–formaldehydovou pryskyřici. Nízká účinnost skleněné tkaniny také potvrzuje kladný vliv čedičové tkaniny použité v této práci.

Výsledky dále ukazují, že aplikace čedičové výztuže má dle očekávání pozitivní vliv na smykovou únosnost téměř u všech vyztužených vzorků obou typů dřevin. Při porovnání účinku použité BFRP tkaniny je patrné, že u bukového dřeva dosahují nejvyšších nárůstů pevností a kohezních porušení vzorky s obsahem čedičové tkaniny o plošné hmotnosti  $395 \text{ g/m}^2$  s nárůstem pevností průměrně o 32 %. Nejvyšších nárůstů pevností u vzorků z březové překližované desky dosáhla BFRP tkanina  $556 \text{ g/m}^2$ , ovšem častějších nárůstů pevností a vyššího kohezního porušení bylo dosaženo u čedičové tkaniny  $395 \text{ g/m}^2$ , kde nárůst pevností činí 36 %. Nejméně účinnou BFRP výztuží se u obou typů překližovaných desek jeví tkanina s nejnižší plošnou hmotností  $120 \text{ g/m}^2$ . Nízké pevnostní nárůsty u tohoto typu výztuže jsou opět ovlivněny nízkým obsahem čedičových vláken v tkanině, které způsobily nedostatečný účinek vyztužení vůči účinku tahového namáhání.

Z výsledků je patrné, že v rámci zkoušené smykové plochy překližované desky a v místě uložené BFRP výztuže dosahuje ve všech případech vybraných dřevin nejvyšších smykových pevností a kohezních porušení ve dřevě **systém BFRP/epoxidový kompozit**, u kterého vždy dochází k vyšším nárůstům hodnot pevností a porušení ve dřevě než u zkoušené plochy překližované desky. Tento jev je důkazem toho, že systém BFRP/překližovaná deska má příznivý vliv na navýšení smykových únosností vyztužených těles.

Ze stanovených výsledků bylo prokázáno, že **BFRP výztuž má výrazný kladný vliv na smykovou únosnost** vyztužených prvků, a to s vyšším vlivem než na ohybové

pevnosti zkoušených těles. Dále bylo zjištěno, že s přibývajícím účinkem vyztužení pomocí BFRP tkaniny dochází k vyššímu porušení v dřevní části vzorků, což vede k vyšším hodnotám smykových pevností. Vzhledem k nižším hodnotám pevností u tkaniny 556 g/m<sup>2</sup>, než bylo původně očekáváno, a nízkým procentuálním hodnotám kohezního porušení ve dřevě lze konstatovat, že bylo potvrzeno nedostatečné spojení tohoto vyztuženého kompozitu vlivem nedostatečného prosycení tkaniny lepidlem. Následkem toho došlo u této tkaniny k nižším nárůstům pevností než u tkaniny 395 g/m<sup>2</sup>, kde bylo dosaženo dostačující impregnace tkaniny lepidlem.

### 9.3. Ověření kvality lepení systému BFRP

V rámci účinku zvýšené teploty na smykové pevnosti referenčních nevyztužených těles a kompozitního systému BFRP/dřevěná překližovaná deska bylo zjištěno, že v porovnání s neexponovanými vzorky došlo vlivem **zvýšené teploty ke snížení smykové únosnosti** u obou typů těles. Výraznějšího úbytku smykové únosnosti bylo naměřeno u vyztuženého vzorku čedičovou tkaninou o plošné hmotnosti 556 g/m<sup>2</sup>, a to o 24 %. Vlivem zvýšené teploty došlo také u obou typů těles ke snížení kohezního porušení v dřevní části vzorků, kde výraznějších úbytků došlo v případě vyztuženého kompozitu. Bylo tedy potvrzeno, že zvýšená teplota má negativní dopad na pevnostní charakter těles. Jelikož čedičová vlákna mají vysokou odolnost vůči zvýšeným teplotám přes 560 ° C, lze nízké výsledky přičíst nedokonalé kompatibilitě systému BFRP/překližovaná deska a nízké odolnosti lepidla překližované desky.

Výsledky zkoušky celkové delaminace lepených spár u březové překližované desky neprokázaly u nevyztužených referenčních těles ani u vzorků s vloženou BFRP výztuží žádné porušení v místě lepené spáry epoxidovým lepidlem. Pouhé 2,4 % porušení spár nastalo v místě materiálu překližované desky. Celý kompozitní systém se tedy jeví jako **dostatečně celistvý**.

## 10. Závěr

Hlavní náplní této diplomové práce bylo posouzení vlivu různých typů čedičových BFRP tkanin na pevnostní parametry vyztuženého systému BFRP/překližovaná deska. Porovnány byly účinky čedičových tkanin lišící se svou plošnou hmotností, počtem vrstev, orientací během zatěžování a místem zkoušené smykové plochy. Dále byl také sledován vliv použitého typu dřeviny tvořící vyztužovaný nosný prvek. U jednotlivých zkoumaných elementů proběhlo porovnání a následné vyhodnocení jejich vlivu na únosnost a trvanlivost celého zkoumaného zesíleného systému.

V rámci zkušebních těles byly vytvořeny série vzorků tvořené březovou a bukovou překližovanou deskou vyztužené čedičovými tkaninami s plošnou hmotností 120; 395 a 556 g/m<sup>2</sup>, v podobě dvou variant vrstev vyztužení (1× BFRP, 2× BFRP). Na takto vyztužených vzorcích spojené epoxidovou pryskyřicí byly stanoveny pevnosti v ohybu a modul pružnosti. Po upravení vzorků proběhlo stanovení smykových pevností a kohezní porušení ve dřevě. Ověření kvality lepení systému BFRP/překližovaná deska bylo stanoveno po účinku zvýšené teploty a cyklickém namáhání vlhkostí stanovena delaminace lepených spár.

Při stanovení ohybových pevností a modulů pružnosti zkušebních těles bylo u referenčních nevyztužených vzorků dosaženo vyšších hodnot pevnosti a tuhosti v případě použití překližovaných desek z bukového dřeva. V případě vyztužených vzorků byl zaznamenán pozitivní efekt vyztužení zejména u březových překližovaných desek, kde nárůst pevností činil průměrně 24 % a nárůst tuhostí 18 %. To značí, že u březového dřeva došlo k výrazně vyššímu účinku vyztužení čedičovou tkaninou než u dřeva bukového. U všech vzorků s obsahem tkaniny došlo vlivem vyztužení k navýšení pevností, ovšem v obou případech překližované desky došlo k nejvyšším nárůstům pevností a tuhostí za použití tkaniny o plošné hmotnosti 395 g/m<sup>2</sup>. Naopak nejméně účinnou výztuží u obou druhů dřevin se jeví tkanina s nejnižší plošnou hmotností 120 g/m<sup>2</sup>. Vzhledem k vlivu vrstev tkaniny a její orientace během zatěžování byl prokázán pozitivní vliv jedné BFRP tkaniny na pevnostní parametr při vodorovné orientaci výztužné vrstvy. V případě dvou vrstev BFRP tkaniny nastal pozitivní účinek na pevnostní i tuhostní parametr při orientaci ve svislém směru.

V případě smykových pevností referenčních nevyztužených těles bylo vyšších hodnot pevností dosaženo u bukové překližované desky. Při porovnání smykových

pevností obou typů vyztužených překližovaných desek dosáhl vyšších hodnot pevností vzorek z březového dřeva. Z těchto výsledků je evidentní vyšší účinek zesílení BFRP tkaninou u březového dřeva, u kterého bylo také stanoveno výrazně vyšší kohezní porušení v dřevní části vzorku. Nízké hodnoty kohezního porušení bukového dřeva lze odůvodnit nízkou adhezí lepidla k povrchu bukového dřeva. I v případě smykových pevností má přítomnost BFRP tkaniny pozitivní vliv na výsledné pevnosti. Podobně jako u ohybových pevností, tak i u smykových pevností obou typů dřevin dochází k nejefektivnějšímu účinku tkaniny s plošnou hmotností  $395 \text{ g/m}^2$  a naopak u  $120 \text{ g/m}^2$  k nejnižším účinkům zesílení. V rámci posouzení smykových ploch dochází u systému BFRP/epoxidový kompozit vždy k nejvyšším nárůstům pevností a porušení ve dřevě než ve zkoušené smykové ploše v překližované desce. To značí o pozitivním vlivu čedičové výztuže na navýšení smykové únosnosti.

Při ověření kvality lepení systému BFRP bylo zjištěno, že vlivem zvýšené teploty  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  dochází k vyšším poklesům pevností u vzorků vyztužené tkaninou  $556 \text{ g/m}^2$ . Vzhledem k vysoké teplotní odolnosti čedičových vláken se tento jev přisuzuje nedostatečnému lepenému systému a nízké teplotní odolnosti použitého lepidla. Zkouška delaminace lepených spár potvrzuje dostatečnou celistvost celého BFRP systému.

Z výše uvedených závěrů lze konstatovat, že přítomnost čedičové BFRP tkaniny má pozitivní vliv na pevnostní charakteristiky vyztužených těles. Bylo předpokládáno, že nejvyšší účinek vyztužení nastane u čedičové tkaniny  $556 \text{ g/m}^2$ , ale v žádném případě k tomuto jevu nedošlo. Důvodem je s největší pravděpodobností nižší prosycení tkaniny lepidlem, což vedlo k nedokonalému spojení celého vyztuženého systému a tím i k nízkému účinku této tkaniny. Vzhledem k optimálnímu poměru obsahu vláken bylo nejefektivnějšího účinku vyztužení dosaženo u čedičové tkaniny s plošnou hmotností  $395 \text{ g/m}^2$ , kdežto nejnižšího účinku u tkaniny  $120 \text{ g/m}^2$ .

## Citovaná literatura

1. **Ehsani, M., Larsen, M. a Palmer, N.** Strengthening of old wood with new technology. *Structure magazine*. Únor 2004, stránky 19-21.
2. **Schober, K. U., a další.** FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*. Říjen 2015, 97, stránky 106-118.
3. **PREFA KOMPOZITY, a.s.** *Kompozitní výztuže*. [Katalog] Brno : PREFA KOMPOZITY, a.s., 2015.
4. **Bodnárová, Lenka.** *Kompozitní materiály ve stavebnictví*. Brno : CERM, 2002. 9788021422667.
5. **Burgoyne, C. J., a další.** *FRP reinforcement in RC structures*. 2007. stránky 1-175. 978-2- 88394-080-2.
6. **OKTAEDR - Seminář FRP výztuže**. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. 978-80-214-4925-1.
7. **IndiaMART InterMESH Ltd.** . [Online] 2021. [Citace: 31. Prosinec 2021.] <https://www.indiamart.com/proddetail/alkali-resistant-glass-fiber-21702650255.html>.
8. [Online] **Prefa kompozity a.s.** [Citace: 15. Listopad 2021.] <https://www.prefa-kompozity.cz/en/products/basic-products/prefen-composite-profiles/>.
9. [Online] **Stagnoli TG s.r.o.**, 11. Březen 2019. [Citace: 15. Listopad 2021.] <https://www.stagnoligears.com/en/motor-gears/production-of-gears-and-components-cfrp/>.
10. [Online] **Global Sources**, 2021. [Citace: 16. Listopad 2021.] <https://www.globalsources.com/si/AS/Qingdao-Shishuo/6008847976225/pdtl/kevlar-fiber-chopped-strands/1124308210.htm>.
11. [Online] **IndiaMART**. [Citace: 16. Listopad 2021.] <https://www.indiamart.com/nickunjeximpentp/kevlar-products.html#aramid-fibers-fabric>.
12. **Tunan, M., Sapuan, S. M. a Ilyas, R. A.** Mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer composites: A review. 2021.
13. *Kompozitní tkaniny*. [Produkt] místo neznámé : Svitap s.r.o. , 2021.
14. [Online] **Basalt.Today**. [Citace: 17. Listopad 2021.] <https://basalt.today/2019/01/19617/>.
15. [Online] **Beyond materials group PTY LTD.**, 2021. [Citace: 17. Listopad 2021.] <https://beyondmaterialsgroup.com.au/services/basalt-fibre-products/>.
16. FRP reinforcement in RC structures. *Bulletin*. International federation for structural concrete, 2007, 40.

17. **Ryjáček, P., a další.** *Aplikace FRP polymerů pro vybavení železničních mostů.* [Dokument] Praha : Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2016.
18. **Sedlmajer, M.** *Kompozitní materiály.* [Výukový materiál] Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2020.
19. [Online] **Nanjing Hitech Composites Co., Ltd.** , 2021. [Citace: 25. Prosinec 2021.] <https://www.hitechfrp.com/Product/Carbon-Fiber-Plate.html>.
20. *Beton-technic.* [Online] [Citace: 25. Prosinec 2020.] <https://beton-technik.ch/services/klebearmierungen/>.
21. **Vávra, Z.** *Zesilování konstrukcí kompozitními tkaninami a uhlíkovými pásky.* [Podklad k vyučování] místo neznámé : Betosan.
22. **Kampmann, R., Ruiz, A. a Nolan, S.** *BFRP-RC Standardization of Design & Materials.* [Seminář ] Honolulu, Hawaii, USA : autor neznámý, 21. Červenec 2019.
23. *Vláknitý beton: čo to je a kde sa používa?* místo neznámé : Decorex Pro, 2019.
24. **Schober, K., a kol.** FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials.* 2015, Sv. 97, stránky 106-118.
25. *Prestressed concrete.* místo neznámé : Designing Buildings Ltd. , 2021.
26. *Prestressing Systems for Structural Strengthening with Sika® CarboDur® CFRP Plates.* místo neznámé : Sika .
27. **Šilhan, O.** *Kompozitní syntetická FRP výztuž v pozemním stavitelství.* [Seminář] Ostrava : Minova Bohemia s.r.o., 2010.
28. *Principal repair methods.* [Prezentace] místo neznámé : Rotafix, 2005.
29. **Kasal, B. a Yan, L.** Fiber-Reinforced Polymers as Reinforcement for Timber Structural Elements. *Reinforcement of Timber Elements in Existing Structures.* RILEM State-of-the-Art Reports, 1. Květen 2021, 12.
30. **Kompozitní materiály FRP.** [Technické informace] místo neznámé : Sanax chemical construction s.r.o., 2021.
31. **Kostiha, Vojtěch.** *Zesilování železobetonových sloupů ovinutím FRP tkaninou .* [Disertační práce] Brno : Ústav betonových a zděných konstrukcí Vysokého učení technického v Brně, 2018.
32. *Carbon Fibre Reinforced Polymer.* místo neznámé : CRT Specialist.
33. *Methods to Improve Ductility of RCC Beams with Fiber Reinforced Polymer Bars.* [Článek] místo neznámé : The Constructor.
34. **Yu, B. a Kodur, V.K.R.** Effect of high temperature on bond strength of near-surface mounted FRP reinforcement. *Composite Structures,* 2014, 110, stránky 88-97.

35. **Zigler, Radek a Pokorný, Marek.** Fire protection of timber structures strengthened with FRP materials. *The civil engineering journal*. 2015, Sv. 4, 22.
36. **Franke, S., Franke, B. a Harte, A. M.** Failure modes and reinforcement techniques for timber beams – State of the art. *Construction and Building Materials*. 2015, 97, stránky 2-13.
37. **Schober, K., a další.** FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*. 2015, 97, stránky 106-118.
38. **Xu, H., Nakao, T. a Tanaka, C.** Effects of fiber length and orientation on elasticity of fiber-reinforced plywood. *Journal of Wood Science*. 1998, 44, stránky 343-347.
39. **Sozen, E., Tankut, N. a Tankut, A. N.** Determination of Shear Strength and Fire Performance of Plywood Supported by Woven E-Glass Fiber. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*. Únor 2016, Sv. 3, 2, stránky 4063-4068.
40. **Lopresto, V., Leone, C. a Iorio, I.** Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic. *Compos. Part B*, 2011, Sv. 42, 4, stránky 717-723.
41. **Liu, Q., a další.** Investigation of basalt fiber composite mechanical properties for applications in transportation. *Polym. Composite*. 2006, Sv. 27, 1, stránky 41-48.
42. **Novitskii, A. G.** High-temperature heat-insulating materials based on fibers from basalt-type rock materials. 2004, Sv. 45, 2, stránky 144-146.
43. **Kramár, S. a Král, P.** Reinforcing effect of a thin basalt fiber-reinforced polymer plywood coating. *BioResources*. 21. Únor 2019, Sv. 14, 1, stránky 2062-2078.
44. **Betts, S. C., Miller, T. H. a Gupta, R.** Location of the neutral axis in wood beams: A preliminary study. *Wood Mater. Sci. Eng.* 2010, Sv. 5, 3-4, stránky 173-180.
45. **Ribeiro, A. S., Lima, A. M. a Lousada, J.** Study of strengthening solutions for glued-laminated wood beams of maritime pine wood. *Construction and Building Materials*. 2009, Sv. 23, 8, stránky 2738-2745.
46. **Fiore, V., a další.** A review on basalt fibre and its composites. *Compos. Part B-Eng.* 2015, 74, stránky 74-94.
47. **Bal, B. C.** Flexural properties, bonding performance and splitting strength of LVL reinforced with woven glass fiber. *Construction and Building Materials*. 2013, 51, stránky 9-14.
48. **Ross, R. J., Soltis, L. A. a Windorski, D. F.** Feasibility of Fiberglass-Reinforced Bolted Wood Connections. *Forest Products Journal*. 21. Květen 2016.
49. *DYAS beech*. [Certifikát ISO9001] místo neznámé, Česká republika : Dyas.eu.
50. [Online] <https://www.demos-trade.cz/preklizka-vodovzdorna-surova-briza-multi-cp-cp-2500-1250-9/>.

51. *Prohlášení o vlastnostech březové překližky* . [Online] <https://www.demos-trade.cz/podpora-prodeje-cerifikaty/>.
52. Technický list - Čedičový Roving. Šumperk : BASALTEX a.s., 2012.
53. *Vlastnosti čedičového vlákna* . [Technický list ] místo neznámé : BASALTEX a.s. .
54. *Laminační pryskyřice LH 160 - Návod k použití, technické listy*. [Technický list] místo neznámé : Společnost Havel Composites CZ s.r.o. (Havel), 2021.
55. **ČSN EN 408+A1**: *Dřevěné konstrukce – Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo – Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností*. [Česká technická norma] Prosinec 2012.
56. **ČSN EN EN 314-1**: *Překližované desky – Kvalita lepení – Část 1: Metody zkoušení*. [Česká technická norma ] Srpen 2005.
57. **ČSN EN 14080**: *Dřevěné konstrukce - Lepené lamelové dřevo a lepené rostlé dřevo - Požadavky: Zkouška delaminace lepených spár* . [Česká státní norma] Listopad 2013.

## Seznam obrázků

<b>Obrázek 1)</b> Ukázka skleněných GFRP vláken (vlevo) a konečného produktu kompozitního „I“ nosníku vyrobeného z tohoto typu vláken (vpravo). [7; 8].....	4
<b>Obrázek 2)</b> Ukázka uhlíkových CFRP vláken (vlevo) a konečného produktu výztužné lamely vyrobené z tohoto typu vláken (vpravo). [9; 3].....	5
<b>Obrázek 3)</b> Ukázka aramidových AFRP vláken (vlevo) a konečného produktu výztužné tkaniny vyrobené z tohoto typu vláken (vpravo). [10; 11].....	5
<b>Obrázek 4)</b> Ukázka čedičových BFRP vláken (vlevo) a konečných produktů výztužných tyčí vyrobených z tohoto typu vláken (vpravo). [14; 15].....	6
<b>Obrázek 5)</b> Ukázka uhlíkových CFRP lamel (vlevo) a jejich využití způsobem povrchového zesilování stropní konstrukce (vpravo). [19; 20] .....	9
<b>Obrázek 6)</b> Ukázka uhlíkové CFRP tkaniny (vlevo) a její využití způsobem povrchového zesilování stropního trámu (vpravo). [21].....	10
<b>Obrázek 7)</b> Ukázka skleněné, uhlíkové a kombinované FRP výztuže ve formě tyčí (vlevo) a jejich využití způsobem uložení do betonové směsi (vpravo). [3; 22].....	10
<b>Obrázek 8)</b> Ukázka skleněných FRP vláken rozptýlených v betonových prvcích. [23].....	11
<b>Obrázek 9)</b> Ukázka způsobu vyztužení předpětím betonových dílců pomocí interně uložených lan (vlevo) a externě přiložených uhlíkových lamel (vpravo). [25; 26].....	12
<b>Obrázek 10)</b> Ukázka způsobu dodatečného zesilování trámových a stropních konstrukcí pomocí uhlíkových CFRP lamel: a) + b) zesílení dřevěných trámových nosníků v ohybu, c) zvýšení ohybových a smykových pevností u železobetonového stropního nosníku, d) křížení CFRP lamel pro vyztužení stropní konstrukce. [29; 30] .....	15
<b>Obrázek 11)</b> Ukázka způsobů zesílení sloupů za pomoci FRP tkaniny a rozložení příčného napětí u sloupů různých průřezů: a) ovinutí jednosměrnou tkaninou, b) ovinutí obousměrnou tkaninou, c) kruhový průřez, d) rektangulární průřez. [31].....	16
<b>Obrázek 12)</b> Ukázka způsobu vyztužení prvků aplikací FRP tkanin: a) + b) ovinutí betonového sloupu, c) vyztužení betonové stropní desky, d) zesílení betonových stropních trámů. [30; 32; 33] .....	17
<b>Obrázek 13)</b> Schéma rozvržení rozměrů úložné drážky pro FRP výztuže u betonového prvku. [34].....	17
<b>Obrázek 14)</b> Příklady způsobu uložení FRP výztuží ve formě tyčí nebo lamel do drážek s polymerním pojivem. [35].....	18

<b>Obrázek 15)</b> Způsoby propojení nového a stávajícího dřevěného prvku pomocí FRP výztuží: a) vnitřní vyztužení dřevěného nosníku, b) vnější vyztužení trámu s přímým spojením, c) vnější vyztužení zhlaví nosníku se zešíkmeným spojením. [36; 37] .....	18
<b>Obrázek 16)</b> Umístění FRP výztuže: a) referenční nevyztužená buková překližovaná deska, b) BFRP na straně tlačené části desky, c) BFRP na straně tahové části desky. [43].....	20
<b>Obrázek 17)</b> Ukázka změn poloh neutrálních os u vzorků s odlišným umístěním vyztužující BFRP tkaniny v tlačené/tahové části a jinou orientací dřevních vláken. [43] .....	22
<b>Obrázek 18)</b> Rozložení lepených bukových dých a skleněné výztužné tkaniny (vlevo) a vazebné linie referenčních nevyztužených a vyztužených vzorků (vpravo). [39] .....	22
<b>Obrázek 19)</b> Uspořádání systému CFRP/dýha (nahore) a orientace uložených krátkých uhlíkových vláken. [38] .....	24
<b>Obrázek 20)</b> Čedičová mřížka s plošnou hmotností 120 g/m <sup>2</sup> (vlevo), zvětšena 20× (vpravo). 29	
<b>Obrázek 21)</b> Čedičová tkanina s plošnou hmotností 395 g/m <sup>2</sup> (vlevo), zvětšena 50× (vpravo).30	
<b>Obrázek 22)</b> Čedičová tkanina s plošnou hmotností 556 g/m <sup>2</sup> (vlevo), zvětšena 50× (vpravo).30	
<b>Obrázek 23)</b> Ukázka navrženého uspořádání překližované desky a BFRP tkaniny – 1× BFRP (vlevo), 2× BFRP (vpravo). .....	31
<b>Obrázek 24)</b> Ukázka formátování a přípravy na lepení překližovaných desek a BFRP tkanin. 32	
<b>Obrázek 25)</b> Ukázka způsobu lepení vzorků: a) lepení vzorků při působení lisovacího tlaku, b) výsledná vytvrzená deska s BFRP výztuží, c) boční pohled na jednotlivé lepené vrstvy systému dřevo/BFRP.....	33
<b>Obrázek 26)</b> Schématická ukázka těles vytvořených z březového dřeva se stanovenými rozměry a příčnými řezy: a) vzorek 1× BFRP, b) vzorek 2× BFRP (hodnoty uvedeny v mm). [56] .....	34
<b>Obrázek 27)</b> Připravená zkušební tělesa 2× BFRP o rozměrech 27 × 27 × 513 mm (vlevo) a tělesa 1× BFRP o rozměrech 18 × 18 × 342 mm (vpravo). .....	34
<b>Obrázek 28)</b> Grafická ukázka zatěžovacího přístroje pro stanovení pevnosti v ohybu za působení .....	35
<b>Obrázek 29)</b> Zkouška pevnosti v ohybu za působení 4–bodového namáhání spolu se stanovením modulu pružnosti za pomoci tenzometrického snímače umístěný v místě namáhaném ohybem. ....	35
<b>Obrázek 30)</b> Ukázka porušení zkušebních těles po působení ohybového namáhání na vodorovnou (horní vzorky) a svislou orientaci lepené spáry (dolní vzorky). .....	36

<b>Obrázek 31)</b> Schématická ukázka úpravy vzorku 1× BFRP pro smykovou zkoušku (hodnoty uvedeny v mm). [56].....	36
<b>Obrázek 32)</b> Zkušební vzorek upnutý v rýhovaných čelistech tahového zkušebního stroje s připevněným extenzometrem MFA2.....	37
<b>Obrázek 33)</b> Úprava zkušebních těles: a) vzorek 1× BFRP se smykovou plochou ve výztuži, b) vzorek 2× BFRP se smykovou plochou ve výztuži, c) vzorek 2× BFRP se smykovou plochou v překližované části tělesa.....	38
<b>Obrázek 34)</b> Ukázka porušení tělesa (1× 556 buk) po namáhání v místě smykové plochy výztuže s 55% kohezním porušením v dřevní části vzorku.....	38
<b>Obrázek 35)</b> Ukázka zkušebních těles umístěné v expozičním prostředí o teplotě 180 °C a příklad porušení vzorku (1× REF bříza) po smykové zkoušce se 40% kohezním porušením ve dřevní části. ....	39
<b>Obrázek 36)</b> Ukázka referenčního vzorku (vlevo) a vzorku s čedičovou tkaninou o plošné hmotnosti 556 g/m <sup>2</sup> (vpravo) před zkušebním cyklem zatěžování. ....	40
<b>Obrázek 37)</b> Ukázka způsobu porušení a měření delaminace zkoušeného vzorku 2× REF.....	40

## Seznam tabulek

<b>Tabulka 1)</b> Průměrné hodnoty mechanických vlastnosti jednotlivých typů FRP vláken. [6].....	3
<b>Tabulka 2)</b> Charakteristické vlastnosti nejčastěji používaných polymerních matric. [16] .....	7
<b>Tabulka 3)</b> Specifikace použitých překližovaných desek z březového a bukového dřeva. [51; 49] .....	28
<b>Tabulka 4)</b> Specifické vlastnosti čedičového vlákna v použitých výztužných tkaninách. [53].	29
<b>Tabulka 5)</b> Technické údaje epoxidového lepidla systém 160/285 (HAVEL). [54] .....	31
<b>Tabulka 6)</b> Průměrné hodnoty pevnosti v ohybu a modulu pružnosti systému dřevo/BFRP. ...	41
<b>Tabulka 7)</b> Průměrné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení systému dřevo/BFRP. .....	42
<b>Tabulka 8)</b> Průměrné hodnoty pevnosti ve smyku a kohezního porušení systému dřevo/BFRP po vystavení zvýšené teploty 180 °C.....	43
<b>Tabulka 9)</b> Průměrné hodnoty delaminace v lepených spárách překližované části tělesa a výztuže u systému dřevo/BFRP.....	44
<b>Tabulka 10)</b> Průměrné hodnoty pevností ve smyku březové překližované desky při referenční teplotě 20 °C a při vystavení zvýšené teplotě 180 °C. ....	54
<b>Tabulka 11)</b> Průměrné hodnoty kohezního porušení březové překližované desky při referenční teplotě 20 °C a při vystavení zvýšené teplotě 180 °C. ....	54

## Seznam grafů

<b>Graf 1)</b> Změna polohy neutrální osy při maximálním zatížení u vzorků s podélným směrem dřevních vláken povrchové dýhy. [43].....	21
<b>Graf 2)</b> Změna polohy neutrální osy při maximálním zatížení u vzorků s příčným směrem dřevních vláken povrchové dýhy. [43].....	21
<b>Graf 3)</b> Grafické vyhodnocení výsledků smykových pevností vztažené na různé varianty vzorků. [39].....	23
<b>Graf 4)</b> Grafické znázornění pevnosti v ohybu březové překližované desky v závislosti na typu, množství vrstev a orientace vyztužení. ....	45
<b>Graf 5)</b> Grafické znázornění pevnosti v ohybu bukové překližované desky v závislosti na typu, množství vrstev a orientace vyztužení. ....	46
<b>Graf 6)</b> Grafické znázornění modulu pružnosti březové překližované desky v závislosti na typu, množství vrstev a orientace vyztužení. ....	48
<b>Graf 7)</b> Grafické znázornění modulu pružnosti bukové překližované desky v závislosti na typu, množství vrstev a orientace vyztužení. ....	49
<b>Graf 8)</b> Grafické znázornění pevnosti ve smyku březové překližované desky v závislosti na typu a množství vrstev vyztužení a místa zkoušené plochy.....	50
<b>Graf 9)</b> Grafické znázornění kohezního porušení březové překližované desky v závislosti na typu a množství vrstev vyztužení a místa zkoušené plochy.....	51
<b>Graf 10)</b> Grafické znázornění pevnosti ve smyku bukové překližované desky v závislosti na typu a množství vrstev vyztužení a místa zkoušené plochy.....	52
<b>Graf 11)</b> Grafické znázornění kohezního porušení bukové překližované desky v závislosti na typu a množství vrstev vyztužení a místa zkoušené plochy.....	53