

# 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

# FRP KOMPOZITNÍ MATERIÁLY PRO VYZTUŽOVÁNÍ BETONU

FRP FOR CONCRETE REINFORCEMENT

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Aneta Blahová

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2020



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Aneta Blahová
<b>Název</b>	FRP kompozitní materiály pro vyztužování betonu
<b>Vedoucí práce</b>	doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2019
<b>Datum odevzdání</b>	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

---

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

---

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

## PODKLADY A LITERATURA

440.3R-12 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, 2012  
ASTM D7205 / D7205M - 06(2016) Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars  
Bodnárová, L. Kompozitní materiály, učební opora VUT Brno, FAST, 2007  
Sborníky z tuzemských a zahraničních konferencí (2015-2018)  
České a zahraniční technické normy  
Internetové zdroje (např. databáze Web of Science, Scopus).

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Kompozitní výztuže (FRP – Fiber Reinforced Polymer) jsou tvořeny jednosměrně orientovanými vlákny a pojivem z polymerní matrice. FRP výztuže jsou využívány především v betonových konstrukcích vystavených působení různých agresivních prostředí (např. v chemickém průmyslu, v energetice, v oblastech výskytu bludných proudů). Důležitým faktorem pro správnou funkci výztuže je zajištění dobrého spolupůsobení výztuže a betonu.

Na základě rešerší z odborné literatury popište způsob výroby FRP výztuží. Uveďte materiály používané pro výrobu FRP výztuží. Proveďte rešerši informací z oblasti problematiky trvanlivosti FRP výztuží ve vybraných agresivních prostředích a uveďte konkrétní příklady aplikací FRP výztuží v konstrukcích. Zaměřte se také na faktory ovlivňující soudržnost FRP výztuže s betonem. Navrhněte experiment pro ověření působení FRP výztuže v betonu. Definujte postupy pro hodnocení soudržnosti FRP a betonu.

Doporučený rozsah práce 40-50 stran.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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

Bakalářská práce se zabývá kompozitní polymerní FRP výztuží. Popisuje způsob výroby FRP výztuží, jaké jsou jejich vlastnosti a z jakých materiálů se mohou vyrábět. Uvádí příklady aplikace FRP výztuží v konstrukčních prvcích. Dále zmiňuje trvanlivost FRP výztuží v agresivních prostředí a soudržnost FRP výztuží s betonem. Závěr práce tvoří návrh experimentálního zkoušení soudržnosti FRP výztuže s betonem.

## KLÍČOVÁ SLOVA

FRP výztuž, kompozit, vlákna, skleněná vlákna, uhlíková vlákna, aramidová vlákna, čedičová vlákna, matrice, pryskyřice, vinylester, epoxid, polyester, trvanlivost, soudržnost, pultruze, zkoušení FRP výztuže.

## ABSTRACT

The bachelor thesis deals with composite polymer FRP reinforcement. It describes the method of manufacturing FRP reinforcements, which are their properties and what materials are used by manufacturers. Lists FRP reinforcement application in various structures. Also mentions the durability of FRP reinforcement in an aggressive environment and the cohesiveness of FRP reinforcement with concrete. The conclusion of the work is a proposal for experimental testing of a bond between FRP reinforcement and concrete.

## KEYWORDS

FRP reinforcement, composite, fibers, glass fibers, carbon fibers, aramid fibers, basalt fibers, matrix, resin, vinyl ester, epoxy, polyester, durability, cohesion, pultrusion, FRP reinforcement testing.



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Aneta Blahová *FRP kompozitní materiály pro vyztužování betonu*. Brno, 2020. 66 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *FRP kompozitní materiály pro vyztužování betonu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 22.5.2020

---

Aneta Blahová  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *FRP kompozitní materiály pro vyztužování betonu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22.5.2020

---

Aneta Blahová  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji své vedoucí diplomové práce doc. Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi velmi pomohly při vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji svému spolužákovi Tomášovi Dokoupilovi za věnovaný čas a podporu.

# OBSAH

OBSAH.....	14
ÚVOD.....	10
CÍL PRÁCE.....	11
1 Kompozitní výztuže z polymerů vyztuženými vlákny .....	12
1.1 Způsob výroby FRP výztuží .....	12
1.2 Obecné vlastnosti FRP výztuží .....	14
1.3 Materiály pro výrobu FRP výztuží .....	16
1.3.1 Druh vláken pro vyztužování polymerů .....	16
1.3.1.1 Skleněná vlákna .....	17
1.3.1.2 Uhlíková vlákna.....	19
1.3.1.3 Aramidová (kevlarová) vlákna .....	20
1.3.1.4 Čedičová vlákna.....	21
1.3.2 Matrice pro výrobu FRP výztuží .....	22
1.3.2.1 Epoxidy .....	22
1.3.2.2 Polyestery.....	23
1.3.2.3 Vinylestery.....	23
2 Trvanlivost FRP výztuží v agresivních chemických prostředích.....	25
2.1 Hlavní parametry ovlivňující trvanlivost FRP výztuží .....	25
2.2 Vliv kapalin a vlhkosti na trvanlivost FRP výztuží .....	26
2.3 Vliv zásaditého prostředí a vliv mořské vody na trvanlivost FRP výztuží.....	27
2.4 Vliv cyklického zmrazování a rozmrazování a mrazu na trvanlivost FRP výztuží.....	30
2.5 Trvanlivost FRP výztuží se skleněnými vlákny v betonu .....	31
2.6 Testování odolnosti FRP výztuží v alkalickém prostředí .....	32
3 Aplikace FRP výztuží v konstrukcích .....	36
3.1 Mosty .....	36
3.2 Železnice.....	37

3.3	Parkovací domy .....	38
3.4	Vlnolamy .....	38
3.5	Opěrné stěny .....	39
3.6	Těžební průmysl a stavba tunelů .....	39
3.7	Přistávací dráhy .....	40
3.8	Zdravotnické a informační technologie .....	40
4	Soudržnost FRP výztuží s betonem .....	41
4.1	Faktory ovlivňující soudržnost FRP s betonem .....	41
4.2	Metody pro hodnocení soudržnosti FRP s betonem .....	42
5	Návrh experimentu pro ověření spolupůsobení FRP výztuže a betonu .....	46
	Závěr .....	51
	Seznam zkratk .....	53
	Seznam použitých zdrojů .....	54
	Firep., (2016). <i>Vienna International Airport</i> . [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: 62 <a href="https://sites.google.com/a/firepworld.com/en2/case/vienna-international-airport?overridemobile=true&amp;fbclid=IwAR238VJ47wEq8LZfnpt7vpSzm_UbcwltP7JDUHzipagKXzvTWTA8CnnP2Vf4">https://sites.google.com/a/firepworld.com/en2/case/vienna-international-airport?overridemobile=true&amp;fbclid=IwAR238VJ47wEq8LZfnpt7vpSzm_UbcwltP7JDUHzipagKXzvTWTA8CnnP2Vf4</a> .....	62
	Seznam obrázků .....	63
	Seznam tabulek .....	65
	Seznam grafů .....	66

## ÚVOD

Kompozitní výztuže z polymerů vyztuženými vlákny (Fiber Reinforced Polymers) (dále jen FRP) se začaly průmyslově používat v posledních třech dekadách a v dnešní době se ročně použije v konstrukcích až 10 milionů metrů. Existuje řada důvodů, proč používat FRP, jako je zvýšená trvanlivost, elektromagnetická neutralita, skvělé mechanické vlastnosti, výrazně nižší hmotnost a vysoká odolnost v agresivním prostředí. FRP kompozity se vyznačují rozmanitými vlastnostmi a mohou být upraveny pro konkrétní využití. Pro větší rozšíření FRP výztužných prvků je často významným limitujícím faktorem jejich cena. Použití FRP výztuží má však své opodstatnění ve speciálních aplikacích, kde se uplatní jejich výjimečné vlastnosti.

## **CÍL PRÁCE**

Cílem této práce je sumarizace informací o problematice užití kompozitních výztuží s polymerní matricí a dlouhovláknovou výztuží (FRP - Fiber Reinforced Polymer), a to jak z oblasti materiálové skladby FRP výztuží (materiály vláken a matrice), tak popsání způsobu výroby FRP výztuží a možnosti jejich aplikace v konstrukcích. S tím úzce souvisí trvanlivost FRP výztuží. Je provedena rešerše informací z oblasti trvanlivosti FRP výztuží ve vybraných agresivních prostředí. Práce sleduje aspekty, které mohou ovlivňovat soudržnost FRP výztuží s betonem a uvádí zkoušky pro hodnocení soudržnosti FRP výztuží s betonem.

# 1 Kompozitní výztuže z polymerů vyztuženými vlákny

Výztuže z polymerů vyztuženými vlákny (Fiber Reinforced Polymers) (dále jen FRP) jsou perspektivními materiály pro vyztužování betonů. Kombinace výztužných vláken a polymerní matrice je typickým příkladem kompozitu.

Bodnárová ve své publikaci definuje kompozitní materiály takto: „*Kompozity jsou takové heterogenní materiály, u kterých se po smíšení materiálů se zcela odlišnými vlastnostmi vytvoří jediná struktura; jestliže se tyto vlastnosti doplňují, vzniká materiál s přídatnými nebo lepšími vlastnostmi, než mají jednotlivé složky samy, nebo smíšené dohromady.*“ Z této definice vychází vyvolání synergického účinku, který má za následek získání lepších vlastností pro nově vzniklý materiál. [4]

Vztah pro synergický účinek:  $1 + 1 = 3$

Definice kompozitních materiálů: „*Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou (fází) samostatně ani prostou sumací.*“ [3]

U FRP výztuží se setkáváme se zastoupením skleněných, uhlíkových, čedičových a aramidových (kevlarových) vláken. Vlákna tvoří základní nosný prvek kompozitu a ovlivňují jej v podélném směru. Matrice má za úkol udržet jednotlivá vlákna pospolu, určuje tvar prvku, chrání vlákna před působením okolních vlivů a přenáší tahové namáhání z betonu do vláken. Kombinací správného typu a množství vláken s matricí získáme finální fyzikálně mechanické vlastnosti. Jako matrice pro FRP výztuže se nejčastěji používají polyesterové, vinylesterové a epoxidové pryskyřice. [5]

## 1.1 Způsob výroby FRP výztuží

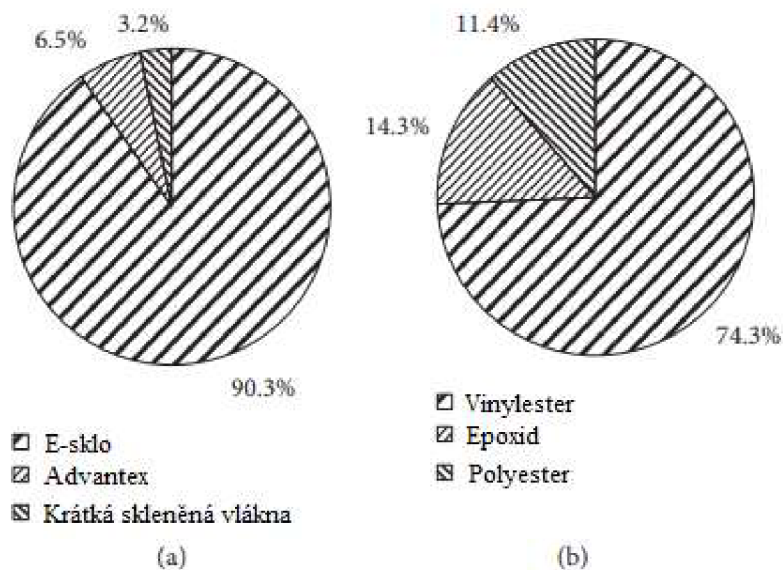
FRP výztuže se vyrábí pultruzí, což je kontinuální výrobní proces, kdy jsou výztužná vlákna smáčena pryskyřicí a jsou tažena jednotlivými výrobními kroky. Při tomto procesu je možné dosáhnout různých tvarů i délek. Jako vstupní produkty jsou používány pryskyřice v tekutém stavu a požadovaná výztuž. Ve výrobním procesu jsou vlákna tažena přes vyhřátou ocelovou formu. Nejčastěji se jedná o skleněná vlákna, která jsou ve formě rovingu. Nejprve jdou do srovnávače, který zajistí správné rozmístění vláken v průřezu. Poté se výztuž kontinuálně impregnuje tekutou pryskyřicí a přechází



do tvarovače, kde je po vytvarování konečného profilu výztuže vytvrzena. Ve finální části je výztuž odtahována a řezána na požadované délky. Pro dosažení požadovaných vlastností finálního výrobku je nezbytné, aby při výrobním procesu bylo dosaženo dokonalého spojení matrice s vlákny. Výrobní proces obvykle pokračuje aplikací povrchové ochrany dle požadavků na výztuž (opískování, ovíjení apod.). [5] [9]



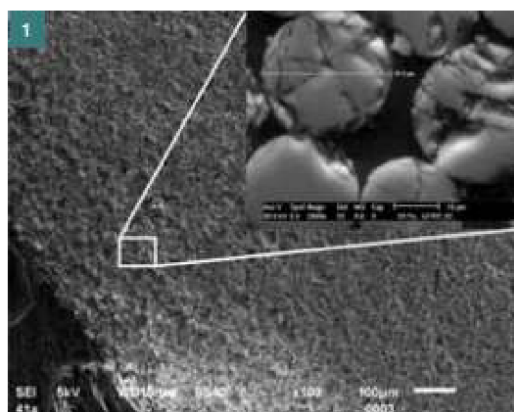
*Obrázek 1 Snímek pultruzní linky pro výrobu FRP výztuže [5] [10]*



Graf 1 Procentuální zastoupení jednotlivých složek v kompozitu vyztužených skleněnými vlákny (GFRP glass fiber reinforced plastics . a) formy skleněných vláken. b) druhy matric [1] (přeloženo)

## 1.2 Obecné vlastnosti FRP výztuží

Kompozitní FRP výztuž je heterogenní materiál skládající se ze dvou částí. Funkcí výztužné složky je nosnost, čehož je dosaženo jednosměrně orientovanými vlákny. Druhá složka je tvořena polymerní matricí, která má funkci pojiva. Spojením obou složek dostaneme nové výsledné vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou závislé na vzájemném poměru a typu vstupních složek. [10]



Obrázek 2 Snímky řezu FRP výztuže z elektronového mikroskopu, zvětšeno 100x (výřez 2000x) [5]

Výhody kompozitních FRP výztuží ve srovnání s ocelovými najdeme ve vysoké odolnosti proti chemikáliím, korozivzdornosti, nízké hmotnosti, nevodivosti, netečnosti

vůči působení elektromagnetického záření a bludných proudů. Díky tomu nachází FRP výztuže uplatnění primárně v chemickém průmyslu (ČOV, výroby a sklady chemikálií, opěrné stěny vystavěné mořské vodě), energetice (kolektory, potrubní kanály), v dopravě (výztuže v betonových vozovkách) a pro základové konstrukce. [10]

Nejčastěji používané jsou kompozitní výztuže se skleněnými vlákny (GFRP), uhlíkovými vlákny (CFRP), aramidovými (AFRP) nebo čedičovými vlákny (BFRP). V těchto výztužích jsou vlákna ze zmíněných materiálů obvykle spojena matricí z termosetických pryskyřic.

*Tabulka 1 Základní informace o vybraných typech FRP výztuží [11] (přeloženo)*

Typ výztužných vláken	Obchodní označení	Výrobce	Typ vláken/matrice	Procentuální zastoupení vláken (%)	Způsob výroby
SKLO	V.Rod®	Pultrall®, Canada	E - sklo/vinylester	65	Pultruze
UHLÍK	Carbopree®	Sireg®, Italia	Uhlík/vinylester	65	Pultruze
ARAMID	Fibra®	Fibex®, Japan	Kevlar 49®, Aramid/epoxid	60	Spletená vlákna

*Tabulka 2 Typy FRP výztuží (PREFA REBAR) [10]*

TYPY VÝZTUŽE			
Typ vláken	E-CR sklo	E-CR sklo HS uhlík	HS uhlík
Pryskyřice	Epoxid / Vinylester		
Povrchová úprava	Ovíjení s následným pískováním		
Vyráběné průměry [mm]	6-18	12-18	6-18

Tabulka 3 Mechanické a fyzikální vlastnosti FRP výztuži (PREFA REBAR) [10]

MECHANICKÉ A FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI					
			GFRP	C-GFRP	CFRP
Pevnost v tahu (střední)	$f_{f,m}$	[MPa]	> 1100*	> 1100*	> 1850*
Pevnost v tahu (charakteristická)**	$f_{f,k}$	[MPa]	> 1050*	> 1050*	> 1700*
Modul pružnosti (střední)	$E_{f,m}$	[GPa]	> 50*	> 75*	> 94*
Pevnost ve smyku/stříhu (střední)	$f_{s,m}$	[MPa]	150	175	220
Pevnost ve smyku/stříhu (charakteristická)**	$f_{s,k}$	[MPa]	125	150	170
Teplotní roztažnost – podélný směr	$\lambda_L$	[K <sup>-1</sup> ]	$6 \times 10^{-6}$	$6 \times 10^{-6}$	$\approx 0,0$
Teplotní roztažnost – příčný směr	$\lambda_r$	[K <sup>-1</sup> ]	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
Hustota	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	2100	2100	1700
Charakteristické hodnota [EC] Enviromentalní redukční faktor			1,3	1,3-1,0	1,0

\* v závislosti na zvoleném průměru výztuže

\*\* v souladu s ČSN EN 1990 uvážen 5% kvantil

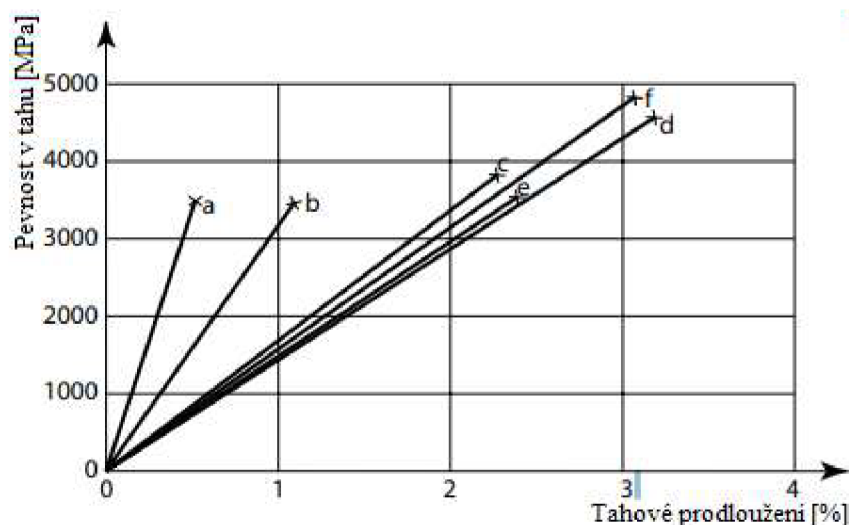
### 1.3 Materiály pro výrobu FRP výztuží

#### 1.3.1 Druh vláken pro vyztužování polymerů

Vlákna se používají v polymerních kompozitech zejména kvůli jejich tuhosti, pevnosti a nízké hmotnosti. Orientace molekul ve směru vláken zajišťuje vyšší pevnost. Vlastnosti vláken, pro které jsou vlákna v kompozitech využívána, jsou zejména: vysoký modul pružnosti, vysoká pevnost při tahovém působení, nízká odchylka pevnostních charakteristik pro jednotlivá vlákna, stabilní vlastnosti při manipulaci a výrobě, jednodušnost vnějšího povrchu a průměrů vlákna, vysoká trvanlivost, dostupnost v požadovaných formách a přijatelná cena. [2]

Nejčastěji používaná vlákna pro výrobu FRP výztuží jsou skleněná, uhlíková a aramidová (kevlarová) vlákna. V poslední době se začala používat průmyslově vyráběná čedičová vlákna. Vlákna se vyznačují lineární plasticitou od počátku zatěžování až do

porušení, aniž by byly vidět okem znatelné změny. Uhlíková a aramidová vlákna jsou anizotropní, a proto mají odlišné hodnoty mechanických a teplotní vlastností v různých směrech. Naopak skleněná vlákna, stejně jako čedičová, jsou izotropní. [2]



Graf 2 Tahová deformační křivka jednotlivých vláken: a) uhlíková (vysokomodulová HM); b) uhlíková (vysokopevnostní HS); c) aramidová (Kevlar 49); d) S - skleněná; e) E - skleněná; f) čedičová [2] (přeloženo)

### 1.3.1.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou nejčastěji používaná vlákna pro polymerní kompozitní materiály. Pro výrobu se používá kontinuální technologie. Sklářský kmen se roztaví a žhavé sklo o teplotě 1560 °C se tvaruje tažením do souvislých vláken. Prochází přes platinoiridiové perforované destičky, odkud se vytahuje vlákno (průměr 3,5-20 μm), které se poté navíjí na buben. Teplota má podstatný vliv na modul pružnosti a viskozitu. Zásadní faktor je chemické složení skleněného vlákna a počáteční teplota tuhnutí taveniny. S rostoucí teplotou se snižuje modul pružnosti vláken a mění se viskozita směsi. V průběhu výroby se vlákna lubrikují pro zajištění lepšího přilnutí k matrici. Přidáním vazebného činidla při namáčení vláken získají jednotlivé vrstvy pružnost a zvýší se jejich vazebné síly a naopak se sníží množství pórů. [2] [4]

Nejčastěji používaná skleněná vlákna jsou E - skleněná, S - skleněná a alkalivzdorná skleněná vlákna. E-skleněná vlákna jsou nejlevnější ze všech typů skleněných vláken a také nepoužívanější. Vyrábí se z bezalkalické skloviny (max. 1 % alkálií). Skládají se ze soustavy oxidů  $\text{SiO}_2$ . $\text{Al}_2\text{O}_3$ . $\text{CaO}$ . $\text{MgO}$ . $\text{B}_2\text{O}_3$ . Mají vysoký elektrický odpor, odolávají dobře vodě i  $\text{CaCl}_2$ , ale mají špatnou chemickou odolnost proti

kyselinám a alkáliím. S - skleněná vlákna mají vyšší pevnost v tahu (o 33 %) a modul pružnosti (o 12 %) než E - skleněná vlákna. Skládají se z  $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ . Využití najdeme nejen ve stavebnictví, ale také v leteckém a raketovém průmyslu. Vlivem vyšší ceny S - skleněných vláken jsou méně používaná než E - skleněná vlákna. Přidáním zirkonia získají skleněná vlákna alkalivzdornost, která zvyšuje ochranu proti vzniku koroze v cementové matrici. Další skleněná vlákna, která jsou ale méně využívána a známá, jsou D – skleněná, C - skleněná a L – skleněná vlákna. Skleněná vlákna typu D mají nízkou dielektrickou konstantu, a proto své uplatnění najdou v elektrotechnice, energetice a elektronice. Ve srovnání s typem E mají horší mechanické vlastnosti. Typ C je chemicky odolný a v porovnání s typem E je i odolnější proti kyselinám, má ale horší mechanické vlastnosti. V poslední řadě skleněné vlákno L je speciální, jelikož obsahuje olovo a tím omezuje propustnost RTG záření. Proto jeho využití najdeme především v lékařství, vojenství a ve vědeckých přístrojích. [2] [4]

*Tabulka 4 Vlastnosti jednotlivých druhů skel [4]*

Sklo	E	S	D	C	L
Hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	2540	2490	2160	2490	4300
Pevnost v tahu [GPa]	3,5	4,65	2,45	2,8	1,68
Modul pružnosti v tahu [GPa]	73,5	86,8	52,5	70,0	51,1
Poměrné prodloužení do meze pevnosti [%]	4,8	5,4	4,7	--	--
Dielektrická konstanta, 20°C, $10^6$ [Hz]	5,8	4,53	3,56	6,24	9,49



*Obrázek 3 Profil se skleněnými vlákny [6]*

### 1.3.1.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna vynikají ve své pevnosti, modulu pružnosti, teplotní stálosti a chemické odolnosti. Vlastnosti uhlíkových vláken jsou neměnné i při vysokých teplotách, kde ostatní materiály neobstojí. [4]

Z velké části jsou uhlíková vlákna vyráběna termo rozkladem polyacrylonitrilu (PAN) nebo viskóзовých vláken. Další možností jsou anizotropní smoly (pitch), které se zvlákňují v tavenině. Uhlíková a grafitová vlákna se mohou zaměňovat, ale jsou zde výrazné rozdíly v ohledu molekulární struktury. Grafit tvoří atomy uhlíku uspořádané do pravidelných šestihranů v rovnoběžných krystalografických rovinách. Zatím co u uhlíku (karbonu) je pouto mezi rovinami slabé, proto jejich uspořádání je pouze dvojrozměrné. [2] [4]

Výrobní proces: Oxidace vláken probíhá v rozmezí teplot 200 °C až 300 °C, následována dvěma karbonizacemi v inertní atmosféře při teplotě 1000 °C až 1500 °C a 1500 °C až 2000 °C. Poté následuje grafitizace v inertní atmosféře při teplotě 2500 °C – 3000 °C. Na začátku se provádí karbonizace polyakrylového vlákna, kde je potřeba vyvarovat se roztavení, či zreagování vlákna na nechtěnou formu. Aby bylo dosaženo správné orientace molekul ve směru vláken, musí se zvlákňovat pod napětím, čímž se dosáhne lepšího modulu pružnosti a pevnosti. [2] [4]

Uhlíková vlákna můžeme rozdělit na dva typy. První typ je pevnější a získává se při teplotě 900 °C až 1500 °C. Nazývají se vysokopevnostní uhlíková vlákna, jinak označovaná HS („*high strenght*“). Pokud dále karbonizujeme vysokopevnostní uhlíková vlákna při teplotách 2000 °C až 2800 °C, získáme druhý typ – vysokomodulová vlákna, který má vyšší modul pružnosti v tahu, ale nižší tahovou pevnost. Vysokomodulová vlákna se jinak označují HM („*high modulus*“) [7]

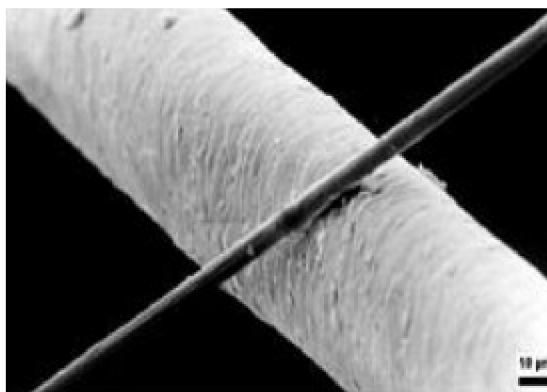
Grafitizací se docílí vyššího tahového modulu. Uhlíková vlákna jsou průmyslově dostupná v dlouhých kontinuálních spleteních, které tvoří 1000 až 160 000 rovnoběžných vláken. Tyto vlákna se vyznačují vysokou pevností a tuhostí. Tahový modul a pevnost uhlíkových vláken jsou při zvyšující se teplotě stabilnější a odolné vlivům agresivních prostředí. Uhlíková vlákna se chovají elasticky do doby, než dojde k porušení v křehkém lomu. Bohužel velkou nevýhodou je jejich vysoká cena. Pro porovnání s E - skleněnými vlákny jsou 10–30 krát dražší. Cenu vláken zvyšují vstupní suroviny



a výrobní proces karbonizace a grafitizace. V neposlední řadě zvyšuje cenu i lubrikace vláken, která musí proběhnout před tím, než se ukotví v matrici. [2]



Obrázek 4 Profil s uhlíkovými vlákny [6]



Obrázek 5 Uhlíkové vlákno o průměru 6  $\mu\text{m}$  v porovnání s lidským vlasem [8]

#### 1.3.1.3 Aramidová (kevlarová) vlákna

Aramidová (kevlarová) vlákna mohou při zpracování specifickou metodou dosahovat vysokou pevnost a tuhost. Toho je dosaženo jako výsledek usměrnění polymerních řetězců rovnoběžně s podélnou osou vlákna. Jako aramid se běžně označuje skupina organických vláken vyznačujících se nízkou hustotou a nejvyšším poměrem pevnosti v tahu ku hmotnosti vlákna v porovnání s běžně užívanými vlákny. Kevlarová vlákna jsou vyráběna tažením z kapalného roztoku polymeru s částečně orientovanými molekulami. Používá se několik typů kevlaru. Kevlar 29 používáme do kompozitů s nároky na maximální odolnost proti nárazu a poškození, Kevlar 49 je využíván ve vyztužených plastech. Kevlar 149 má ze všech dostupných aramidových vláken nejvyšší tahový modul. Pevnost v tlaku kevlarových vláken nedosahuje více jak 20 % jejich pevnosti v tahu. Kevlar 49 má křehké chování při zátěži tahem, naopak při



vystavení zatížení tlakem je tažný a pohltí velké množství energie. Toto chování odlišuje kevlar od skleněných a uhlíkových vláken a zajišťuje kevlarovým kompozitům lepší odolnost proti nárazu. Kevlar má velmi dobrou únavovou odolnost a může odolat poměrně vysokým teplotám. Pevnost a modul pružnosti klesají úměrně se zvyšující se teplotou, při 180 °C si ale zachovává víc jak 80 % původní pevnosti. Vlákná jsou náchylná na působení UV záření a jejich nasákavost závisí na druhu kevlaru. Jsou odolná proti velkému množství chemikálií, mohou však být rozpouštěna v některých kyselinách i zásadách. [2]



*Obrázek 6 Profil s aramidovými vlákny [6]*

#### 1.3.1.4 Čedičová vlákna

Čedičová vlákna jsou získávána tavením drceného čediče. Mají lepší fyzikálně mechanické vlastnosti než skleněná vlákna, ale jsou výrazně levnější než uhlíková vlákna. Mezi hlavní výhody čedičových vláken patří jejich vysoká odolnost vůči vysokým teplotám - bod měknutí při teplotě 982 °C a bod tavení při teplotě 1450 °C. Pro tyto vlastnosti jsou čedičová vlákna velmi vhodná pro využití v konstrukcích namáhaných vysokou teplotou. Mimo jiné mají výborné akusticky izolační vlastnosti, jsou vhodné jako izolace a jsou odolné vůči chemicky agresivním prostředím. Výzkum a zkoušení čedičových vláken pro vyztužování konstrukcí je trendem až v posledních letech. [2]



*Obrázek 7 Profil s čedičovými vlákny [6]*

### 1.3.2 Matrice pro výrobu FRP výztuží

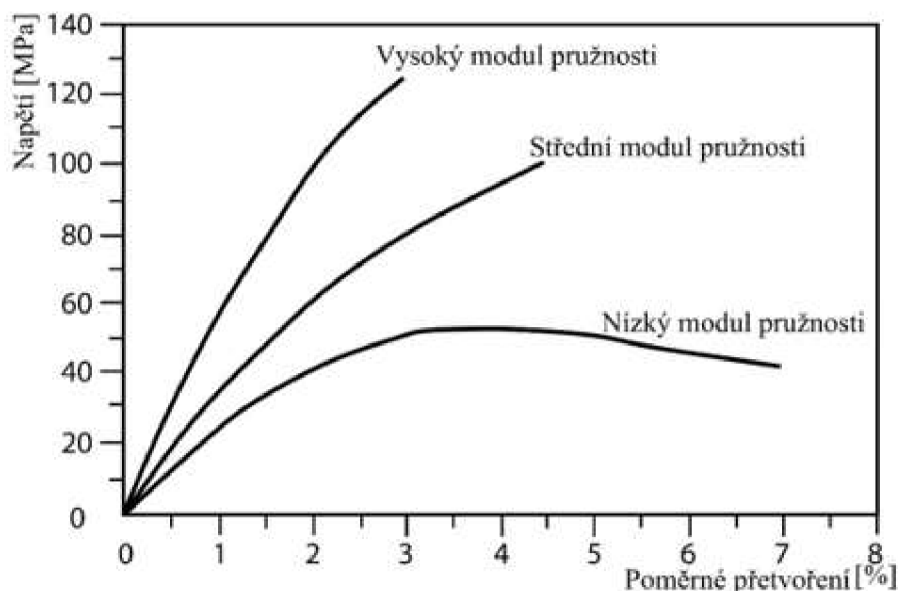
Matrice zajišťuje soudržnost celého systému, pojí dohromady jednotlivá vlákna, přenáší namáhání z vnějšího prostředí do vláken a slouží jako jejich ochrana. Její množství určuje finální vlastnosti kompozitu a dává výztuži její konečný tvar. Matrice je tvořena pryskyřicemi, a to především polyesterovými, vinylesterovými či epoxidovými. Typický modul pružnosti pro pryskyřice je 2-6 GPa a její pevnost v tahu je zhruba 50 – 150 MPa. Samotná matrice má většinou při srovnání s vlákny horší téměř všechny mechanické vlastnosti. Její velkou předností jsou její izolační schopnosti, zpravidla nevede teplo ani elektrickou energii. [4] [5]

#### 1.3.2.1 Epoxidy

Epoxidová matrice spadá do termosetových pryskyřic, které se skládají z nejméně jedné epoxidové skupiny. Při normálních teplotách jsou pryskyřice kapalné až pevné látky. Díky tomu, že epoxidová pryskyřice je vysoce reaktivní, využívá se pro výrobu lepidel, zalévacích a lisovacích hmot a laminátů. Předností epoxidových pryskyřic je nulové nebo minimální odštěpování vedlejších produktů při vytvrzování. Po vytvrzení mají výbornou přilnavost k materiálům (dřevo, sklo, kov, keramika a jiné), výborné mechanické vlastnosti a rozměrovou stálost. [18] [19]

Do epoxidové pryskyřice se přidávají tvrdidla různého typu pro ovlivnění finálních vlastností. Přidávají se v tekuté nebo pevné formě a obsahují vodíkové ionty, které reagují s epoxidovými skupinami. Epoxidové pryskyřice se díky své kvalitě využívají do vysokopevnostních FRP výztuží, kde se nejčastěji aplikují s uhlíkovými vlákny. [20]

Při porovnání s polyesterovou a vinylesterovou matricí můžeme říct, že epoxidová pryskyřice má nejvyšší teplotní odolnost a oproti polyesterové pryskyřici je 3 – 4 krát dražší. [20]



Graf 3 Graf chování matrice z epoxidových pryskyřic různého modulu při zatížení tahem (modul pružnosti matrice je od 2,1 až 6 GPa) [19]

### 1.3.2.2 Polyestery

Polyesterové pryskyřice je možné vytvrzovat za normálních i zvýšených teplot. Stejně jako u epoxidových pryskyřic nevznikají žádné vedlejší těkavé produkty. Při vytvrzování dochází k uvolňování reakčního tepla a smrštění o 5 – 9 %. Smrštění lze snížit přidáním termické složky. Jejich hlavní výhodou je nízká viskozita, dobrá smáčitelnost výztužných vláken, poměrně vysoká rychlost vytvrzování, odolnost proti UV záření a adekvátní cena vzhledem k charakteru pryskyřice. Jejich schopnost odolávat hoření lze posílit přidáním halogenů, čímž se zpomalí čas vzplanutí. Proto se jedná o aktuálně nejvyužívanější matrice v oblasti kompozitních materiálů. [19] [20]

### 1.3.2.3 Vinylestery

Vinylesterové pryskyřice jsou odolné vůči vyšším teplotám, jsou vcelku křehké, ale při porovnání s polyesterovou pryskyřicí jsou více houževnaté, méně viskózní a chemicky odolnější. Vyšší chemická odolnost je dána zesíťováním, které probíhá za pomoci koncových metakrylátových skupin, u kterých se na konci řetězce nacházejí esterové

vazby. Mimo jiné je u nich možné řídit vytvrzovací reakce. Jejich využití je možné najít v korozním prostředí, často ve spojení se skleněnými vlákny. Mohou se aplikovat až do 170 °C a jsou odolné vůči kyselinám, zásadám, peroxidům a rozpouštědlům. I přes to, že mají spoustu kladných vlastností, což z nich dělá preferovanou volbu pro výrobu kompozitních materiálů, jejich negativní stránkou je vysoká cena, vyšší objemové smrštění a menší pojíci schopnost. Za zmínku stojí bromované verze, které mají vysokou schopnost retardace hoření. [19] [20]

## **2 Trvanlivost FRP výztuží v agresivních chemických prostředích**

FRP výztuže se vyznačují zvýšenou odolností vůči působení agresivního a chemického prostředí, vysokou pevností v tahu, nevodivostí, nízkou hmotností a netečností vůči působení elektromagnetického pole (nestíní rádiový signál, neovlivňují jej působení bludných proudů aj.). Nejčastěji jsou používány FRP výztuže se skleněnými vlákny, jelikož mají požadované vlastnosti a jsou nejen dobře dostupné, ale i cenově příznivé. [21]

### **2.1 Hlavní parametry ovlivňující trvanlivost FRP výztuží**

Mezi negativa, která do určité míry ovlivňují využití FRP výztuží, patří například dotvarování (creep), nízká odolnost při působení vysokých teplot nebo v dlouhodobějším horizontu vliv zásaditého prostředí betonu. Zásadité prostředí betonu může ovlivnit trvanlivost skleněných vláken (především E – skleněných a ECR – skleněných vláken (chemical resistant – chemicky odolné)). V případě přímého styku agresivního média s vlákny by došlo k jejich křehnutí a tím snížení mechanických vlastností. [22] [23] [24] [25] [26] [27]. Zvolení vhodné matrice (vinylester, epoxid), která ochrání skleněná vlákna, je klíčové.

Nejčastěji používané materiály vláken do FRP výztuží jsou sklo (GFRP), uhlík (CFRP) a aramid (AFRP). [62]

Stupeň poškození FRP výztuže závisí primárně na těchto základních faktorech: typ vlákna a jeho objemový podíl, typ pryskyřice, morfologie a adheze na rozhraní vlákno/matrice, závažnost vlivů expozičních prostředí a samotný výrobní proces. [62]

E-skleněná vlákna jsou nejvíce náchylná k degradaci v důsledku vlhkosti a alkality, zatímco uhlíková vlákna jsou v takových prostředích relativně inertní. Na druhé straně aramidová vlákna jsou vysoce odolná vůči otěru a nárazům, ale jsou citlivá na tečení, vlhkost a ultrafialové záření. [62]

Výsledné parametry FRP kompozitní výztuže závisí především na výběru vhodného typu pryskyřice pro ochranu vláken. Trvanlivost pryskyřičného systému závisí na několika faktorech, jako jsou jednotlivé složky, jejich individuální vlastnosti, dávkování a také doba a podmínky, při kterých jsou vytvrzovány. [62]

## 2.2 Vliv kapalin a vlhkosti na trvanlivost FRP výztuží

Beton obsahující vnitřní FRP výztuž je běžně vystaven střídavým mokrým a suchým cyklům, přirozeným povětrnostním vlivům a někdy korozivním médii. I když beton poskytuje vynikající ochranu výztuže, tak je jeho propustnost dostatečně vysoká, aby vlhkost a jiné korozivní prvky byly transportovány až ke vnitřní výztuži, která následně koroduje. V posledních desetiletích byl vliv kapalných médií na vlastnosti kompozitů FRP jedním z nejvíce studovaných témat souvisejících s trvanlivostí kompozitů. [62]

Sorpce tekutin do struktury FRP obecně závisí na typech kapalin (voda, kyseliny, zásady), koncentraci tekutin, teplotě, vnějším namáhaném napětí, typu vlákna a pryskyřice, kontaktní zóně, výrobním procesu FRP výztuže a uložením výztuže v betonu a stavu materiálu (poškození, podmínky v průběhu vytvrzování). [62]

Ben Daly a kol. [35] ukázali, že proces difúze vlhkosti v pultrudovaných kompozitech a dosažená úroveň nasycení by mohla souviset s přítomností plniv a přísad v polymerní matici. Bylo prokázáno, že rychlost sorpce je ovlivněna chemickou a vnitřní strukturou matrice (stupeň a typ zesítnění, přítomnost pórů), rozhraním (mezifází) a výrobním procesem. Vědci se proto pokusili kontrolovat difúzní proces pomocí pryskyřičných matic s nižší permeabilitou [36], úpravou mezifázové oblasti pomocí vhodných rozpouštědel a přísad nebo výběrem vhodného formovacího procesu ke snížení obsahu pórů. Kromě toho může pronikání vlhkosti degradovat pryskyřici chemickým napadením (hydrolýzou) nebo poklesem teploty skleněného přechodu. Z tohoto důvodu tekutiny ovlivňují vlastnosti kompozitu, kde hraje dominantní roli matrice, jako jsou např. příčná a smyková pevnost kompozitů, a tyto vlastnosti se stále více snižují se zvýšenou dobou expozice a teplotou. [62]

Skleněná vlákna jsou zvláště citlivá na penetraci tekutin, protože reagují na chemické a fyzikální působení. Úroveň degradace závisí na složení vlákna, typu a koncentraci tekutiny a na teplotě, které jsou vlákna vystavena. Na toto téma byly provedeny rozsáhlé studie [37] [38] [39] [40] [41] [42]. Uhlíková vlákna nejsou ovlivněna penetrací tekutin, ale obvykle je ovlivněna polymerní maticí, což ovlivní i tak vlastnosti kompozitu celkově. V případě jednosměrných uhlíkových kompozitů to obvykle vede ke snížené pevnosti v tlaku a smyku, s nepatrným dopadem na pevnost v tahu, protože jsou to právě vlákna, které nejsou negativně ovlivněny tekutinami. Hancox a Mayer [43] uvádějí minimální nárůst hmotnosti a ztrátu pevnosti u uhlíkových vzorků s epoxidovou maticí

vystavených 65% vlhkosti po dobu více než čtyř měsíců a vroucí vodě po dobu více než tři týdnů. Aramidová vlákna jsou ovlivněna kapalinami většinou při vyšších teplotách. Bylo popsáno, že kompozity AFRP nasycené ve vodě ztratí 35% své pevnosti v ohybu při pokojové teplotě a byla zaznamenána až 55% ztráta ohybové pevnosti, jsou-li namáhány při střídání teplotních cyklů a vlhkosti (vlhké/suché prostředí). [62]

### **2.3 Vliv zásaditého prostředí a vliv mořské vody na trvanlivost FRP výztuží**

Beton se vyznačuje vysokou alkalitou, s pH mezi 12 a 13 v závislosti na konkrétní receptuře betonu a typu použitého cementu [44]. Toto alkalické prostředí poškozuje skleněná vlákna ztrátou houževnatosti a pevnosti a zvýšeným zkřehnutím. Obecně uhlíková vlákna vykazují nejlepší alkalickou odolnost, následují aramidová a skleněná vlákna. [62]

Skleněná vlákna jsou poškozena kombinací dvou procesů: (1) chemické působení na skleněná vlákna v prostředí alkalického cementového kamene a (2) koncentrace a růst produktů hydratace mezi jednotlivými filamenti. Křehnutí vláken je výsledkem tvorby hydroxidu vápenatého na povrchu vlákna. Hydroxylace může způsobit degradaci povrchu vláken, zvýšení drsnosti a zhoršení odolnosti vláken v přítomnosti vlhkosti. Ionty vápníku, sodíku a draslíku v roztoku pórů betonu vysoce agresivní vůči skleněným vláknům. Degradace skleněných vláken je proto způsobena nejen vysokou hladinou pH, ale také kombinací alkalických solí, pH a vlhkosti. [62]

Aramidová vlákna vykazují v alkalickém prostředí ztrátu pevnosti. Kevlar 29 vystavený 10% roztoku hydroxidu sodného po dobu 1000 hodin ztrácí 74 % své pevnosti. Aramidová vlákna s vysokým modulem pružnosti, jako je Kevlar 49, vykazují lepší alkalickou odolnost. [62]

Vlastnosti uhlíkových vláken by neměly být ovlivňovány alkalickým roztokem při jakékoli koncentraci a ani při teplotě varu vody [42] [45]. Judd [45] zjistil, že uhlíková vlákna byla odolná vůči alkalickým roztokům při všech koncentracích a všech teplotách až do varu. Uhlíková vlákna byla ponořena po dobu 257 dnů do velmi zásaditého 50% roztoku hydroxidu sodného a vykazovala změny pevnosti a modulu pružnosti pouze kolem 15 %. [62]

Katsuki a Uomoto [46] použili sondu v rámci elektronové mikroskopie ke sledování průniku alkalických iontů (sodíkových iontů) do aramidových, uhlíkových

a skleněných zesílených vinylesterových tyčí. Sodné ionty pronikaly radiálně v průběhu času do kompozitu se skleněnými vlákny (GFRP). U tyčí AFRP nebo CFRP ponořených po dobu 60 dnů nebyla zaznamenána žádná degradace ve srovnání s tyčemi GFRP. Chin a kol. [47] s využitím energiově disperzní rentgenové analýzy zaznamenali ve vzorcích isopolyesterů vystavených roztoku cementového tmele při teplotě 60 °C po dobu 60 dnů významné množství sodíku, draslíku a vápníku. Nezaznamenali ale průnik iontů do vzorku vinylesteru. [62]

Chu a Karbhari [48] a Chu a kol. [49] provedli studie modelování účinků vlhkosti a alkálií na kompozity složené z E-skla a vinylesteru při různých teplotách (23 °C, 40 °C, 60 °C a 80 °C). Hladiny snížení pevnosti v tahu byly mezi 35% a 62% počáteční pevnosti. [62]

Výsledky zkoušek Gaonovy studie trvanlivosti [61] provedené na GFRP výztužích ukázaly, že pevnost v tahu testovaných GFRP v průběhu času klesala, pokud byly GFRP výztuže v přímém kontaktu s roztoky simulujícím prostředím betonu. Až 24% ztráty pevnosti byly zaznamenány u výztuží kondicionované v alkalickém roztoku s vysokou hodnotou pH (12) při 35 °C po dobu 50 týdnů. [62]

Wang [50] provedl 330 urychlených testů stárnutí na různých průměrech výztužných prutů z E-skla a vinylesteru. Vzorky byly kondicionovány v alkalickém roztoku (pH 12,6–12,8) a destilované vodě při 23 °C, 40 °C a 60 °C po dobu 150 a 300 dnů. U žádného ze vzorků uložených po dobu 150 dní v tomto prostředí nebyly pozorovány defekty vlákna, ačkoli u 300denních vzorků byly zaznamenány trhliny v polymerní matici. Al-Zahrani [51] zkoumal snížení zbytkové pevnosti v tahu tří typů výztužných tyčí GFRP v agresivních roztocích. GFRP výztuže byly kondicionovány ve čtyřech roztocích (zásadité, alkalické + mořská voda, alkalické + bahno z Mrtvého moře a kyselé prostředí) při třech různých teplotách po dobu 3–12 měsíců. Maximální snížení pevnosti v tahu se pohybovalo mezi 27 % a 71 % v alkalickém prostředí a v bahně z Mrtvého moře při 60 °C. V případě teplotních výkyvů a vystavení povětrnostním podmínkám se redukce pohybovala od 5 % do 21 %. [62]

Kim a kol. [52] provedli krátkodobou zkoušku trvanlivosti na dvou typech komerčně dostupných GFRP výztuží nezabudovaných do betonu (E-sklo a vinylester) ve čtyřech různých podmínkách prostředí (cyklování vlhkosti, chloridů, alkálií a zmrazení/tání) až po dobu 132 dnů. Kromě pokojové teploty (25 °C) byly pro urychlení



degradace GFRP výztuží použity zvýšené teploty 40 °C a 80 °C. Došli k závěru, že alkalické prostředí mělo větší vliv na degradaci pevnosti v tahu GFRP tyčí než jiné ovlivňující faktory. [62]

Robert a kol. [41] studovali mechanické vlastnosti, trvanlivost a mikrostrukturu nezátížených GFRP výztuží vystavených konkrétnímu prostředí a solným roztokům za zrychlujících podmínek. Tyto podmínky byly použity pro simulaci účinku mořské vody a rozmrazovacích solí na vlastnosti GFRP. Výsledky neodhalily žádné významné rozdíly v trvanlivosti tyčí GFRP umístěných v betonu, ať už ponořených do solného roztoku nebo vody z vodovodu. GFRP výztužné pruty v solném roztoku prokázaly velmi vysokou dlouhodobou životnost. [62]

Benmokrane a kol. [42] provedli studii trvanlivosti kompozitních kabelů s uhlíkovými vlákny (CFCC – Carbon Fibre Composite Cable) vystavených zvýšené teplotě a zásaditému prostředí. Vzorky byly vystaveny alkalickým roztokům po dobu 1 000, 3 000, 5 000 a 7 000 hodin při zvýšených teplotách (22 °C, 40 °C, 50 °C a 60 °C), aby se urychlil účinek konkrétního prostředí. Trvanlivost CFCC kabelů byla hodnocena provedením tahových zkoušek na vzorcích po různých dobách expozice. Výsledky testu odhalily 7,17% snížení pevnosti v tahu po 7000 h ponoření do alkalického roztoku při 60 °C. Snížení pevnosti v tahu bylo zapříčiněno vývojem mikrotrhlin v epoxidové pryskyřici v důsledku existujících defektů v materiálu. [62]



*Obrázek 8 Vystavení GFRP výztuží mořské vodě [79]*

## 2.4 Vliv cyklického zmrazování a rozmrazování a mrazu na trvanlivost FRP výztuží

Působení mrazu a cyklického zmrazování a rozmrazování obecně neovlivňuje vlákna, ačkoli tato expozice může ovlivnit samotnou pryskyřici a rozhraní vlákno/pryskyřice. Většina studií na toto téma byla provedena na materiálech používaných v leteckém průmyslu. Výsledky provedených výzkumů ukazují, že cyklické zmrazování a rozmrazování má velmi omezený dopad na pultrudované FRP kompozity. Lord a Dutta [56] provedli rozsáhlý přehled degradace materiálu v důsledku nízkých teplot a cyklickému zmrazování / rozmrazování. Obecně při nízkých teplotách vzniká v kompozitech FRP komplexní zbytkové napětí v důsledku vyztužení matrice a rozdílu koeficientů tepelné roztažnosti vláken a pryskyřice, jakož i FRP a betonu. Zbytková napětí mohou způsobit mikrotrhliny v polymerní matrici a na rozhraní vlákna / matrice, které se mohou šířit při nízkoteplotním tepelném cyklování, spojit se a vytvářet příčné trhlinky matrice a způsobovat oddělování vláken od matrice, což následně vede k degradaci FRP kompozitů. Přítomnost rozmrazovacích solí v přítomnosti vysoké vlhkosti s následným cyklováním zmrazením / rozmrazením může kromě účinků střídání vlhkosti, které zahrnují bobtnání a smrštění, způsobit tvorbu mikrotrhlin a postupnou degradaci v důsledku tvorby krystalů a zvýšené koncentrace solí. [62]

Obecně bylo prokázáno, že jednosměrné pevnosti v tahu se snížily v rozmezí teplot  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zatímco mimostředné a příčné pevnosti se mohou v důsledku zkřehnutí matrice zvýšit. Bylo prokázáno, že zvyšující se počet cyklů zmrazení / rozmrazení zvyšuje zbytková napětí, což vede k vyšší hustotě trhlin. Bylo také popsáno zjevné zvýšení křehnutí matrice a snížení pevnosti v tahu [57]

Naproti tomu Shao a Kouadio [58] ukázali, že vzorky pultrudovaných desek GFRP nasycených ve vodě dosahovaly vynikající odolnost vůči cyklickému zmrazování / tání. Autoři nepozorovali téměř žádné změny v tahových vlastnostech FRP kompozitů po 564 teplotních cyklech  $4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-17,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , i když byly vzorky nasyceny vodou. [62]

Mashima a Iwamoto [59] studovali změnu soudržnosti FRP výztuže s betonem v důsledku působení cyklování mrazu / tání (byla testována výztuž s těmito vlákny - uhlík, aramid a vinylon). Soudržnost pull-out testem byla stanovena po 200 cyklech zmrazování / rozmrazování. Testování betonových vzorků o tvaru krychle o rozměrech  $10\text{ x }10\text{ x }10\text{ cm}$  bylo provedeno po 14 dnech zrání ve vodě při  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ve studii byly

použity čtyři typy výztužných prutů, a to CFRP, GFRP a AFRP a ocelové výztužné pruty. Bylo zjištěno, že soudržnost skleněných, vinylonových a uhlíkových-FRP výztuží nebyla ovlivněna cyklováním zmrazení / tání, ale aramidové-FRP výztuže (jak zapletené, tak stáčené typy) prokázaly postupné snižování soudržnosti o asi až 20 % s postupným zmrazováním a rozmrazováním. [62]

## 2.5 Trvanlivost FRP vyztuží se skleněnými vlákny v betonu

Al-Zahrani [51] testoval betonové trámce 10 x 10 x 100 cm vyztužené zabudovanou FRP výztuží se skleněnými vlákny (GFRP). Výztuž byla umístěna v centrální ose trámce. Betonové vzorky s FRP výztuží byly umístěny při 30 °C v pitné vodě, mořské vodě, v roztoku bahna z Mrtvého moře nebo byly vystaveny povětrnostním vlivům po dobu 6–24 měsíců. Zjistil, že snížení pevnosti FRP výztuží bylo mnohem nižší než v případě FRP výztuží, které nebyly zabudované v betonu. Toto snížení pevnosti se po 24 měsících expozice pohybovalo mezi 10 % a 35 %. Dospěl k závěru, že toto chování lze přičíst omezené vlhkosti kolem tyčí a nižší teplotě roztoků, která byla 30 °C pro zabudované výztuže a 60 °C pro výztuže, kolem kterých nebyl beton. [62]

Chen a kol. [37] provedli studii trvanlivosti GFRP výztuží, ve kterých byly samotné FRP výztuže a výztuže zabudované do betonu vystaveny různým podmínkám. Výsledky ukázaly významnou ztrátu pevnosti v důsledku zrychlené expozice samotných i zabudovaných GFRP výztuží, zejména u roztoků při 60 °C. Trvalé ponoření mělo za následek větší degradaci než vystavení cyklickému smáčení / sušení. Robert a kol. [53] provedli studii trvanlivosti GFRP výztuží ve vlhkém betonu, ve kterých byly GFRP opískované výztuže s nominálním průměrem 12,7 mm zabudovány do betonu a vystaveny pitné vodě při 23 °C, 40 °C a 50 °C po dobu 60 až 240 dnů. Výsledky zkoušky v tahu ukázaly pokles pevnosti v tahu o 10 %, respektive 16 %, ve srovnání s původní pevností v tahu, po 240 dnech expozice při 40 °C a 50 °C. [62]

Ve studii z roku 2005, kterou provedli Mufti et al. [54]., byly odebrány jádrové vývrty z pěti betonových mostních konstrukcí v Kanadě vyztužených GFRP, přičemž jejich stáří bylo od šesti do osmi let. Na základě mikroskopické a chemické analýzy zahrnující simulované laboratorní studie s alkalickými roztoky bylo zjištěno, že GFRP v alkalickém prostředí betonu nevykazovaly žádné změny. [62]

## 2.6 Testování odolnosti FRP výztuží v alkalickém prostředí

Pro stanovení míry degradace se provádí řada zkoušek, u kterých je degradace uměle urychlena. [28] [30] [31] [32]. Zkoušky jsou nejčastěji založeny na principu ponoření výztuže do alkálií na určitý časový úsek při definované teplotě. Teplota je pro zjištění dlouhodobých vlastností klíčová, neboť při zvýšené teplotě roste rychlost degradace. [29] Pro zkoušení je podstatné zvolit reálné teploty, protože zvolením nereálně vysokých teplot by došlo k degradaci pryskyřice a tím k podhodnocení výrobku. [30]

Jako příklad stanovení trvanlivosti můžeme uvést testování chování GFRP výztuží o průměrech 10 mm (uváděné hodnoty jsou bez povrchové krycí vrstvy). Cílem experimentu bylo zjistit míru degradace skleněných výztuží. [34]

Zkoušky byly prováděny na výztužích se dvěma typy vláken:

- ECR vlákna (R25H, výrobce 3B; 80 hmotnostních %), označení GFRP - E
- AR vlákna (ArcoteX 2400, výrobce Saint-Gobain; 80 hmotnostních %), označení GFRP – AR

U obou vzorků byla použita vinylesterová pryskyřice Ashland Derakane 411 – 45. Jako krycí vrstva se užila vinylesterová pryskyřice a křemičitý písek.

Vzorky byly vystavené alkalickému prostředí po dobu 42, 90, 180 a 360 dní při teplotách 20 °C, 40 °C a 60 °C. Roztok simulující zásadité prostředí betonu byl sestaven z 118,5 g/l  $\text{Ca(OH)}_2$ , 0,9 g/l NaOH a 4,2 g/l KOH [31]. Při průběžném měření hodnoty pH u roztoku bylo v rozmezí 12,66 – 12,97.

Po uplynutí doby pokusu byl vizuálně zřetelný rozdíl mezi výztuží uloženou v alkalickém prostředí po dobu 365 dní při teplotě 60 °C od ostatních vzorků. Soudržnost mezi adhezní vrstvou a výztuží se porušila. Dále došlo k vysrážení  $\text{Ca(OH)}_2$  a NaOH na povrchu výztuže. (obrázek č. 9 vlevo). Na zbylých vzorcích byla také patrná vrstva vysrážených vápenatých solí (obrázek č. 9 vpravo). Pokud porovnáme výztuž uloženou v alkalickém roztoku s výztuží uloženou na vzduchu, uvidíme znatelný rozdíl v povrchové struktuře, kdy výztuž uložená v zásaditém prostředí má degradovaný povrch v takovém rozsahu, že jsou odhalena jednotlivá vlákna (obrázek č. 10), naopak výztuž uložená na vzduchu nejeví žádné známky porušení povrchové vrstvy. Na obrázku č. 11 lze vidět odhalená vlákna výztuže po expozici 365 dní o teplotě 20 °C. [34]



Obrázek 9 Vzorky po 365 dnech expozice; vlevo 60 °C, vpravo 20 °C [34]



Obrázek 10 Referenční GFRP výztuž uložená v laboratorním prostředí na vzduchu; vpravo GFRP výztuž uložená 365 dní v alkalickém roztoku při teplotě 40 °C [34]



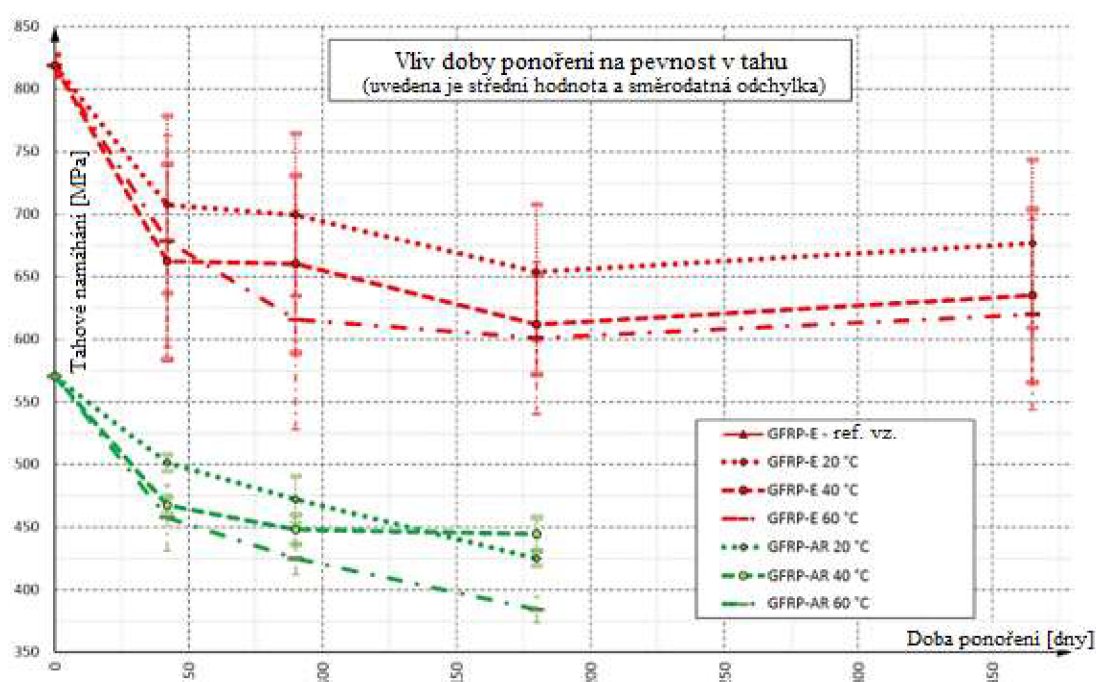
Obrázek 11 GFRP výztuž uložená v alkalickém roztoku; 20 °C (vlevo zvětšeno 50x; vpravo 200x) [34]

Po vizuálním zhodnocení míry degradace bylo provedeno posouzení vlivu alkalického prostředí na změnu mechanických vlastností výztuže. Pro tento účel byly



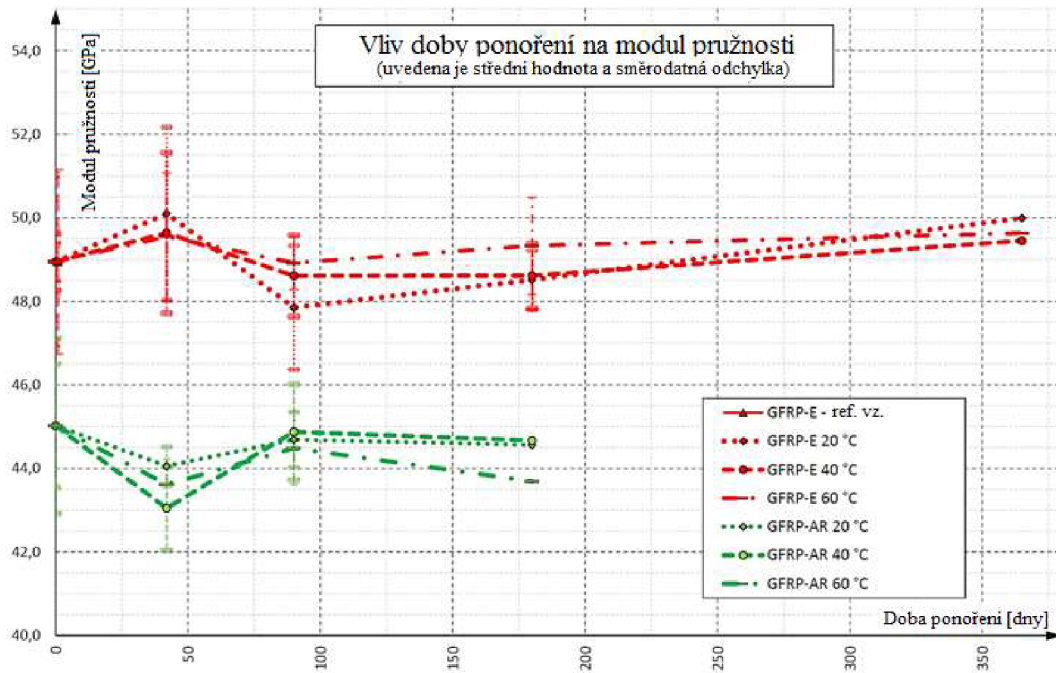
provedeny destruktivní zkoušky na trhacím zařízení. Jednotlivé výztuže se po vyjmutí ze zásaditého roztoku očistily a opatřily se ocelovými koncovkami. Za pomoci koncovek se uchytily do trhacího zařízení. Testováno bylo přes 150 kusů FRP výztuží typu ECR - skleněných a AR - skleněných vláken (alkalic resistant). Výsledky zkoušení jsou graficky znázorněné v grafu č. 4 a grafu č. 5. [34]

Z grafu č. 4 je patrné snížení mechanických vlastností u obou typů výztuže. Při porovnání vzorků byl zjištěn vyšší pokles mechanických vlastností u typu GFRP - AR konkrétně při 180 denním uložení v roztoku při 60 °C o 33 %. U GFRP – E byl pokles za stejných podmínek o 25 %. [34]



Graf 4 Závislost pevnosti v tahu GFRP výztuže na expoziční době a teplotě prostředí; GFRP – E – červená; GFRP – AR – zelená [34](přeloženo)

Modul pružnosti se při testování vzorků příliš nezměnil. Můžeme tedy říct, že vystavení FRP výztuží agresivnímu prostředí a různým teplotám téměř neovlivní jejich modul pružnosti (viz. graf č. 5). [34]



Graf 5 Závislost modulu pružnosti GFRP výztuže na expoziční době a teplotě prostředí; GFRP – E – červená; GFRP – AR – zelená

Lze tedy konstatovat, že vystavení FRP výztuži alkalickému prostředí společně s vysokou teplotou zásadně urychluje míru degradace. Faktory, které ovlivní míru degradace, mohou být závislé na volbě vhodného typu vláken a matrice nebo na způsobu kvalitě výroby. Po uskutečnění zkoušky se zjistilo, že pevnost v tahu klesla o čtvrtinu až třetinu původní pevnosti (záleží na typu vláken) a modul pružnosti se téměř nezměnil. Podstatný je problém se ztrátou krycí vrstvy, a proto je potřeba mu věnovat pozornost při navrhování výztuží do betonu. [34]

### 3 Aplikace FRP výztuží v konstrukcích

#### 3.1 Mosty

Opravy a sanace mostů patří k jedněm z nejdražších projektů. Mosty jsou namáhány jak zatížením od dopravy, tak i agresivním prostředím (soli, voda, působení mrazu, obrus aj.). Použití FRP výztuží kromě zvýšení odolnosti vůči korozi také zajišťuje vyšší odolnost v případě přírodních katastrof (zemětřesení, povodně) a mechanickému porušení při kolizích. Užití FRP výztuží v mostní konstrukci může výrazně snížit budoucí náklady na její údržbu oproti použití ocelové výztuže. [63]



Obrázek 12 Betonová mostní vozovka s GFRP výztuží [62]



Obrázek 13 Uložení výztuží před zalitím betonem; Most přes Assiniboine River; Brandon, Manitoba, Canada [76]





*Obrázek 14 Most přes Red River, Manitoba, Canada [76]*

### **3.2 Železnice**

V konstrukcích železničních staveb je výhodné používat FRP výztuže z důvodu jejich nevodivosti (železnice jsou elektrifikované). Další výhodou oproti ocelové výztuži je její korozivzornost a nízká objemová hmotnost při srovnatelných nebo vyšších tahových pevnostech. je. [66]



*Obrázek 15 Železniční pražce plně vyztužené z GFRP výztuží – Miami železniční trať [73]*



*Obrázek 16 Koleje metra z GFRP výztuži v Miami-Dade [76]*

### **3.3 Parkovací domy**

Parkovací domy jsou především náchylné ke korozi způsobené vodou a rozmrazovacími solemi, které do nich zanáší automobily ze silnice. FRP výztuže jsou odolné vůči korozi a chemickému působení. Při využití FRP výztuží v garážích můžeme počítat s životností těchto konstrukcí až 100 let. [64]



*Obrázek 17 Vyztužení podlahy GFRP výztužemi v parkovacím domě, Quebec, Canada [77]*

### **3.4 Vlnolamy**

Vlnolamy jsou masivní konstrukce podél pobřeží, které poskytují ochranu před náhlými záplavami a erozivním účinkem vln. Pobřežní stavby jako jsou vlnolamy, umělé korály a plovoucí přístavy a budovy blízko pobřeží jsou vystaveny účinkům chloridů a mořské vody. Tyto podmínky téměř znemožňují využití ocelových výztuží. Z toho důvodu se v těchto podmínkách s výhodou navrhuje FRP výztuží. [67]



*Obrázek 18 Vlnolam – Estee Lauder estate Palm Beach [73]*

### **3.5 Opěrné stěny**

Opěrné stěny jsou konstrukce s jednou z nejkratších dob životnosti. Může za to jak vlhkost od zeminy, tak například voda s rozmrazovacími látkami odstříkující od kol vozidel. Při použití FRP výztuží v opěrných stěnách můžeme jejich životnost počítat i delší než sto let. [68]



*Obrázek 19 Opěrná zeď - Maui [73]*

### **3.6 Těžební průmysl a stavba tunelů**

V těžebním průmyslu běžně používané ocelové výztuže po určité době konstantního napětí v ostění tunelů ztrácí svou únosnost. Na rozdíl od nich FRP výztuže si zachovávají své vlastnosti i po dlouhé době. Navíc jsou vhodnou variantou pro použití



v podmořských tunelech, těžebních věžích a všech ostatních konstrukcích v agresivních podmínkách. [69]



Obrázek 20 GFRP výztuž do prefabrikovaného ostění tunelu [72]

### 3.7 Přistávací dráhy

Moderní letadla se vyrábí stále větší a těžší. Při návrhu přistávacích ploch je proto nutné myslet do budoucnosti. V nynější době je při dosedání letadla namáhána přistávací dráha nárazem až 250 000 kg na středovou část dráhy. Základová část betonové přistávací dráhy musí splňovat vysoké požadavky na pevnost v tlaku a tahu.. Při využití nejodolnějších FRP výztuží se výrazně zvyšuje životnost těchto vysoce namáhaných konstrukcí. [70]



Obrázek 21 Přistávací dráha, Vídeň, Rakousko [78]

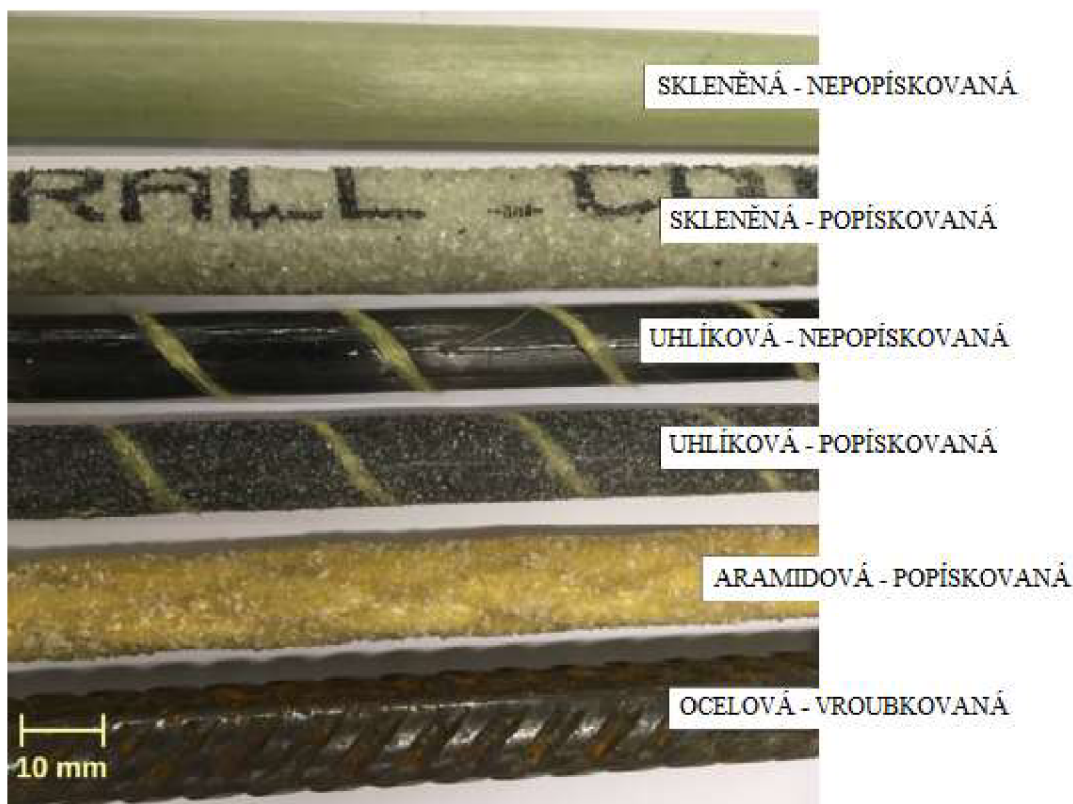
### 3.8 Zdravotnické a informační technologie

Zdravotní a datová infrastruktura a budovy musí být vybudovány výhradně z FRP výztuží, nebo jiných nevodivých materiálů, které negenerují magnetické pole. Jedině tak je zajištěno, že nebudou ovlivněny speciální citlivé přístroje a nebude rušen tok dat. [71]

## 4 Soudržnost FRP výztuží s betonem

### 4.1 Faktory ovlivňující soudržnost FRP s betonem

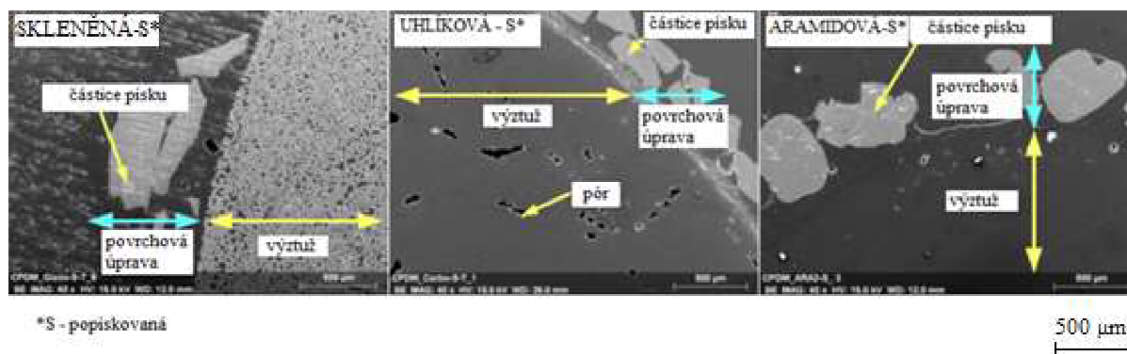
Klíčovou podmínkou pro použití FRP výztuží v betonu je jejich dokonalé spolupůsobení s cementovou matricí. Stejně jako u ocelových výztuží je toto spolupůsobení zajištěno povrchovou úpravou. Ta musí zajistit spolehlivé přenesení zatížení z betonu do výztuže. Při návrhu konstrukce je nutno brát v potaz pevnost betonu, tuhost výztuže, geometrii povrchu, povrchovou úpravu výztuže a její spojení s betonem. [12] [13] [14] [15]. Například GFRP výztuž s povrchovou úpravou opískováním vykazuje až 6 krát vyšší soudržnost s matricí než stejná výztuž bez povrchové úpravy. [11]



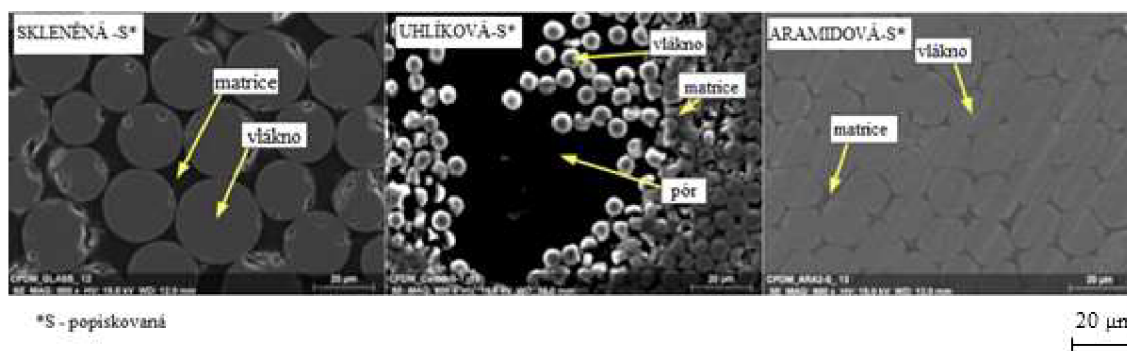
Obrázek 22 Povrchové úpravy FRP v porovnání s ocelovou výztuží [11] (přeloženo)

Pro zajištění dobré soudržnosti kompozitní výztuže s betonem je důležitá soudržnost mezi výztuží a betonem a také soudržnost mezi povrchovou vrstvou výztuže a dalšími vrstvami kompozitní výztuže. Soudržnost povrchových vrstev kompozitní výztuže můžeme sledovat pomocí elektronového mikroskopu. Obrázek č. 23 znázorňuje přechod mezi výztuží a povrchovou úpravou výztuže opískováním pro různé druhy FRP

výztuže při malém zvětšení. Obrázek č. 24 nabízí stejný pohled, ale při výrazně vyšším zvětšení. [11]



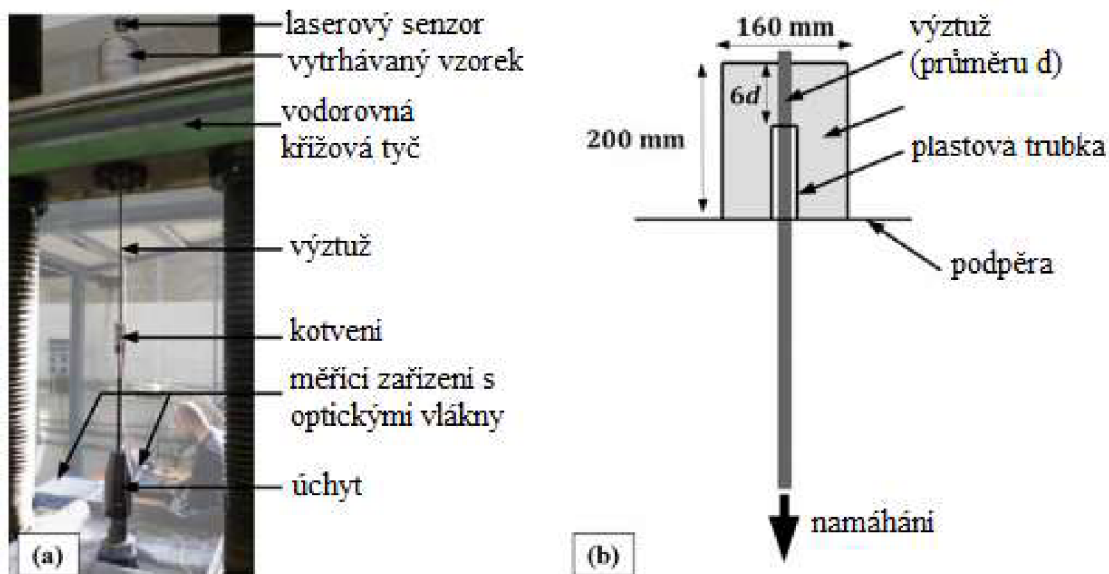
Obrázek 23 Snímky rozhraní mezi výztuží a povrchovou úpravou výztuže opískováním pro různé druhy FRP výztuže [11] (přeloženo)



Obrázek 24 Snímky rozhraní mezi výztuží a povrchovou úpravou výztuže opískováním pro různé druhy FRP [11]. Vyšší zvětšení. (přeloženo)

## 4.2 Metody pro hodnocení soudržnosti FRP s betonem

Nejčastější metodou pro ověření spolupůsobení výztuže s betonem je zkouška vytržením (pull-out test) [16] [17]. Jedná se o nejjednodušší zkoušku s vysokou průkazností. Během zkoušky je obvykle měřeno maximální zatížení a celkový prokluz výztuže. V průběhu této zkoušky může být také sledováno protažení výztuže. [11]



Obrázek 25 Pul – out test - test vytržením a) sestava experimentu. b) schéma zatěžování. [11] (přeloženo)

Průtažnost se měří metodou DOFS (Distributed Optical Fiber Sensing – metoda měření pomocí optických vláknových senzorů). Princip spočívá v upevnění optického vlákna o známé délce na povrch zkoumané výztuže. Optické vlákno je propojeno se zařízením sledujícím průběžné protažení během zkoušky. Vlákno je upevněno v drážce hluboké 2 mm (viz. obrázek č. 25 a). Poté je výztuž vložena do formy a zalita betonem (viz. obrázek č. 25 b) pro provedení zkoušky pull-out test. [11]

Při zkouškách, které provedl Rolland a col., došlo u všech druhů výztuží k jejich vytržení z betonu, což je očekávaný výsledek zkoušky. Pozorování ukázalo, že na výztužích opatřených popískováním zůstala po vytržení tenká vrstva betonu stejně jako na žebírkách ocelové výztuže. Tento výsledek je znázorněn na obrázku č. 26. [11]



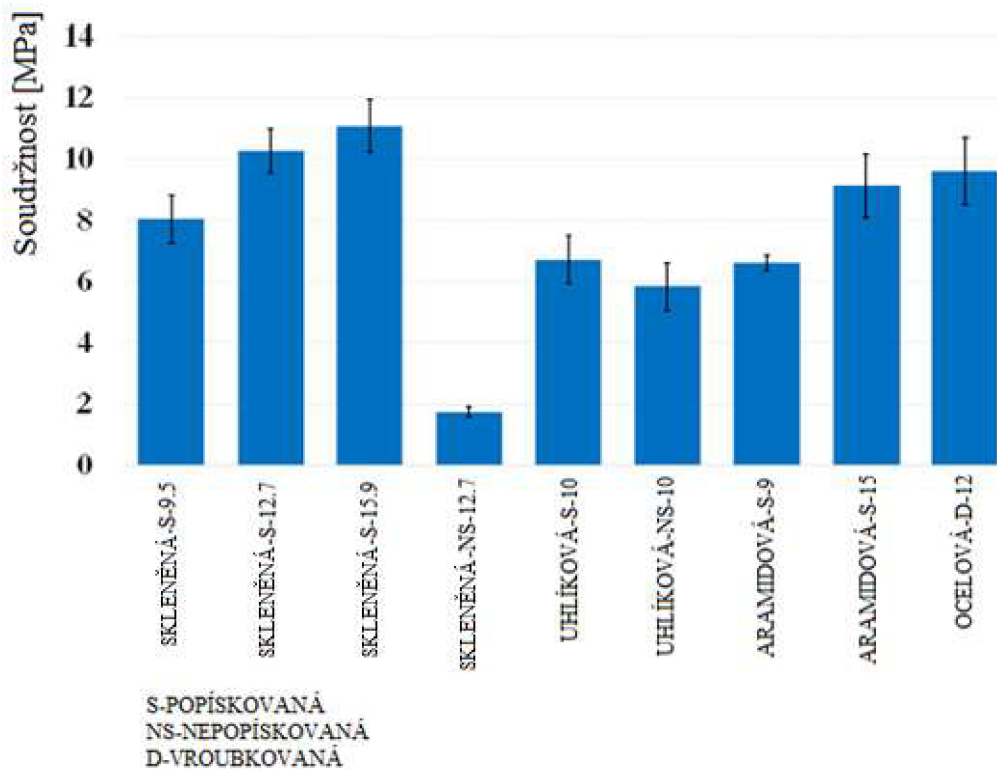


S-popískovaná  
 NS-nepopískovaná  
 D-vroubkovaná

Obrázek 26 Typy porušení pro jednotlivé druhy výztuže při provádění zkoušky pull-out test [11] (přeloženo)

Při vyhodnocení zkoušek pull-out test vykázaly nejvyšší soudržnost popískované výztuže se skleněnými vlákny (GFRP). Dále stojí za zmínku porovnání popískovaných GFRP s ocelovými pruty téměř stejného průměru, kdy GFRP dosáhly mírně vyšší hodnoty soudržnosti než ocelová výtuž. V předchozích výzkumech byla totiž zjištěna soudržnost ocelových prutů vždy vyšší než soudržnost FRP výtuží s různými typy vláken. Graf č. 6 ukazuje porovnání soudržnosti zmíněných výtuží. [11]





Graf 6 Porovnání soudržnosti různých výztuží s betonem při pull-out testu. [11] (přeloženo)

Z grafu je jasně patrné, jak velkou roli hraje povrchová úprava opískováním. Opískování zlepšuje nejvýznaměji soudržnost FRP výztuže se skleněnými vlákny při porovnání se FRP výztuží s uhlíkovými a aramidovými vlákny, kdy efekt opískování není tak výrazný. Pomocí DOFS je možné měřit protažení výztuží, které se dle výsledků zvětšuje s narůstajícím průměrem výztuže. Tento efekt ale nemá jasný vliv na změnu modulu pružnosti. Obecně lze říci, že různorodost průtažnosti jednotlivých složek kompozitu má za následek komplexní rozložení tahových napětí. Tato schopnost pramení ze spolupůsobení betonu s výztuží, vysoké pevnosti v tahu a vlastností jednotlivých složek FRP výztuží, které jsou ještě umocněny jejich spojením do kompozitu, jejich povrchovou úpravou, tvarem nebo výrobním procesem. [11]

## 5 Návrh experimentu pro ověření spolupůsobení FRP výztuže a betonu

Jedním ze základních předpokladů pro návrh funkční a bezpečné betonové konstrukce je dobré spolupůsobení výztuže s betonovou maticí. To zajistí přenesení napětí ze zdroje působícího na povrch betonu do samotné výztuže.

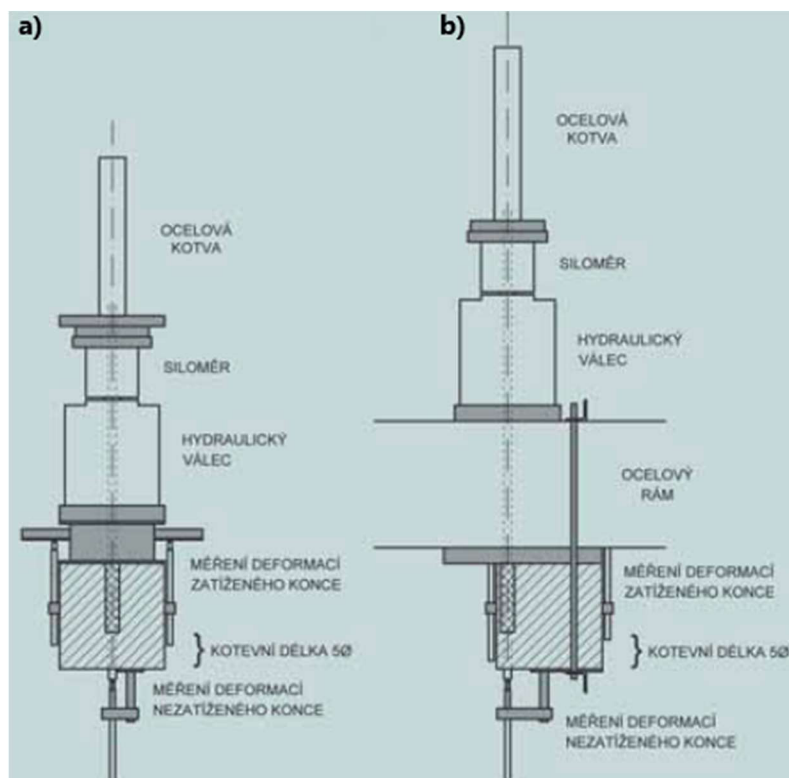
Při aplikaci FRP výztuží dochází k přenesení sil do betonu jiným způsobem než u běžně užívaných žebříkových výztuží. Soudržnost zajišťuje na rozdíl od žebírek ocelové výztuže celá plocha FRP výztuže. Ta je běžně opatřována povrchovou úpravou, nejčastěji opískováním. Proto je nutné upravit postupy zkoušek běžně užívaných pro ocelové pruty. [74]

Pro zjištění soudržnosti výztuže s betonem lze použít několik typů zkoušek. Nejčastěji používané jsou běžné pull-out testy (s centricky nebo excentricky uloženým výztužným prutem), prstencové pull-out testy (ring pull-out test), zkoušky soudržnosti při stykování výztuže přesahem (splice test), nebo nosíkové zkoušky. [74]

Trvanlivost povrchové úpravy výztuže může být zkoušena vystavením agresivnímu prostředí a sledována optickým nebo elektronovým rastrovacím mikroskopem (SEM - Scanning Electron Microscope). Na základě rešerší informací byl navržen následující postup zkoušení spolupůsobení FRP výztuže a betonu:

### **Pull-out test**

Pull-out test je díky své jednoduchosti jedním z nejpoužívanějších způsobů, jak testovat soudržnost výztuže s maticí. Běžný pull-out test je znázorněn na obrázku č. 27 a. Výsledek tohoto testu udává komplexní pohled na spolupůsobení celé soustavy, zatímco excentrický pull-out test (obrázek č. 27 b) dovoluje zkoušet vliv povrchové úpravy výztuže na soudržnost. [74]



Obrázek 27 Sestava pro a) centrický pull-out test, b) excentrický pull-out test [74]

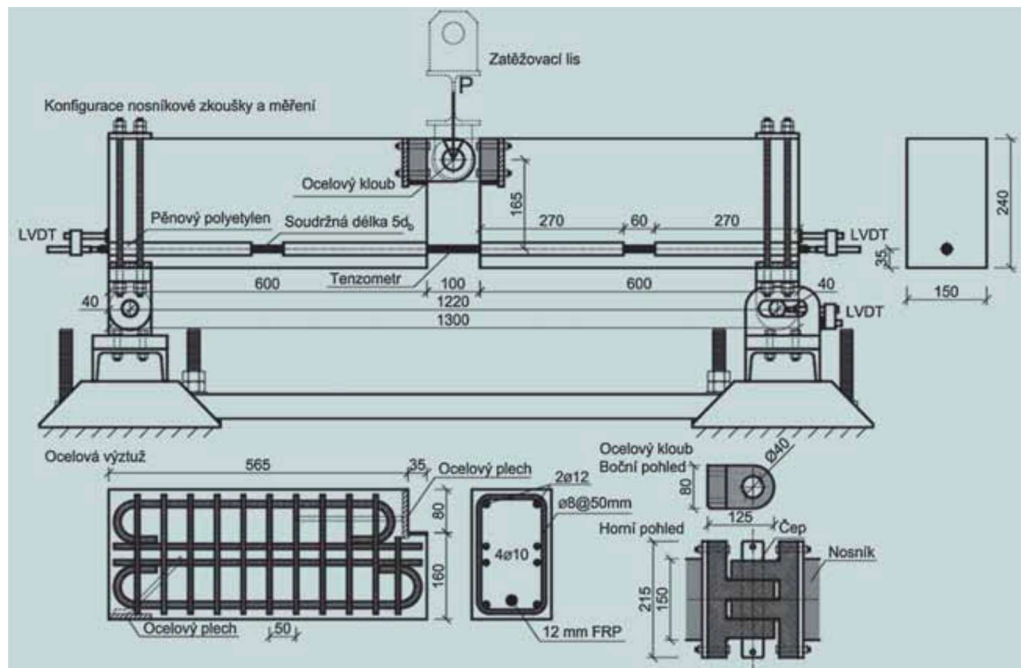
Postup zkoušky je podrobně popsán v dokumentu vydaném ACI 440.3R-12, který popisuje přesné postupy v souladu s ASTM normami. [31]

Pecce a spol. ve svém článku udávají, že pro zkoušení FRP pull-out testem byla zkrácena kotevní délka na pětinašobek průměru oproti původní hodnotě 10násobku průměru. Při použití kratší kotevní délky uvedli jako výsledek zkoušek vytržení GFRP výztuži se žebírky, kdežto při delší kotevní délce byl prut přetržen. Z toho důvodu je nutné, při uvádění výsledků zkoušek zveřejnit také okrajové podmínky při zkoušení. [75]

### Nosníková zkouška

Soudržnost určená pull-out testem neposkytuje reálný obraz o spolupůsobení výztuže s prvkem. Málo kdy se stane, že je výztuž namáhána osovým zatížením. Reálnější pohled na toto spolupůsobení nabízí nosníková zkouška, která ukazuje chování při zatěžování nosníku ohybovým namáháním. [74]

Zkušební sestava je znázorněna na obrázku č. 28. Vzorek je zatěžován přes ocelový kloub uprostřed dochází k průhybu vzorku a tím pádem k vyvozování tahových napětí za ohybu na obnaženou FRP výztuž.



Obrázek 28 Schéma zkušební sestavy nosníkové zkoušky [74]



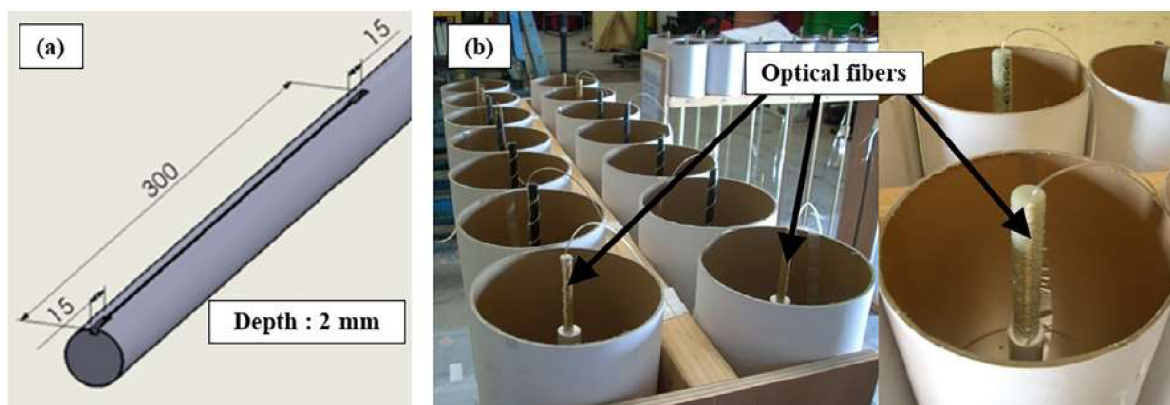
Obrázek 29 Reálná nosníková zkouška: a) uspořádání, b) posuvná podpora [74]

Stejně jako u pull-out testu byla z důvodu nižšího modulu pružnosti FRP výztuže zmenšena kotevní délka z 10násobku na 5násobek. Jinak byly ponechány téměř všechny rozměry sestavy původně určené pro zkoušení ocelových výztuží dle RILEM FIP-CEB. [74]

### Průtažnost:

Další navrženou metodou je zkouška metodou DOFS. Do výztuže je vyfrézován 2 mm hluboký zárez opatřen optickými vlákny. Tato vlákna po připojení na výpočetní

jednotku zaznamenávají protažení výztuže v betonové matrici. Princip a nákras osazení je na obrázku č. 30 a. [11]



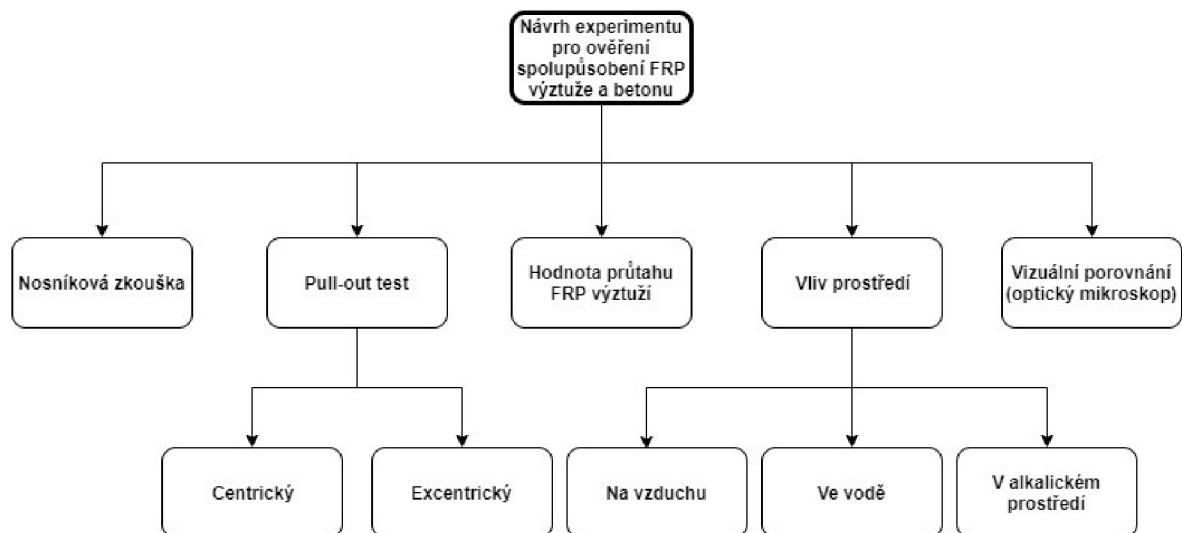
Obrázek 30 Ukázka osazení optického vlákna na FRP výztuž [11]

### Sledování kvality povrchové úpravy výztuže

Informace o chování a kvalitě povrchové vrstvy výztuže můžeme také získat pozorováním jejího povrchu optickým nebo elektronovým rastrovacím mikroskopem po působení agresivního prostředí a před a po zatěžování tahem. Vrstva může popraskat, či úplně odpaďnout. Povrchová vrstva s dobrou přilnavostí k povrchu výztuže po vytržení z betonu zůstane na prutu a může být i obalena zbytky betonu. Kdežto méně přídržná vrstva se při pull-out testu může oddělit a zůstat v betonovém prvku. Dojde tak k vytržení výztuže, místy bez povrchové úpravy. Nejčastějším způsobem povrchové úpravy je opískování povrchu.

Kvalitu opískování kontrolujeme sledováním soudržnosti opískování a vlastní výztuže pod mikroskopem při uložení v různých prostředích. Běžně provádíme testy výztuže na vzduchu, ve vlhkém prostředí, v alkalickém prostředí simulujícím prostředí v betonu, uložení ve vlhku a při různých teplotách (20 °C, 40 °C, 60 °C)

Po shrnutí výsledků obou variant pull-out testů, nosíkové zkoušky, pozorování průtahu prutu výztuže a vlastního chování povrchové vrstvy lze poměrně přesně určit kvalitu spolupůsobení testované FRP výztuže s betonovou matricí



Obrázek 31 Schéma zkoušení FRP výztuží

## Závěr

FRP výztuže jsou kompozitní výztuže s polymerní matricí a dlouhovláknovou výztuží. Nejčastěji se vyrábí pultruzí, což je kontinuální výrobní proces, kdy jsou výztužná vlákna smáčena pryskyřicí a jsou tažena jednotlivými výrobními kroky. Je třeba dodržet správný technologický postup při výrobě a kvalitě vstupních surovin. Materiály pro jejich výrobu jsou skleněná, uhlíková, aramidová nebo čedičová vlákna jako nosná složka výztuže a vinylesterové, epoxidové a polyesterové pryskyřice jako pojiva a ochrana matrice. Využívají se pro mostní a železniční konstrukce, parkovací domy, vlnolamy, opěrné stěny, přístavací dráhy, zdravotnické a informační technologie, pro těžební průmysl, stavbu tunelů a další.

Jejich použití a správná funkce konstrukce je podmíněna dostatečnou soudržností FRP výztuže s betonem. Pevnost spoje FRP výztuže a betonu závisí na přenesení smykových a příčných sil na rozhraní mezi výztuží a betonem a mezi jednotlivými vlákny výztuže. Tyto vlastnosti závisí dominantně na pryskyřici, zatímco vlastnosti závislé dominantně na vláknech jsou podélná pevnost a tuhost. Prostředí, která narušují polymerní matrici nebo rozhraní pryskyřice/vlákno také oslabují soudržnost FRP výztuže a betonu.

Důležitým faktorem ovlivňujícím soudržnost FRP výztuže a betonu je hutnost betonu - pronikání iontů k výztuži ovlivňuje soudržnost. Pro testování soudržnosti FRP výztuže a betonu je nejčastěji používanou metodou pull-out test pro tyto výhody: jednoduchost, nízké náklady, možnost uložit vzorky do různých prostředí, sledování vlivu vlhkého alkalického prostředí betonu.

Dalším využívaným způsobem zkoušení je tzv. nosníková zkouška, které je složitější na provedení, ale ukazuje reálnější chování FRP výztuže v betonu pod ohybovým namáháním. Jak tato, tak i výše zmíněný pull-out test lze modifikovat opatřením výztuže optickými vlákny pro podrobné sledování průtahu výztuže při namáhání.

Při zkoušení sledujeme nejen soudržnost betonu a FRP výztuže jako celku, ale i samotné povrchové úpravy s povrchem prutu výztuže. Chování povrchové úpravy při namáhání lze sledovat jak optickým, tak elektronovým rastrovacím mikroskopem. Typickým příkladem selhání soudržnosti povrchové úpravy s prutem výztuže je odloupení svrchní vrstvy při vytržení pull-out testem. Naopak dobrou soudržnost vykáže prut, který je při pull-out testu vytržen i s částí cementového tmele.

FRP výztuže si v posledních letech zaslouženě získaly velkou pozornost ve všech oblastech stavebnictví. Jejich nekorozní a nevodivé vlastnosti spolu s chemickou odolností je činí lákavou alternativou pro běžně používané ocelové výztuže. FRP výztuže také vykazují mechanické vlastnosti srovnatelné, nebo převyšující s vlastnostmi ocelových prutů. I přes jejich vyšší cenu se díky delší životnosti konstrukce a omezení koroze sníží budoucí náklady na údržbu konstrukcí. Z dlouhodobého hlediska je tedy můžeme prohlásit jako ekonomičtější variantu.



## Seznam zkratek

**FRP** (*Fiber Reinforced Polymers*) – Vlákny vyztužené polymery

**GFRP** (*Glass Fiber Reinforced Polymers*) – Polymery vyztužené skleněnými vlákny

**AFRP** (*Aramid Fiber Reinforced Polymers*) - Polymery vyztužené aramidovými vlákny

**CFRP** (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*) - Polymery vyztužené uhlíkovými vlákny

**BFRP** (*Basalt Fiber Reinforced Polymers*) - Polymery vyztužené čedičovými vlákny

**E-CR GLASS** (*type E – chemical resistant glass*) – Chemicky odolné skleněné vlákno typu E

**HS CARBON** (*high strength*) –Vysokopevnostní uhlíková vlákna

**HM CARBON** (*high modulus*) –Vysokomodulová uhlíková vlákna

**DOFS** (*Distributed Optical Fiber Sensing*) -Metoda měření pomocí optických vláknových senzorů

**CFCC** (*Carbon Fibre Composite Cable*) – Kompozitní kabely s uhlíkovými vlákny

**SEM** (*Scanning Electron Microscope*) – Elektronový rastrovací mikroskop

## Seznam použitých zdrojů

- [1] EL-HASSAN, H., EL MAADDAWY, T., (2019). Microstructure characteristics of GFRP Reinforcing Bars in harsh environment. *Advances in Materials Science and Engineering*. č. 2019, s. 19. Article ID 8053843, <https://doi.org/10.1155/2019/8053843>.
- [2] TASK GROUP 9.3, (2007). *FRP reinforcement in RC structures*. ISBN 978-2-88394-080-2.
- [3] BAREŠ, R., A., (1988). *Kompozitní materiály*, SNTL, Praha, 328 s.
- [4] BODNÁROVÁ, L., (2007). *Kompozitní materiály (CJ02)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně FAST
- [5] GIRGLE, F., PROKEŠ, J., JANUŠ, O., KOSTIHA, V., ŠTĚPÁNEK, P., (2017). Kompozitní výztuž do betonu – perspektivní materiál pro odolné a trvanlivé betonové konstrukce *BETON TKS*, roč. 17, č. 2, s. 50-55. [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: [http://www.betontks.cz/sites/default/files/2017-2-50\\_0.pdf](http://www.betontks.cz/sites/default/files/2017-2-50_0.pdf).
- [6] ORLITECH, (2020). Tyče. [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://orlitech.cz/tyce/>
- [7] JANČÁŘ, J., (2020), *Úvod do materiálového inženýrství kompozitů*, VUT Brno, Fakulta chemická
- [8] VNOUČEK, M., (2009). *Kompozitní materiály*. Výukový materiál pro předmět Strojírenské materiály. Západočeská univerzita v Plzni [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09\\_10.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf).
- [9] PREFA KOMPOZITY, (2018). Technologie Výroby. [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/co-je-to-kompozit/>.
- [10] PREFA KOMPOZITY, (2019). Katalog výrobků. [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: [https://www.prefa-kompozity.cz/wp-content/uploads/2015/09/Katalog-v%C3%BDrobn%C5%AF-2017\\_m.pdf](https://www.prefa-kompozity.cz/wp-content/uploads/2015/09/Katalog-v%C3%BDrobn%C5%AF-2017_m.pdf)
- [11] ROLLAND, A., QUIERTANT, M., KHADOUR, A., CHATAIGNER, S., BENZARTI, K., ARGOUL, P., (2018). Experimental investigation on the bond behavior between concrete and FRP reinforcing bars. *Construction and Building*

- [12] LARRALDE, J., SILVA-RODRIGUEZ, R., (1993). Bond and slip of FRP rebars in concrete, *J. Matter. Civ. Eng*, roč. 5, č. 1, s. 30-40.
- [13] COSENZA, E., MANFREDI, G., REALFONZO, R., (1997). Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete, *J. Compos. Constr*, roč. 1, č. 2, s. 40–51.
- [14] TIGHIOUART, B., BENMOKRANE, B., GAO, D., (1998). Investigation of bond in concrete member with fibre reinforced polymer (FRP) bars, *Constr. Build. Mater.*, roč. 12, č. 8, r. 453–462.
- [15] OKELO, YUAN, R. L., (2005). Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete, *J. Compos. Constr.*, roč. 9, č. 3, s. 203–213.
- [16] ACI 440.3R-04, (2004). *Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures*, American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, MI, USA.
- [17] ČSN EN 10080, (2005). *Ocel pro výztuž do betonu - Svařitelná betonářská ocel – Všeobecně*. Praha: Český normalizační institut, 64 s.
- [18] DROCHYTKA, R., (1998). *Plastické látky ve stavebnictví*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 122 s. ISBN 80-214-1148-1
- [19] FIB BULLETIN NO. 40., (2007). *FRP reinforcement in RC structures*, Technical Report, 160 s. ISBN: 978-2-88394-080-2. DOI: doi.org/10.35789/fib.BULL.0040.
- [20] EHRENSTEIN. G. W., (2009). *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [21] LANÍKOVÁ, I., ŠTĚPÁNEK, P., VENCLOVSKÝ, J., (2016). Optimization of tunnel lining reinforced with FRP, *Key Engineering Materials*, č. 691, s. 148-159. ISBN: 978-3-03835-526-7.
- [22] SAAFI, M., (2002). Effect of fire on FRP reinforced concrete members,

- [23] ZLÁMAL, M., KUČEROVÁ, A., ŠTĚPÁNEK, P., (2013). *Effect on fire on FRP reinforced concrete structures*. CESB 2013 PRAGUE, s. 493-498.
- [24] GIRGLE, F., BODNÁROVÁ, L., KUČEROVÁ, A., JANÁK, P., PROKEŠ, J., (2016). Experimental Verification of Behavior of Glass and Carbon Fibres in Alkali Environment, *Key Engineering Materials*, č. 677, s. 43 – 48.
- [25] BENMOKRANE, B., WANG, P., TON-THAT, T. M., RAHMAN, H., ROBERT, J. F., (2002). Durability of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars in Concrete Environment, *J. Compos. Constr.*, roč. 6, č. 2.
- [26] BENMOKRANE, B., ELGABBAS, F., AHMED, E., and COUSIN, P., (2015). Characterization and Comparative Durability Study of Glass/Vinylester, Basalt/Vinylester, and Basalt/Epoxy FRP Bars, *J. Compos. Constr.*, roč. 19, č. 6. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000564.
- [27] KARBHARI, V. M., (ED.), (2007). *Durability of composites for civil structural applications*, Elsevier, ISBN 978-1-84569-035-9.
- [28] DEJKE, V., (2001). *Durability of FRP reinforcement in concrete*, Ph.D. thesis, Dept. Of Building Material, Chalmers Univ. Of Technology, Sweden, 205 s.
- [29] CHEN, Y., DAVALOS, J. F., RAY, I., KIM, H. Y., (2007). Accelerated aging tests for evaluation of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures, *Compos. Struct.*, č. 78, s. 101-111.
- [30] ROBERT, M., WANG, P., COUSIN, P., BENMOKRANE, B., (2010). Temperature as an accelerating factor for long-term durability testing of FRPs: Should there be any limitations?, *J. Compos. Constr.*, roč. 14, č. 4, s. 361-367.
- [31] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, (2012). 440.3R-12. *Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening*

*concrete structures*. Farmington Hills, Michigan [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [https://www.iranfrp.ir/wp-content/uploads/2018/12/4403R\\_04\\_0.pdf](https://www.iranfrp.ir/wp-content/uploads/2018/12/4403R_04_0.pdf)

- [32] CSA S806-12, (2012). *Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*, Canadian Standards Association (CSA).
- [33] ISO 10406-1:2015, (2008). *Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part 1: FRP bars and grids*, Geneva, Switzerland.
- [34] GIRGLE, BODNÁROVÁ, JANUŠ, KOSTIHA, (2018). *Vliv alkality a teploty prostředí na dlouhodobé vlastnosti GFRP výztuže*, In 15. KONFERENCE SPECIÁLNÍ BETONY, sborník příspěvků. Skalský Dvůr: SEKURKON s.r.o., s. 60-66. ISBN: 978-80-86604-78-7.
- [35] BEN DALY, H., BEN BRAHIM, H., HFAIED, N., HARCHAY, M., BOUKHILI, R., (2007). Investigation of water absorption in pultruded composites containing fillers and low profile additives. *Polymer Composites*, č. 28, s. 355-364. <https://doi.org/10.1002/pc.20243>.
- [36] BENMOKRANE, B., (2000). *Improvement of the durability performance of glass fiber reinforced polymer (GFRP) reinforcements for concrete structures*. Technical Report, Civil Engineering Department, University of Sherbrooke, 50 s.
- [37] CHEN, Y., DAVALOS, J.F., RAY, I. AND KIM, H.Y., (2007). Accelerated aging tests for evaluation of durability performance of FRP reinforcing bars reinforcing bars for concrete structures. *Composite Structures*, č. 78, s. 101-111.
- [38] ROBERT, M., COUSIN, P., BENMOKRANE, B., (2011). Study of the performance of FRP reinforcing bars subjected to extreme conditions of application. *Revue Les Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, č. 1, s. 9-27.
- [39] ROBERT, M., BENMOKRANE, B., (2010). Effect of aging on bond of GFRP

bars embedded in concrete. *Cement and Concrete Composites Journal*, roč. 32, č. 6, s. 461-467.

- [40] ROBERT, M., WANG, P., COUSIN, P., BENMOKRANE, B., (2010). Temperature as accelerating factor for long-term durability of FRP's: should be there limitations. *J. Compos. Constr.*, roč. 14, č. 4, s. 361-367.
- [41] ROBERT, M., BENMOKRANE, B., (2013). Combined effects of saline solution and moist concrete on long-term durability of GFRP reinforcing bars. *Construction and Building Materials*, č. 38, s. 274–284.
- [42] BENMOKRANE, B., ALI, A.H., MOHAMED, H.M., ROBERT, M., ELSAFTY, A., (2016). Durability performance and service life of CFCC tendons exposed to elevated temperature and alkaline environment. *J. Compos. Constr.*, DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000606, 04015043.
- [43] HANCOX, N. L., MAYER, R. M., (1994). *Design data for reinforced plastics*. Chapman & Hall, New York, NY, s. 202-204.
- [44] BENMOKRANE, B., WANG, P., PAVATE, T., ROBERT, M., (2006). *Durability of materials and structures in building and civil engineering. Chapter 12: durability of FRP composites for civil infrastructure applications*. Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland, 44 s.
- [45] JUDD, N. C. W., (1971). *The chemical resistance of carbon fibers and a carbon fiber/polyester composites*. The First International Conference of Carbon Fibers, Plastics Institute, s. 1 – 8.
- [46] KATSUKI, F., AND UOMOTO, T., (1995). *Prediction of deterioration of FRP rods due to alkali attack*. Proc., Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, E & FN Spon, London, s. 108–115.
- [47] CHIN, J., AOUDI, K., HAIGHT, M. R., HUGHES, W. L., NGUYEN, T., (2001). Effects of water, salt solution and simulated concrete pore solution on the properties of composite matrix resins used in civil engineering applications, *Polymer Composites*, roč. 22, č. 2, s. 282-297.

- [48] CHU, W., KARBHARI, V., (2002). *Characterization and moisture and alkali effects on E-glass/vinylester composites*. In: Proceedings of 2nd International Conference on Durability of Fibre Reinforced Polymer Composites for Construction, Montreal, Quebec, Canada, s. 359–369.
- [49] CHU, W., WU, L. AND KARBHARI, V., (2004). Durability evaluation of moderate temperature cured E-glass/vinylester systems. *Compos. Struct.*, č. 66, s. 367–376.
- [50] WANG, P., (2005). *Effect of moisture, temperature, and alkaline on durability of E-glass/vinyl Ester reinforcing bars*. PhD thesis, University of Sherbrooke, Sherbrooke, Quebec, Canada.
- [51] AL-ZAHRANI, M., (2007). *Tensile strength degradation of glass fiber reinforced polymer bars in aggressive solutions both as stand-alone and cast-in-concrete*. In Proceedings of the eighth International Conference on FRP reinforcement for concrete structures, Patras, Greece, s. 1–10.
- [52] KIM, H., PARK, Y., YOU, Y., (2008). Short-term durability test for GFRP rods under various environmental conditions. *Compos. Struct.*, č. 83, s. 37–47.
- [53] ROBERT M, COUSIN P and BENMOKRANE B., (2009). Durability of GFRP reinforcing bars embedded in moist concrete. *Compos Constr.*, č. 13, s. 66–73.
- [54] MUFTI A, ONOFREI M, BENMOKRANE B., (2005). Durability of GFRP reinforced concrete in field structures. *ACI Spec. Publ.*, č. 230, s. 1361–1378.
- [55] ALMUSALLAM T.H., AL-SALLOUM Y.A, ALSAYED S.H., SHERIF EL-GAMAL, AQEL, M., (2013). Tensile properties degradation of glass fiber-reinforced polymer bars embedded in concrete under severe laboratory and field environmental conditions. *Journal of Composite Materials*, roč. 47, č. 4, s. 393-407.
- [56] LORD, H. W., AND DUTTA, P. K., (1988). On the design of polymeric composite structure for cold regions application. *Journal of Reinforced*

- [57] BENMOKRANE, B., RAHMAN, H., (1998). Durability of fiber reinforced polymer composites for construction. *Proceedings of the CDCC'98*, Sherbrooke, Quebec, 692 s.
- [58] SHAO, Y., KOUADIO, S., (2002). Durability of fiberglass composite sheet piles in water. *J. Compos. Constr.*, roč. 6, č. 4, s. 280-287.
- [59] MASHIMA, M., IWAMOTO, K., (1993). *Bond characteristics of FRP rods and concrete after freezing and thawing deterioration*. ACI SP 138, International Symposium on FRP Reinforcements for Concrete Structures, Vancouver, Canada, s. 51-69.
- [60] ALVES, J., EL-RAGABY, A., EL-SALAKAWY, E., (2010). *Bond strength of glass FRP bars in concrete subjected to freeze-thaw cycles and sustained loads*. the 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Beijing, China.
- [61] GAONA, F., (2003). *Characterization of design parameters for composite reinforced concrete systems*. PhD thesis. Texas A&M University.
- [62] BENMOKRANE, B., H ALI, A., (2017). *Durability of FRP in aggressive environments*, Université de Sherbrook, Canada.
- [63] TUF-BAR., (2020). *Bridges/Overpasses*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tuf-bar.com/application/bridges-overpasses/> .
- [64] TUF-BAR., (2020). *Parking garages*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tuf-bar.com/application/parking-garages/> .
- [65] TUF-BAR., (2020). *Buildings*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tuf-bar.com/application/buildings/> .
- [66] TUF-BA., (2020). *Rail/LRT*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tuf-bar.com/application/rail-lrt/> .
- [67] TUF-BAR., (2020). *Sea walls*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tuf-bar.com/application/sea-walls/> .



- [68] TUF-BAR., (2020). *Retaining walls*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tuf-bar.com/application/retaining-walls/> .
- [69] TUF-BAR., (2020). *Mining and tunneling*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tuf-bar.com/application/mining-and-tunneling/> .
- [70] TUF-BAR., (2020). *Airports/runways*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tuf-bar.com/application/airports-runways/> .
- [71] TUF-BAR., (2020). *Medical and IT*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tuf-bar.com/application/medical-and-information-technology/> .
- [72] GIAMUNDO, A. A., VAGO, G., GATTI, M., LUNARDI, G., (2017). *GFRP L'utilisation du TBM*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.rocksoil.com/pdf/272.pdf> .
- [73] ACMA, (2016). *Fiber Reinforces Polymer (FRP) Composites Rebar*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.fdot.gov/docs/default-source/structures/gfrprebarworkshop/GFRPworkshop-2016-ACMA.pdf>
- [74] JANUŠ, O., GIRGLE, F., KOSTIHA, V., ŠTĚPÁNEK, P., ŠULÁK, P., MANSOUR, M., (2001) Vliv povrchové úpravy a zkušební konfigurace na soudržnost vnitřní GFRP výztuže, *BETON TKS*, roč. 18, č. 3, s. 51-57. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/sites/default/files/2018-3-51.pdf>.
- [75] PECCE, M., MANFREDI, G., REALFONZO, R., COSENZA, E., (2001). Experimental and analytical evaluation of bond properties of GFRP bars. *Journal of Materials in Civil Engineering*. roč. 13, č. 4, s. 282–290. ISSN 0899-1561/01/0004-0282–0290.
- [76] CompositesWorld., (2020). *A hidden revolution: composite rebar gains strength*. [online]. [cit.2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/a-hidden-revolution-frp-rebar-gains-strength>
- [77] TUF-BAR., (2020). *The application od GFRP bars in building parking garages*.

[online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.tuf-bar.com/the-application-of-gfrp-bars-in-building-parking-garages/>

- [78] Firep., (2016). *Vienna International Airport*. [online]. [cit. 2020-05-20].  
Dostupné z: [https://sites.google.com/a/firepworld.com/en2/case/vienna-internationalairport?overridemobile=true&fbclid=IwAR238VJ47wEq8LZfnpt7vpSzm\\_UbcwltP7JDUHzipagKXzvTWTA8CnnP2Vf4](https://sites.google.com/a/firepworld.com/en2/case/vienna-internationalairport?overridemobile=true&fbclid=IwAR238VJ47wEq8LZfnpt7vpSzm_UbcwltP7JDUHzipagKXzvTWTA8CnnP2Vf4)
- [79] EMPARANZA, A. R., DE CASO Y BASALO, F., KAMPMANN, F., RODRIGUES DE CASTRO JALLES, P., NANNI, A., (2018). *Durability of mechanical properties of GFRP rebars exposed to seawater*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.claisse.info/2019%20papers/5148.pdf>

## Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 Snímek pultruzní linky pro výrobu FRP výztuže [5] [10] .....</i>	13
<i>Obrázek 2 Snímky řezu FRP výztuže z elektronového mikroskopu, zvětšeno 100x (výřez 2000x) [5] .....</i>	14
<i>Obrázek 3 Profil se skleněnými vlákny [6] .....</i>	18
<i>Obrázek 4 Profil s uhlíkovými vlákny [6] .....</i>	20
<i>Obrázek 5 Uhlíkové vlákno o průměru 6 <math>\mu\text{m}</math> v porovnání s lidským vlasem [8] .....</i>	20
<i>Obrázek 6 Profil s aramidovými vlákny [6] .....</i>	21
<i>Obrázek 7 Profil s čedičovými vlákny [6] .....</i>	22
<i>Obrázek 8 Vystavení GFRP výztuží mořské vodě [79] .....</i>	29
<i>Obrázek 9 Vzorky po 365 dnech expozice; vlevo 60 °C, vpravo 20 °C [34] .....</i>	33
<i>Obrázek 10 Referenční GFRP výztuž uložená v laboratorním prostředí na vzduchu; vpravo GFRP výztuž uložená 365 dní v alkalickém roztoku při teplotě 40 °C [34] .....</i>	33
<i>Obrázek 11 GFRP výztuž uložená v alkalickém roztoku; 20 °C (vlevo zvětšeno 50x; vpravo 200x) [34] .....</i>	33
<i>Obrázek 12 Betonová mostní vozovka s GFRP výztuží [62] .....</i>	36
<i>Obrázek 13 Uložení výztuží před zalitím betonem; Most přes Assiniboine River; Brandon, Manitoba, Canada [76] .....</i>	36
<i>Obrázek 14 Most přes Red River, Manitoba, Canada [76] .....</i>	37
<i>Obrázek 15 Železniční pražce plně vyztužené z GFRP výztuží – Miami železniční trať [73] .....</i>	37
<i>Obrázek 16 Koleje metra z GFRP výztuží v Miami-Dade [76] .....</i>	38
<i>Obrázek 17 Vyztužení podlahy GFRP výztužemi v parkovacím domě, Quebec, Canada [77] .....</i>	38
<i>Obrázek 18 Vlnolam – Estee Lauder estate Palm Beach [73] .....</i>	39
<i>Obrázek 19 Opěrná zeď - Maui [73] .....</i>	39
<i>Obrázek 20 GFRP výztuž do prefabrikovaného ostění tunelu [72] .....</i>	40
<i>Obrázek 21 Přistávací dráha, Vídeň, Rakousko [78] .....</i>	40
<i>Obrázek 22 Povrchové úpravy FRP v porovnání s ocelovou výztuží [11] (přeloženo) .....</i>	41
<i>Obrázek 23 Snímky rozhraní mezi výztuží a povrchovou úpravou výztuže opískováním pro různé druhy FRP výztuže [11] (přeloženo) .....</i>	42

<i>Obrázek 24 Snímky rozhraní mezi výztuží a povrchovou úpravou výztuže opískováním pro různé druhy FRP [11]. Vyšší zvětšení. (přeloženo) .....</i>	42
<i>Obrázek 25 Pul – out test - test vytržením a) sestava experimentu. b) schéma zatěžování. [11] (přeloženo) .....</i>	43
<i>Obrázek 26 Typy porušení pro jednotlivé druhy výztuže při provádění zkoušky pull-out test [11] (přeloženo) .....</i>	44
<i>Obrázek 27 Sestava pro a) centrický pull-out test, b) excentrický pull-out test [74] .....</i>	47
<i>Obrázek 28 Schéma zkušební sestavy nosníkové zkoušky [74] .....</i>	48
<i>Obrázek 29 Reálná nosníková zkouška: a) uspořádání, b) posuvná podpora [74] .....</i>	48
<i>Obrázek 30 Ukázka osazení optického vlákna na FRP výztuž [11] .....</i>	49
<i>Obrázek 31 Schéma zkoušení FRP výztuží .....</i>	50

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Základní informace o vybraných typech FRP výztuží [11] (přeloženo)</i>	15
<i>Tabulka 2 Typy FRP výztuží (PREFA REBAR) [10]</i> .....	15
<i>Tabulka 3 Mechanické a fyzikální vlastnosti FRP výztuží (PREFA REBAR) [10]</i> ..	16
<i>Tabulka 4 Vlastnosti jednotlivých druhů skel [4]</i> .....	18

## Seznam grafů

<i>Graf 1 Procentuální zastoupení jednotlivých složek v kompozitu vyztužených skleněnými vlákny (GFRP glass fiber reinforced plastics . a) formy skleněných vláken. b) druhy matric [1] (přeloženo) .....</i>	14
<i>Graf 2 Tahová deformační křivka jednotlivých vláken: a) uhlíková (vysokomodulová HM); b) uhlíková (vysokopevnostní HS); c) aramidová (Kevlar 49); d) S - skleněná; e) E - skleněná; f) čedičová [2] (přeloženo) .....</i>	17
<i>Graf 3 Graf chování matrice z epoxidových pryskyřic různého modulu při zatížení tahem (modul pružnosti matrice je od 2,1 až 6 GPa) [19] .....</i>	23
<i>Graf 4 Závislost pevnosti v tahu GFRP výztuže na expoziční době a teplotě prostředí; GFRP – E – červená; GFRP – AR – zelená [34](přeloženo) .....</i>	34
<i>Graf 5 Závislost modulu pružnosti GFRP výztuže na expoziční době a teplotě prostředí; GFRP – E – červená; GFRP – AR – zelená .....</i>	35
<i>Graf 6 Porovnání soudržnosti různých výztuží s betonem při pull-out testu. [11] (přeloženo) .....</i>	45