



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

**STUDIUM VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍCH
MATERIÁLŮ S POLYMERNÍ MATRICÍ
A DLOUHOVLÁKNOVOU VÝZTUŽÍ (FRP)**

STUDY OF PROPERTIES OF FIBER-REINFORCED POLYMERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Fojtášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Martin Fojtášek
Název	Studium vlastností kompozitních materiálů s polymerní maticí a dlouhovláknovou výztuží (FRP)
Vedoucí práce	Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá sledováním vlastností FRP výztuže při působení agresivních prostředí, která způsobují degradaci. V teoretické části bakalářské práce je popsán způsob výroby, nejčastěji využívané druhy FRP profilů, složení FRP profilů, odolnost FRP profilů vůči působení agresivních prostředí a trvanlivost FRP materiálu v degradačním prostředí. Dále jsou stručně popsány nejčastější druhy zkoušek na FRP profilech. V experimentální části této bakalářské práce byly definovány podmínky pro laboratorní testování FRP vzorků, které byly uloženy v alkalickém prostředí při teplotách 20 °C, 40 °C a 60 °C. Vzorky FRP byly uloženy a testovány po 90 dnech. Následně jsou popsány změny fyzikálních vlastností výztuží v čase, při uložení v agresivním prostředí.

KLÍČOVÁ SLOVA

FRP, agresivní prostředí, trvanlivost, degradace, vlhkost, alkalické prostředí, tepelné vlivy, UV záření, druhy zkoušek, testování

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with monitoring the properties of the FRP reinforcement when exposed to aggressive environments that cause degradation. In the theoretical part of this thesis there are described the method of production, the most commonly used types of FRP profiles, the composition of the FRP profiles, durability of FRP profiles against the action of aggressive environment and durability of the FRP material in the damage environment. Further more there are briefly described the most common types of tests on FRP profiles. In the experimental part of this thesis there are defined conditions for laboratory testing of FRP samples, which were stored in an alkaline environment at temperatures of 20 degrees, 40 degrees and 60 degrees. These samples of the FRP were stored and tested after 90 days. Subsequently there are described the changes of the physical properties of rebar in a time when saving in an aggressive environment.

KEYWORDS

FRP, aggressive environments, durability, degradation, moisture, alkaline environment, thermal influences, ultraviolet radiation, kinds of tests, testing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Martin Fojtášek *Studium vlastností kompozitních materiálů s polymerní maticí a dlouhovláknovou výztuží (FRP)*. Brno, 2017. 71 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 19. 5. 2017

Martin Fojtášek

autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 19. 5. 2017

Martin Fojtášek

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto mé vedoucí bakalářské, práce paní Ing. Lence Bodnárové, Ph.D., za odborné vedení, cenné připomínky a rady, které mi při vypracování bakalářské práce velice pomohly.

Obsah

ÚVOD	10
CÍLE PRÁCE	11
1. FRP KOMPOZITY	11
1.1 Všeobecné vlastnosti kompozitů.....	12
1.2 Druhy dlouhvláknových výztuží	13
2. DRUHY VÝZTUŽNÝCH VLÁKEN PRO FRP KOMPOZITY.....	14
2.1 Skleněná vlákna	14
2.2 Uhlíková vlákna	15
2.3 Přírodní vlákna.....	16
2.4 Aramidová vlákna.....	17
2.5 Čedičová (bazaltová) vlákna.....	18
3. POLYMERNÍ MATRICE.....	19
3.1 Obecné informace	19
3.2 Termosetové pryskyřice	19
3.2.1 Epoxidové pryskyřice.....	20
3.2.2 Polyesterová pryskyřice	21
3.2.3 Vinylesterová pryskyřice.....	22
3.3 Termoplastické pryskyřice	23
4. ZPŮSOB VÝROBY FRP PROFILŮ	24
5. TRVANLIVOST FRP JAKO VNITŘNÍ VÝZTUŽ	26
5.1 Vliv vlhkosti.....	27
5.2 Účinky chloridů.....	27
5.3 Mechanické zkoušení	28
5.4 Účinky Alkalíí.....	29
5.4.1 Vystavení alkalickému roztoku – vlákna	29
5.4.2 Vystavení alkalickému roztoku – pryskyřice	29
5.4.3 Alkalické expozice za urychlených podmínek (tlakové nebo při zvýšené teplotě)	
30	
5.5 Vliv trvalého tlaku (roztržení při namáhání).....	32
5.6 Ultrafialové záření.....	33
5.7 Vliv kyselin	33
5.8 Extrémní teploty (vliv horka a mrazu).....	34
5.9 Shrnutí vlivu působení agresivních prostředí na FRP profily	37
6. METODA ZKOUŠENÍ VLASTNOSTÍ FRP VÝZTUŽÍ PRO ULOŽENÍ V AGRESIVNÍCH PROSTŘEDÍCH	38

6.1	Stanovení průřezových vlastností FRP výztužného prutu.	38
6.2	Stanovení tahových vlastností.....	40
6.3	Zkušební metoda pro testování pevnosti spoje	44
7.	METODIKA EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ	45
8.	POPIS ULOŽENÍ VZORKŮ	46
9.	DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY VÝZTUŽE	48
9.1	Destruktivní zkoušení výztuže po době uložení 90dní – E-SKLO	52
9.2	Destruktivní zkoušení výztuže po době uložení 90dní – AR-sklo.....	54
9.3	Porovnání naměřených hodnot středních tahových pevností a modulů pružnosti FRP výztuží s vlákny E-SKLA a AR-SKLA	54
10.	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....	60
	ZÁVĚR	63
	BIBLIOGRAFIE	65
	SEZNAM ZKRATEK.....	68
	SEZNAM TABULEK.....	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ	70

ÚVOD

V dnešní době, kdy technologie a výzkum směřují k vývoji nových a dokonalejších materiálů, došlo i ve stavebnictví dlouholetým výzkumem k určitému pokroku. Běžné betonové konstrukce jsou nejčastěji vyztuženy běžnou ocelářskou výztuží, předpjatou ocelí nebo rozptýlenými drátky.

I přesto, že v dnešní době je stále trendem používat k vyztužování betonových prvků ocelovou výztuž, lze do pokroku ve vývoji zařadit kompozitní profily s polymerní maticí a dlouhovláknovou výztuží známé též jako FRP profily. Můžeme jimi vyztužovat betonové konstrukce, zdivo i dřevěné konstrukce.

Vzhledem k tomu, že FRP materiály jsou nekovové, lze se vyhnout problému s degradací výztuže vlivem koroze. Cílem této kompozitní výztuže s nekovovými vlákny je možnost nahradit klasickou ocelovou výztuž. Možné použití, kde tuto výztuž aplikovat a kde najde své uplatnění je především v chemickém průmyslu, inženýrských konstrukcích, energetice (potrubní kanály, podzemní kolektory), v městské infrastruktuře a konstrukcích, které jsou trvale vystaveny kontaktu se zeminou.

Použití FRP profilů ve výhodné nejen z hlediska jejich trvanlivosti v betonu, ale také díky vysoké pevnosti v tahu pouze ve směru zpevňujících vláken. FRP profily jsou anizotropní materiály v důsledku orientace vláken pouze v podélném směru. Výztuže z FRP materiálu mohou být náchylné na degradaci a proto je detailně probírána problematika působení agresivních prostředí, vlivu vlhkosti, působení teploty, UV záření a v neposlední řadě i vliv alkalického prostředí, neboť se předpokládá spolupůsobení výztuží s betonem.

Z hlediska samotné výroby FRP profilů mohou být jako výztužná vlákna použita nejčastěji vlákna skleněná. Dále se používají vlákna uhlíková, ale i čedičová a kevlarová. Pojivem výztužných vláken je pryskyřice na bázi polyesterové, epoxidové, vinylesterové nebo fenolické. Při výrobě těchto výztuží je nutné věnovat pozornost úpravám povrchu, kterými docílíme spolupůsobení FRP výztuží a betonu. Mezi výhody těchto výztuží můžeme zařadit relativně nízkou hmotnost, dobrou trvanlivost a tím i delší životnost. Mezi nevýhody pak řadíme vyšší cenu a odlišné vlastnosti v různých směrech. [6]

CÍLE PRÁCE

Cílem teoretické části této bakalářské práce bylo zpracovat rešerši, která se týká kompozitních výztuží z FRP materiálu a působení vlivu agresivních prostředí. Teoretická část se zabývá popisem složení FRP materiálů (výztužná vlákna a matrice), jsou zde popsány nejčastěji používané profily a jejich všeobecné fyzikálně-mechanické vlastnosti. Dále je řešena problematika trvanlivosti a odolnosti FRP profilů vůči působení agresivních prostředí. Nejdůležitější v této problematice je vliv vlhkosti, účinky chloridů a alkalického prostředí na vlastnosti FRP výztuže. Probírána je však také problematika UV záření, vliv ohně, vliv kyselin, ale také mechanické zkoušení FRP profilů a vliv trvalého tlaku.

Cílem praktické části práce bylo zkoumání působení prostředí na výztuže PREFA REBAR GFRP. Jelikož se jedná o výztuže určené k vyztužování betonových konstrukcí, je vhodné, aby kromě simulování účinku působení vody a vlhkosti byl také zohledněn vliv alkalického prostředí. Beton, který může nabývat hodnoty pH 12,5 až 13 totiž může především u kompozitní výztuže se skleněnými vlákny způsobit výrazné snížení pevnosti, houževnatosti a jiných vlastností. Při tomto zkoumání výztuže je současně s těmito vlivy zkoumán také účinek teploty na vlastnosti výztuže.

Výstupem této práce je zhodnocení pevnosti a modulu pružnosti při působení definovaného prostředí a porovnání vlastností degradované výztuže s výztuží s nedegradovanou. Porovnány budou také pevnosti a moduly pružnosti pro 3 různé teploty, ve kterých byly výztuže po čas degradace uloženy. Bude také provedeno doporučení pro další výzkum.

1. FRP KOMPOZITY

Existuje celá řada možností, jak definovat kompozitní materiál. Jako kompozit můžeme označit materiál, který není čistá látka a obsahuje více než jednu složku. Tímto tvrzením ovšem není myšlena směs materiálů. Kompozity nemohou být označovány za kombinaci dvou materiálů, protože kombinací se získávají odlišné vlastnosti, než jaké poskytují složky samotné. Kompozitní složky musí být chemicky, mechanicky i fyzikálně odlišné. [2]

Jedna z možných definic kompozitního materiálu zní následovně: 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.“ [1]

Kompozity se skládají z výztuže a matrice. Výztuž je definována jako nespojitá složka, která je tvrdší, tužší, pevnější a navíc zabraňuje vzniku trhlin ve struktuře. Oproti tomu matrice (pojivo), je spojitá a zároveň poddajnější složka, která výztuž fixuje a udrží ji tak v požadované poloze.

Materiál se stane kompozitním tehdy, pokud se jedná o heterogenní systém, který je složený ze dvou či více fází. Je nutností dokonale propojit vlastnosti všech složek kompozitu na jejich rozhraní a zajistit tak co možná nejlepší přenos napětí při zatěžování.

Vyztužující vlákna jsou u dlouhovláknových polymerních kompozitů nositelem především pevnosti a tuhosti. Dlouhovláknový kompozitní materiál je takový materiál, který má poměr délky vlákna k jeho průměru $L/D > 100$ [4]

Úkolem matrice (pojiva) je udržovat vlákna v požadovaném směru a vzdálenosti od vnějšího prostředí. Dále slouží jako ochrana výztuže před mechanickým a chemickým poškozením a také má za úkol umožnění přenosu vnějšího napětí do výztuže. [3]



Obrázek 1: Moderní kompozitní materiály jako náhrada klasické výztuže do betonu[5]

1.1 Všeobecné vlastnosti kompozitů

Kompozity jsou materiály obsahující skleněná, uhlíková, aramidová, ale i polyetylenová vlákna a polymerní matici, která nejčastěji bývá z epoxidových, polyesterových nebo

vinylesterových pryskyřic. U vyztužených kompozitů se většinou požaduje vyztužení ve směru namáhání. Takovýmto vyztužením získáme anizotropní materiál. Anizotropní materiál je takový, který má v různých směrech odlišné vlastnosti. Tímto se tento typ vyztuže liší od vyztuže ocelové, která má naopak vlastnosti izotropní (ve všech směrech stejné).[7]

1.2 Druhy dlouhvláknových vyztuží

Dlouhvláknové vyztuže jsou, takové které mají poměr mezi délkou a průměrem >100 nebo jsou to vlákna kontinuální.

Jednosměrové kompozity(vlákna jsou orientována převážně v jednom směru):

- prepregy (nevytvrzenou pryskyřicí preimpregnované vrstvy vláken ve tvaru tenkých pásů různých šířek)

- tažené profily (tyčovina)

Mnohosměrové kompozity(vlákna jsou náhodně nebo pravidelně orientována dvěma či více směry)

- prepregy (nevytvrzenou pryskyřicí preimpregnované vláknové rohože či tkaniny)

- lamináty (střídání různě orientovaných vrstev jednosměrových kompozitů)

- lamináty s tkanou vyztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna před prosycením pryskyřicí utkaná různými technologiemi)

- lamináty s netkanou vyztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna zpracována do roun bez tkaní)

- tažené profily lineární prvky s konstantním průřezem s kombinací vyztužujících vláken a netkaných či tkaných rohoží (desky, trubky, komplikované profily).

2 DRUHY VÝZTUŽNÝCH VLÁKEN PRO FRP KOMPOZITY

2.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou nejrozšířenější a nejčastěji používané zpevňující vlákna pro kompozitní materiály s polymerní matricí. Vyrábějí se tavením sklářského kmene, což je směs křemenného písku (cca 70%), vápence, potaše a collemanitu, který obsahuje bór. Sklářský kmen se taví přibližně při 1400 °C a z taveniny se v jednostupňovém procesu přímo vytahují elementární vlákna. Tavenina vytéká dnem pece z platino-iridiové slitiny malými otvory o \varnothing 1-2 mm. Průměr vláken je 5-25 mikrometrů v závislosti na rychlosti odtahu.

Roztavené sklo může být vinuto do nekonečných vláken, které se dále upravují v průběhu výroby. Jednou z možností, jak vlákna upravovat je roving. Roving je forma vláken navinutých do paralelně sdružených pramenů bez zakroucení. Vlákenné povrchy jsou potaženy lubrikační složkou pro zlepšení smáčení matice a poskytují lepší adhezi mezi složkami kompozitu. Potažení skleněných vláken s kopulačním činidlem zlepšuje pevnost vazeb a snižuje počet dutin v materiálu.

Nejběžnější skleněná vlákna jsou vyrobena z E-skla, S-skla a skel odolávajícím alkalicko-resistnímu prostředí. E-sklo je nejlevnější ze všech typů skel. Má široké uplatnění ve vysoce kvalitním sklolaminátovém průmyslu. S-sklo má vyšší pevnost v tahu a vyšší modul než E-sklo. Skleněná vlákna odolávající alkalicko-resistnímu prostředí, které pomáhají předcházet alkalické korozi v cementové matrici jsou vyráběny s přídavkem zirkonia. Alkalicko-resistní skleněná vlákna, která jsou kompatibilní s běžně používanou preimpregnovanou pryskyřicí, však nejsou v současné době k dispozici. Pevnost v tahu skleněných vláken se snižuje při zvýšených teplotách, s chemickou korozi a s časem pod trvalým zatížením. [10]

Typy skleněných vláken:

E – sklo – bezalkalické sklo, které je cenově nejvýhodnější a nejběžněji používané

R, S sklo – dobré mechanické vlastnosti, ale vyšší cena

D – sklo – borosilikátové sklo s dielektrickými vlastnostmi

C – sklo – vyšší chemická odolnost [10]

Níže je uveden výčet vyráběných skelných vláken a popis základních vlastností:

Tabulka 1: Vlastnosti skleněných vláken [8]

	Jednotka	E-sklo	S-sklo	D-sklo	C-sklo
Složení					
SiO ₂	%	53-55	60	72-75	60-65
Al ₂ O ₃	%	14-15	24	-	<6
B ₂ O ₃	%	42588	-	<23	<7
CaO	%	17-22	9	-	14
MgO	%	<5	6	-	<3
K ₂ O,Na ₂ O	%	<1	<0,5	<4	42651
Ostatní oxidy	%	1	-	<1	<1,5
Vlastnosti					
Hustota	g.cm ³	2,6	2,53	2,14	2,45
Pevnost v tahu	Mpa	3400	4400	2500	3100
Modul pružnosti	Gpa	73	86	55	70
Tažnost	%	3,5-4	4,5	3	3,5-4
Specifický elektrický odpor	Ω.cm ⁻¹	1015	1014-1015	-	1014-1018
Koeficient teplotní roztažnosti	10 ⁻⁶ K ⁻¹	5	4	42431	7,2

2.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyrábějí tepelným rozkladem polyakrylonitrilu (PAN). Atomy uhlíku jsou uspořádány v rovnoběžných rovinách krystalografických pravidelných šestiúhelníků tvořících grafit, zatímco v uhlíku jsou vazby mezi vrstvami slabé, a proto mají pouze dvourozměrné uspořádání. Postup výroby začíná pyrolýzou – prodloužením vlákna při ~200 °C a orientací molekul. Následuje stabilizace v oxidační atmosféře po dobu 10 hodin a teplotě 220 – 300 °C. Dalším zvyšováním teploty v inertní atmosféře roste modul pružnosti a pevnost vlákna, za teploty 1000 – 1500 °C dochází ke karbonizaci a nakonec grafitizaci při teplotě 2500-3000 °C vzniká grafitická mikrostruktura. Grafit má vyšší modul pružnosti než je uhlík, proto se výrobě vláken s vysokým modulem pružnosti říká grafitizace. Uhlíková vlákna vykazují vysokou specifickou pevnost a tuhost. Obecně platí, že se zvyšujícím se modulem

pružnosti rostemez pevnosti v tahu a snižuje se selhání prodloužení. Pevnost v tahu a modulpružnosti uhlíkových vláken jsou stabilní se stoupající teplotou a jsou také vysoce odolné protiagresivním faktorům životního prostředí. Největší nevýhodou uhlíkových vláken je jejich vysoká cena.Jsou 10 až 30 krát dražší než E-skla. Vysoké náklady na výrobu těchto vláken je způsobenovysokou cenou surovin a dlouhého procesu karbonizace a grafitizace.[10]

Níže je uveden popis základních vlastností uhlíkových vláken.

Tabulka 2: Vlastnosti uhlíkových vláken [8]

	Jednotka	Vysokopevnostní (HS)	Vysokomodulová (HM)
Hustota	g.cm ³	1,79	1,8
Pevnost v tahu	Mpa	5400	2350
Modul pružnosti	Gpa	290	358
Tažnost	%	1,7	0,6
Specifický elektrický odpor	$\Omega.cm^{-1}$	-	1x10E-3
Koeficient teplotní roztažnosti	10 ⁻⁶ K ⁻¹	-	-0,5
Tepelná vodivost	W/m K	-	710

2.3 Přírodní vlákna

Vlákna z obnovitelných zdrojů, zejména na bázi celulózy – sisal, len, konopí, bavlna, juta nalézají uplatnění jako levnější alternativa skleněných vláken zejména v takzvaném třetím světě, ale v poslední době jsou stále více využívána při výrobě pevnostně méně náročných a přitom lehkých dílců například v interiérech automobilů a jiných dopravních prostředků. Používají se ve formě pramenců a nití, netkaných materiálů – rohoží nebo tkanin.[8],[10],[11]

2.4 Aramidová vlákna

Aramid je obecný termín pro skupinu organických vláken, která mají nejnižší měrné hmotnosti a nejvyšší pevnosti v tahu vyztužených vláken. Polymerní vlákna za použití vhodného způsobu zpracování, mohou vykazovat vysokou pevnost a ztuhlost. To se děje v důsledku sladění polymerních řetězců podél osy vláken.

Aramidová vlákna jsou v současné době vyráběna a dodávána na trh pod obchodními názvy Kevlar, Twaron nebo Technora. Kevlarová vlákna se vyrábějí syntetizací z monomeru parafenylendiaminu a terephthaloyl chloridu kyseliny chlorovodíkové jako vedlejšího produktu. Kevlar je aromatický polyamid s pevnými aromatickými kruhy. Existuje několik typů kevlarových vláken: Kevlar 29 pro kompozity s maximálním účinkem pevnosti a minimálním poškozením, kevlaru 49 na vyztužené plasty a kevlar 149 s nejvyšším modulem pružnosti v tahu mezi všemi dostupnými aramidovými vlákny.

Kevlar 49 se chová v tahu jako křehký materiál, ale na základě zatížení tlakem je tažný a absorbuje velké množství energie. To také ukazuje velkou míru plasticity v tlaku, když se podrobí ohýbání. Tento typ chování, který nebyl zaznamenán u skleněných nebo uhlíkových vláken, dává kevlarovým kompozitům lepší odolnost proti nárazu.

Kevlar má velmi dobrou odolnost proti únavě materiálu vlivem zatížení, nízké tečení a může odolávat poměrně vysokým teplotám. Modul pružnosti kevlarových vláken snižuje lineárně, když teplota stoupá. Při teplotě při 180 ° C ale zachovávají více než 80% své původní pevnosti. Vlákna jsou dále odolná mnoha chemikáliím, ale mohou být přesto degradovány některými kyselinami a zásadami.

Nevýhodou kevlarových vláken je adsorpce vody a citlivost na UV záření. Při vysokém obsahu vlhkosti mají tendenci kevlarová vlákna intenzivně praskat a podélně se tak dělit.

Má nejlepší rázovou houževnatost, nejnižší hustotu, velmi dobré pevnostní parametry a tlumí vibrace. Je odolné plameni, samozhášivé a netaví se. Vlákna jsou chemicky odolná a mají lepší dielektrické vlastnosti než vlákna skleněná.

Typy aramidových vláken:

- Vysokomodulové– vlákna Kevlar 49® nebo Twaron HM® jsou určena pro letecké aplikace.

- Nízkomodulové– vlákna Kevlar 29® nebo Twaron LM® jsou používána na ochranné prostředky jako jsou rukavice, neprůstřelné vesty, ale také například na lana.[9]

Níže je uveden popis základních vlastností aramidových vláken:

Tabulka 3: Vlastnosti aramidových vláken [8]

	Jednotka	Nízkomodulová (LM)	Vysokomodulová (HM)
Hustota	g.cm ³	1,44	1,45
Pevnost v tahu	Mpa	2800	2900
Modul pružnosti	Gpa	59	127
Tažnost	%	4	1,9
Specifický elektrický odpor	Ω.cm ⁻¹	1015	1015
Koeficient teplotní roztažnosti	10 ⁻⁶ K ⁻¹	-2,3	-4,1
Absorpce vlhkosti	%	7	3,5
Výrobce	DuPont	Kevlar 29	Kevlar 49
	Akzo	Twaron LM	Twaron HM

2.5 Čedičová (bazaltová) vlákna

K přírodním vláknům lze řadit i minerální vlákna, kde se zatím nejvíce rozšířila vlákna čedičová (bazaltová).

Čedičová vlákna jsou jednosložkové materiály získané tavením rozdrcené sopečné lávy, které mají lepší fyzické a mechanické vlastnosti než skleněná vlákna a podstatně levnější než vlákna uhlíková. Hlavními výhodami čedičových vláken jsou: požární odolnost, významná schopnost zvukové izolace, schopnost odolávat vibracím a schopnost odolávat vůči chemicky aktivnímu prostředí. Teplota tání čediče je 1450°C a tato vlastnost ho dělá užitečným v aplikacích, které vyžadují odolnost proti ohni. Zkoumání čedičových vláken pro konstrukční výztuž do betonových konstrukcí je ovšem stále ve fázi vývoje.[8][10][11]

3 POLYMERNÍ MATRICE

3.1 Obecné informace

Polymerní matrice může být považována v kompozitních materiálech za strukturální a ochranný komponent. Pryskyřice je obecný termín používaný k označení polymeru nebo směsi tohoto produktu s různými přísadami a nebo směsí chemicky reaktivních komponentů. Obecně platí, že polymerem je nazýván systém pryskyřice během zpracování a po vytvrzení. Výroba kompozitních materiálů a jejich vlastnosti jsou zásadně ovlivněny pryskyřicí, jejím chemickým složením a fyzikálními vlastnostmi. Matricové materiály obecně tvoří 30-60% objemu polymerního kompozitu. Hlavním funkčním a konstrukčním požadavkem matrice je vázat výztužná vlákna dohromady, přenášet a rozložit zatížení k vláknům a chránit vlákna proti mechanickému opotřebení. Proto je volba matrice nesmírně důležitá při navrhování kompozitních systémů a bude mít vliv jak na mechanické, tak i na fyzikální vlastnosti finálního produktu.[10],[12]

Existují dvě základní třídy polymerních matic použitých u FRP kompozitů: Termosetové a termoplastické pryskyřice. Termosetové pryskyřice jsou polymery, které jsou tvořeny z prekurzoru (chemické sloučeniny, která se účastní chemické reakce vzniká jiná sloučenina). Tento prekurzor má nevratně nízkou molekulovou hmotnost a nízkou viskozitu. Tyto polymery mají silné molekulární i mezimolekulární vazby. Rozvíjejí síťovou strukturu, která je odlišná svou formou. Pokud se pryskyřice zahřívá po vytvrzení, tak už se netaví a udrží si svůj tvar. Pokud není dostatečně vytvrzená, začne se při vysokých teplotách tepelně rozkládat.[10],[12]

Naopak termoplasty jsou polymery, které nevytváří vzájemné vazby. Jsou schopny se přetvořovat opakovaným změknutím a tvrzením při vystavení teplotním cyklům dosahujících hodnoty nad jejich tvářecí teplotu.[10],[12]

3.2 Termosetové pryskyřice

Termosetové pryskyřice mají nízkou počáteční viskozitu. Dají se snadno zpracovávat a náklady na jejich zpracování jsou nízké. Trojrozměrná síť termosetů vykazuje ve výsledku menší průtok v tlaku, lepší rozměrovou stabilitu, nižší koeficient tepelné roztažnosti a větší odolnost proti rozpouštědlům. Termosetové polymery mají však omezenou dobu skladování. Dále dlouhá doba zhotovování a poruchy při nízkém napětí mají za následek nízkou odolnost

vůči nárazu. Doba použitelnosti je čas, kdy pryskyřice může být skladována, aniž by došlo k její degradaci. Zahřívací cykly mohou probíhat při teplotě místnosti nebo při vysoké teplotě a můžou se lišit od minut až po hodiny, v závislosti na volbě katalyzátoru a reaktivity pryskyřice. Tyto reakce jsou exotermní a želatinace je obvykle rychlá. Po vytvrzení směsi pryskyřice zhoustne, uvolňuje teplo, zpevní se a zmenší svůj objem. Objemové smrštění po vytvrzení se liší rozmezí od 4% u epoxidových pryskyřic až po 8% u polyesterových pryskyřic. Vzhledem k tomu, že se vláknitá výztuž nesráží, můžou vzniknout vlivem vnitřního pnutí praskliny. Tím dochází i k vychýlení vláken a rozměrovým nepřesnostem. Pro běžnou aplikaci se nejvíce využívá preimpregnovaných pryskyřic, epoxidových, polyesterových a vinylesterových. Typické vlastnosti preimpregnovaných matric jsou uvedeny v tabulce 4. [10],[12]

3.2.1 Epoxidové pryskyřice

Pojem epoxidová pryskyřice definuje třídu termosetických pryskyřic připravených polymerací sloučenin obsahujících více než jednu epoxidovou vazbu. Před přidáním vláken se malé množství reaktivních tvrdidel přidá ke kapalné pryskyřici pro iniciaci polymerace. Hustota zesítnění závisí na chemické struktuře počáteční pryskyřice, tužidla a reakčních podmínek. Příčné vazby vytvořené v průběhu vytvrzování mají významnou úlohu při stanovení konečné pevnosti epoxidu. Modul pružnosti v tahu a pevnost v tahu, tepelná stabilita a chemická odolnost jsou zlepšeny větší hustotou vazby. Na druhé straně je snížena lomová houževnatost pryskyřice. Vysoce výkonné epoxidy byly připraveny s různými fenoly a aromatickými aminy. Epoxidové pryskyřice mohou být částečně vytvrzené tím, že výztuž může být předem impregnována s kapalnou pryskyřicí, čímž se získá takzvaný prepreg (polotovary k výrobě vláknových kompozitů).[10]

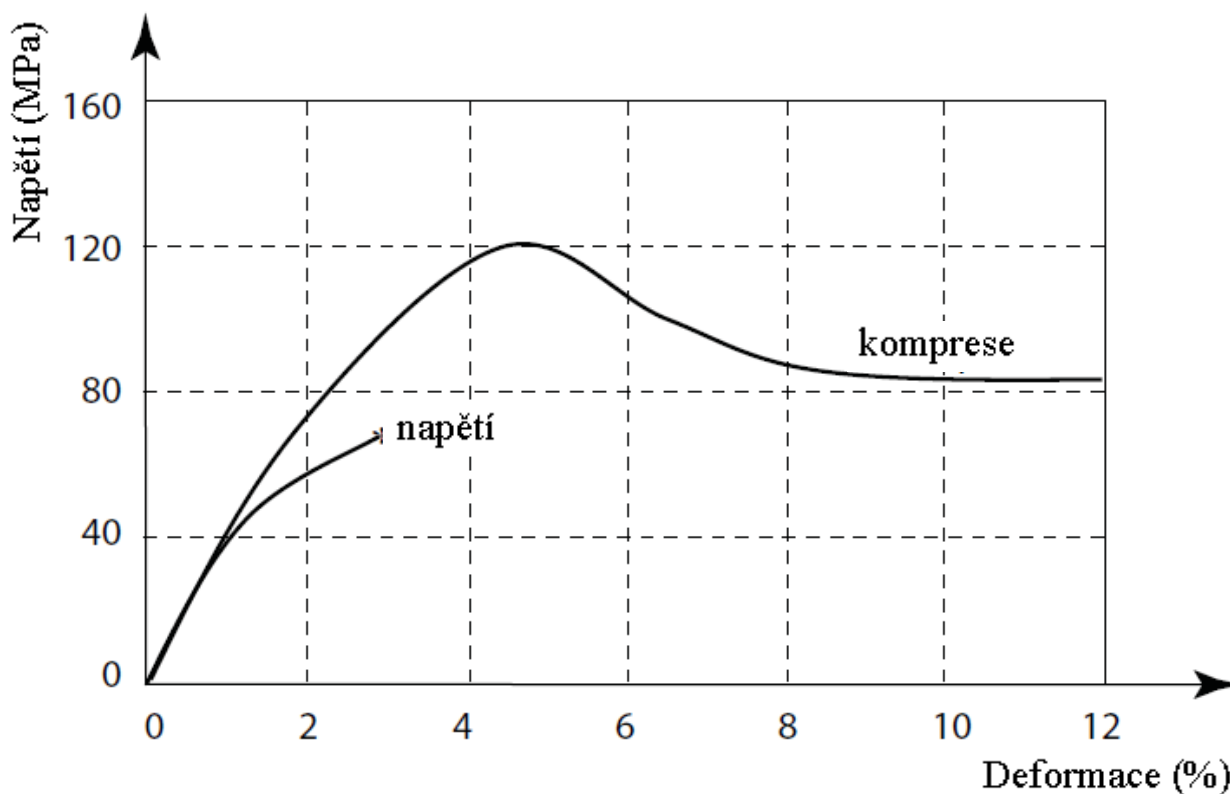
Mezi hlavní výhody epoxidových pryskyřic patří dobré mechanické vlastnosti, snadné zpracování, nízké smrštění během vytvrzování (což vede k dobrým vlastnostem při použití jako lepidla) a dobrou přilnavost na širokou škálu vláken. Epoxidy mají vysokou odolnost proti korozi a jsou méně náchylné na vliv vody a tepla, než jiné polymerní matrice. Vytvrzování těchto pryskyřic se provádí při teplotách v rozmezí mezi 5 °C a 150 °C. Hlavní nevýhodou epoxidových pryskyřic je jejich poměrně vysoká cena a dlouhá vytvrzovací doba. Náklady na epoxidy jsou úměrné jejich výkonnosti, a mění se v širokém rozsahu. Epoxidy jsou obecně dražší než polyestery a vinylestery. Houževnatost pryskyřice a kompozitu může být řízena přidáním aditiv, včetně termoplastů.[10]

3.2.2 Polyesterová pryskyřice

Tyto všeobecně používané nenasycené polyesterové pryskyřice jsou vyrobeny za použití etylenu glykolu, a to buď orthoftalové nebo isoftalové kyseliny, jako nasyčené dikyseliny, a nebo fumarové jako nenasycená dikyselina. Široká škála polyesterů je k dispozici na základě výběru dikyseliny. Flexibilita polyesterů může být řízena volbou dikyselina diolů. Poměrně pružné polyestery jsou vyrobeny z vysoce alifatických prekurzorů. Polyesterové pryskyřice jsou nízké viskozity na bázi nenasycených polyesterů, které jsou rozpustné v reaktivní monomer, jako je styren. Polyesterové pryskyřice jsou formulovány tak, že mají dobrou odolnost vůči UV záření a proto se mohou použít i v exteriéru. Do exteriéru je vhodná polyesterová matrice vyztužená skelnými vlákny. Trvanlivost tohoto kompozitu je předlouhodobém působení okolních vlivů ovlivněna pouze nepatrnou změnou zabarvení a zanedbatelnou ztrátou pevnosti. Trvanlivosti a odolnosti vůči erozi vláken může být docíleno doplněním styrenu o methylnmethakrilát (MMA). Odolnosti vůči hoření polyesterových pryskyřic může být dosaženo použitím výplně nebo speciálně vyvinuté samozhášecí polyesterové pryskyřice, v závislosti na stupni odolnosti. Pomocí halogenů vpravených do polyesterové pryskyřice bylo zjištěno, že zlepšují odolnost matrice proti vzplanutí. Polyesterové pryskyřice se používají v aplikacích, které vyžadují odolnost proti korozi.

Použití skleněných vláken nezlepší, právě naopak může dokonce snížit odolnost proti korozi polyesterové pryskyřice. To platí zejména v silně leptavém a fluorovodíkovém prostředí, protože tyto chemikálie mohou útočit a rozpouštět skleněná vlákna. Jiné chemické látky se přidávají pro prodloužení doby zpracovatelnosti, upravují chemické struktury mezi příčnými vazbami a snižují viskozitu pryskyřice. Některé údaje o materiálu pro polyesterové pryskyřice jsou uvedeny v tabulce 4. Pomocí libovolného vláknitého vyztužení se výrazně zlepšují mechanické vlastnosti pryskyřice. Hlavní nevýhodou polyesterové pryskyřice je její vysoké objemové smrštění. Toto objemové smrštění může být sníženo přidáním termoplastické složky. Chemická vazba mezi různými řetězci atomů v polymeru může mít vliv na vlastnosti polyesterových pryskyřic stejným způsobem, jako u epoxidových pryskyřic.

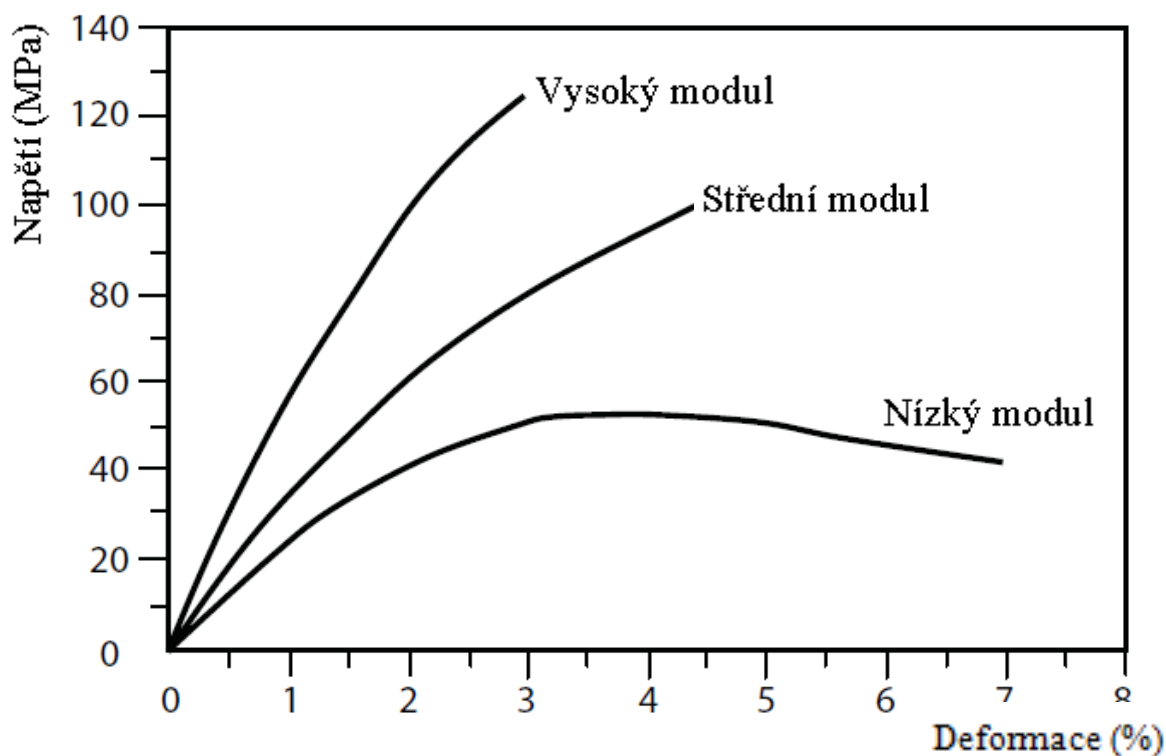
Obr. 2 znázorňuje typické křivky napětí a deformace pro polyesterovou matrici. Test je prováděn v tahu a tlaku. Graf ukazuje nelineární vztah a to je funkce viskoelastické povahy.



Obrázek 2: Křivky napětí-deformace pro všeobecné účely polyesterovou pryskyřicí [10]

3.2.3 Vinylesterová pryskyřice

Vinylestery jsou pryskyřice na bázi metakrylátu a akrylátu. Některé variace obsahují uretan a esterové přemostující skupiny. Vzhledem ke své chemické struktuře mají tyto pryskyřice méněpříčných vazeb, jsou flexibilnější a mají vyšší lomovou houževnatost než polyester. Mají také velmi dobrou přilnavost při vyztužení se skelnými vlákny. Jejich vlastnosti jsou dobrou kombinací epoxidových pryskyřic a polyesterů. To z nich dělá preferovanou volbu pro výrobu skelných vláken do kompozitů. Vykazují některé z prospěšných vlastností epoxidů, jako je chemická odolnost a pevnost v tahu, jakož i z polyesterů, jako je viskozita a rychlé vytvrzení. Nicméně, jejich objemové smrštění, je vyšší než u epoxidových pryskyřic. K dispozici je široká škála vinylesterových pryskyřic do 170 °C. Vinylesterové pryskyřice jsou vysoce odolné vůči kyselinám, zásadám, rozpouštědlům a peroxidům. Typické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4. [10]



Obrázek 3: Křivky napětí-deformace epoxidových pryskyřic různého modulu [10]

Tabulka 4: Typické vlastnosti vinylesterových matic [10]

Vlastnosti	Matrice		
	Polyester	Epoxid	Vinyl ester
Hustota (kg/m^3)	1200 – 1400	1200 – 1400	1150 – 1350
Pevnost v tahu (Mpa)	34.5 – 104	55 – 130	73 – 81
Podélný modul (Gpa)	2.1 – 3.45	2.75 – 4.10	3.0 – 3.5
Poissonův koeficient	0.35 – 0.39	0.35 – 0.39	0.36 – 0.39
Koeficient teplotní roztažnosti ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	55 – 100	45 – 65	50 – 75
Obsah vlhkosti (%)	0.15 – 0.60	0.08 – 0.15	0.14 – 0.30

3.3 Termoplastické pryskyřice

Termoplastické pryskyřice jsou měkčené z pevného stavu, zpracovány za horka a opětovně se vrátí do stavu po dokončení zpracování a vychladnutí. Během zpracování nejsou podrobeny žádné chemické transformaci. Termoplasty mají vysokou viskozitu při teplotě zpracování, a to proto, že jsou obtížně zpracovatelné. Vzhledem k tomu, že impregnace je narušena vysokou viskozitou, je třeba věnovat zvláštní pozornost kontaktů mezi vlákny a polymerní pryskyřice.

Kompozity z termoplastické matrice mohou být opraveny, protože přechod do měkčeného stavu lze dosáhnout v libovolné teplotě. Polyether ether keton (PEEK) je nejčastější termoplastická pryskyřice pro vysoce výkonné aplikace. Má vysokou lomovou houževnatost, což je důležité pro toleranci poškození kompozitu. PEEK má velmi nízkou absorpci vody (0,5% hmotnostní) při teplotě místnosti. Polyphenylenesulfid (PPS) je termoplast s velmi dobrou chemickou odolností. Polysulfon (PSU) je termoplast s velmi vysokou průtažností a vynikající stabilitou za horka a za mokra. Některé vlastnosti těchto termoplastických matric jsou uvedeny v tabulce 5.[10]

Tabulka 5: Typické vlastnosti pro některé termoplastické matrice [10]

Vlastnosti	Matrice		
	Polyetheretherketon	Polyphenylensulfid	Polysulfon
Hustota (kg/m ³)	1320	1360	1240
Pevnost v tahu (Mpa)	100	82.7	70.3
Modul pružnosti v tahu (Gpa)	3.24	3.30	2.48
Pevnost v prodloužení (%)	50	5	75
Poissonův koeficient	0.40	0.37	0.37
Koeficient teplotní roztažnosti (10 ⁻⁶ /°C)	47	49	56

4 ZPŮSOBVÝROBY FRP PROFILŮ

Profily z materiálu FRP se do betonu vyrábí nejčastěji pomocí technologie pultruze (tažení). Další možností je kombinace pultruze a technologie ovíjení (tzv. pullwinding technologie). Při technologii pultruze se využívá postup kontinuální výroby prvků na výrobní lince. Tato kontinuální linka se používá jak pro prutové prvky (FRP výztuže), tak i pro další konstrukční prvky různých profilů [14].

Při výrobním procesu je nutné, aby došlo k zachování dokonalého spojení vláken s matricí (pryskyřicí) a vznikl tak stejnorodý profil o vysoké kvalitě.

Při výrobě FRP profilů metodou pultruze dochází nejdříve k navinutí nosných vláken na cívky a srovnání jednotlivých cívek do zásobníku, (nejčastěji se používají vlákna skleněná, uhlíková, grafitová, méně vlákna aramidová). Rozložení a srovnání cívek se provádí z důvodu zajištění konstantního rozložení vláken v průřezu výztuže. Při výrobě se vlákna pomalu odmotávají a dochází ke kontinuální impregnaci tekutou termoplastickou pryskyřicí. Pryskyřice může být polyesterová, vinylesterová nebo epoxidová. Výběr pryskyřice závisí na požadavcích, které jsou kladeny na výsledné vlastnosti FRP výztuže. Takto prosycená nosná vlákna jsou konstantně vtahována do tvarovače, kde se výztuž formuje do požadovaného průřezu.

Z tvarovače se výztuž posouvá do ohřívané části vytvrzovací formy, ve které dochází za působení zvýšené teploty k termosetické reakci a tím i k vytvrzení pryskyřice. Vznikne tak vytvrzená výztuž, která je pomocí pásů, popřípadě střídavě popojížděných táhel odtahována. Posledním krokem je řezání FRP výztuže na potřebnou délku, která je individuální, nejčastěji ovšem délka 6 metrů. [14], [18].

Mezi výhody technologie pultruze řadíme dobré vlastnosti, prakticky neomezenou variabilitu tvaru průřezů, libovolnou délku vyrobeného profilu a vysoký stupeň automatizace výroby.

Pultruze patří k perspektivním velkoobjemovým výrobním technologiím, které produkují kompozitní materiály s relativně nízkou cenou a tím přispívají i k jejich větší dostupnosti.

Nevýhodou technologie pultruze jsou vysoké investiční náklady na pořízení technologického zařízení a relativně drahý provoz. [19].

V předchozím odstavci byla zmíněna pouze samotná technologie pultruze. V praxi se však FRP výztuž vyrábí pomocí technologie pullwinding, kdy se technologie pultruze kombinuje s ovíjením profilů dalšími vlákny. Výhodou technologie pullwinding oproti technologii pultruze je především lepší kombinace podélné a příčné pevnosti, ale i drsnější povrch pro lepší spolupůsobení s betonem. Jednotka, která ve výrobní lince zajišťuje ovíjení je zařazena mezi impregnační a vytvrzovací jednotku. Dalším aspektem vylepšení výroby FRP výztuží spočívá v aplikaci křemičitého písku na povrch výztuže, který výrazně zlepšuje adhezi a spolupůsobení FRP výztuže s betonem [14].

5 TRVANLIVOST FRP JAKO VNITŘNÍ VÝZTUŽ

K dispozici jsou tři složky uvnitř kompozitního materiálu, které ovlivňují jeho dlouhodobé vlastnosti, a to následovně:

- Matrice
- Vlákná
- Rozhraní matrice a vlákná

Každý z těchto prvků je náchylný k napadení různým agresivním prostředím, ale všechny tři by měly i nadále plně fungovat po celou dobu návrhové životnosti kompozitu. Matrice je ve své podstatě odolná proti agresivnímu médiu (v tomto případě – silné zásady). Zabraňuje poškození vláken a oblasti rozhraní tím, že poskytuje bariéru proti betonu a vnějším prostředím. Vnější faktory, které mohou ovlivnit účinnost této ochrany jsou:

- Charakter prostředí (pH a přítomnosti agresivních iontů),
- Napětí v kompozitu,
- Teplota,
- Stav kompozitu (poškození),
- Kvalita kompozitu (povrchové úpravy, dutiny, homogenita pryskyřice).

Účinnost pryskyřice závisí na kontinuitě jejího povrchu. To je důvod, proč rezané konce krátké FRP výztuže a odkrytá vlákna mohou být problematické vzhledem k trvanlivosti. Vnější média napadají vazbu mezi maticí a vlákny a nastává tak nepatrná degradace po směru vláken. Rozhraní pryskyřice a vlákná je tak vystaveno přímému útoku okolního prostředí. Stříhové povrchy krátkých FRP prutů by tak mělo být utěsněno, aby se zabránilo pronikání chemických látek do vnitřní struktury.

Kvalita kompozitu, pokud jde o trvanlivost, může být vyjádřena různými faktory.

- Obalení vláken (jak dobře jsou vlákna pokryta pryskyřicí).
- Absence trhlin (povrchové)
- Absence dutin (jsou lepší dutiny menší a dobře rozložené).

- Stupeň vytvrzení pryskyřice (v případě, že výrobní proces není dobře navržen, tak pryskyřice nedosáhne dostatečného zesílení a ochrany).

-Rozhraní matrice a vlákna (nesprávná volba typu vláken,matrice nebo nesprávnézpracování může vést ke špatnému spolupůsobení a tím i horší trvanlivosti).

Všechny výše uvedené faktory je třeba řešit, aby byla zajištěna optimální trvanlivost kompozitního systému. Klíčovou oblastí, kde může být dosaženo dobré trvanlivosti je volba vhodné pryskyřice, která by měla být:

- Ze své podstaty schopna odolat působení alkálií a útoku chloridů,

- Dostatečně tuhá, aby byla schopna vzdorovat mikrotrhlinám,

- Dostatečně nepropustná,

- Snadno zpracovatelná,

- Velmi kompatibilní s vlákny s cílem zajistit silnou vazbu mezi vlákny a matricí.[10]

5.1 Vliv vlhkosti

Vliv vlhkosti na vlastnosti FRP kompozitů je studována ve vzduchu při různé relativní vlhkosti za různých teplot. Vliv vlhkosti se sleduje i při ponoření do vody při různých teplotách a napětí. Společné ukazatele pro hodnocení dlouhodobé výkonnosti trvanlivosti FRP pod těmito podmínkami jsou změny pevnosti v tahu a modul pružnosti.[10]

Studie ukazují, že zhoršení vlastností polymerních pryskyřic se objeví tehdy, když molekuly vody začnou působit na pryskyřice jako změkčovadla a naruší Van-der-Waalsovy vazby v polymerních řetězcích. To způsobí změny v modulu pružnosti, pevnosti, napětí při porušení houževnatost, což vede k praskání a hydrolyze polymerní matrice. Dlouholetým zkoumáním působení vlivu vlhkosti na FRP výztuže bylo zjištěno, že degradace je vážnější při zvýšených teplotách ($> 60^\circ \text{C}$).[10]

5.2 Účinky chloridů

Potenciální aplikace FRP v solných prostředích, kde je vysoká pravděpodobnost koroze oceli bez další ochrany. Účinky chloridů se zkoumaly na skleněných, aramidových a uhlíkových výztužných vláknech v polymerech (GFRP, AFRP a CFRP). Výztužná vlákna

byla zatěžována různými hodnotami tlaků a okolní teplotou až 70 ° C s různými hodnotami relativní vlhkosti. Výsledky se velmi lišily a rozlišování mezi útokem chloridu a znehodnocováním vláken vlivem difúze vlhkosti je obtížné. CFRP výztuže vystavené působení v kombinaci chloridů a vlhkosti v betonu vykazují velmi malou degradaci s dobou expozice nebo teploty. AFRP a GFRP prvky se mohou vykazovat až 50% ztrátu pevnosti a tuhosti a relaxace napětí až na 30%. Je třeba zdůraznit, že zhoršení FRP nemusí nastat v důsledku působení chloridů, ale v důsledku působení alkalického prostředí nebo plastifikací pryskyřice způsobenou absorpcí vody. Nicméně jsou určité náznaky, že solné roztoky jsou o něco vážnější prostředí než čerstvá voda.

Shrnutí:

Údaje o útoku chloridů jsou nedostatečné k vyvození konečných závěrů. Použití FRP jako výztuže by měla být založena na znalostech výkonnosti konkrétního chloridového prostředí.[10]

5.3 Mechanické zkoušení

Zbytkové změny v pevnosti v tahu, Youngův modul a mezní přetvoření byly také použity pro porovnání s fyzikálními vlastnostmi mechanického chování. Zkoušky roztržení u zkoušky životnosti (dobaselhání při různých zatíženích) v různých prostředích byly prováděny různými vyšetřovateli. Byly identifikovány následující faktory, které ovlivňují rychlost alkalického útoku na FRP profily.

- Náchylnost hladkých vláken při alkalickém útoku.
- Alkalická difuzivita pryskyřice, tedy úroveň ochrany vlákna.
- Kvalita vazby vlákna a pryskyřice, přes kterou mohou alkálie pronikat a napadnout vlákno.
- Teplota, která ovlivňuje reakční rychlost a míru difúze.
- Koncentrace alkálií (ovlivnění typu cementu a betonových směsí).
- Mobilita alkalických iontů (ovlivněna stupněm nasycení a objemem pórů).

Zkouška životnosti by měla pokrýt celou dobu životnosti. Zbytkové vlastnosti jsou obecně stanoveny po úpravě kompozitu při zvýšených teplotách pro urychlení stárnutí. Zkoušky prováděné v betonu nebo simulovaných betonových pórech se řeší v rámci různých

úrovninámáhání tlakem. Dlouhodobá pevnost se pakzjistí extrapolováním z těchto výsledků.[10]

5.4 Účinky Alkálií

I když beton již tradičně chrání ocelovou výztuž, může mít zásaditost betonu vliv na skelná vlákna. Proto se musí zvolit vhodné polymerní pryskyřice jejich ochraně. Odpor vůči alkáliím je obecně považován za nejlepší s uhlíkem, následně aramidem a poté až skleněnými vlákny. Alkalický útok je široce studován, avšak na základě testů, použití různých typů zkušebních metod a zkušebních materiálů má za následek různorodé údaje o trvanlivosti FRP profilů. Teplotní rozsahy testování by měly být v rozmezí 20 až 80 °C. Je důležité poznamenat, že existuje významný důkaz, že simulované prostředí je mnohem agresivnější než betonového prostředí v důsledku zvýšené mobility OH- iontů.[10]

5.4.1 Vystavení alkalickému roztoku – vlákna

Studie ukázaly, že ponoření E-skla s vinylesterovou pryskyřicí do 30% roztoku hydroxidu amonného (NH_4OH), při teplotě 23 °C, po dobu 224 dní, vykazoval 12% ztrátu pevnosti v tahu. Studie pomocí TGA analýzy ukázala zhoršení na rozhraní matrice a vláken. Další studie byla provedena ponořením CFRP a GFRP systémů v roztoku CaCO_3 (pH 9,5), při teplotě 23 °C, po dobu 125dnů. Tyto systémy byly nedotčeny s výjimkou snížení o 10% modulu pružnosti pro systém GFRP a 30% snížení v smykového pevnosti. Kombinovaná testování zmrazování a rozmrazování alkalických expozičvykazuje 7-49% ztrátu pevnosti v tahu a 3-31% pokles modulu pružnosti pro E-sklo a GFRP systémů (s vinylesterovou nebo polyesterové pryskyřicí). Ponoření CFRP, AFRPa GFRP vzorků v nasyceném $\text{Ca}(\text{OH})_2$ roztoku, při 25 °C a 60 °C ukázal, že Fickůvzákon by mohl předvídat FRP ztrátu pevnosti v tahu.[10]

5.4.2 Vystavení alkalickému roztoku – pryskyřice

Ponoření polymerní pryskyřice v alkalických prostředích při teplotě okolí a zvýšenéteplotěse testovaly vzorky pro pevnost v tahu pomocí DMTA, DSC, TGA aFTIR. Výsledky ukázaly, že vinylesterové polymery měly vyšší odolnost než polyester(y) (pevnost v tahu80% u vinylesterových a 40% u polyesterových). Testovány byly třírůzné GFRP tyče ponořeny 28 dnůdo nasyceného roztoku $\text{Ca}(\text{OH})_2$ při 80 °C. Vinylesterové pruty byly degradovány méně než kombinace vinilesterové s polyesterovou matricí [10].

5.4.3 Alkalické expozice za urychlených podmínek (tlakové nebo při zvýšené teplotě)

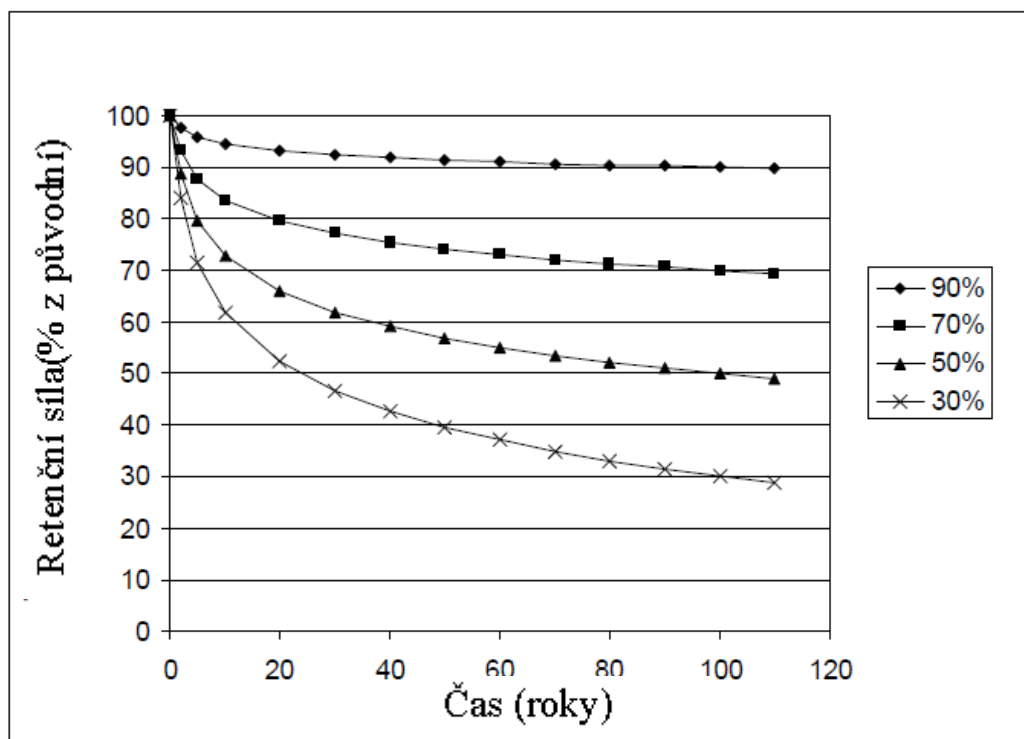
V reálných betonových konstrukcích se u většiny výztuží zdůrazňuje odolnost vůči zatížení. Vliv tlaku a alkálií byla studována v několika pokusech. Gangarao a Vijay (1997) zjistili snížení pevnosti (1-76%) pro namáhané GFRP systémy v alkalickém roztoku při pH 13 za 201 dní. Vinylesterová pryskyřice ukázala nejlepší odolnost. Shearda kolektiv (1997) uvádějí pro GFRP a CFRP sníženou pevnost ve smyku interlaminárního řešení systémů při pH 11,5 až 13,5. Benmokrane kolektiv (1998) zjistili při snížení sil v tlakových alkalických dávkách ozáření přihodnocení vlivu pryskyřice a typu výrobních procesů, a dospěli k závěru, že vinylester je nejvhodnější polymer pro GFRP systémy. Porter a kolektiv (1997) ponořená vložena tyč z E-skla a vinylesterové pryskyřice do 60 °C alkalické vody (pH 12). V rozkladacím testu tyče nebyly ovlivněny možná proto, že tlustý beton chránil tyče více než dobře. Pantuso kolektiv (1998) vložena GFRP systémy do betonu se podrobí smáčecím a sušicím cyklům ve vodě po dobu 60 dnů. Pevnost v tahu ve srovnání se ve vodní lázni snížila až o 21%. Nasimulování přílivových cyklů byly CFRP vzorky do betonu podrobeny smáčecím a sušicím cyklům po dobu 18 měsíců při 20-60 °C. Pevnost vazby vzrostla v důsledku otoku FRP tyče, ale ohybové testy na vzorcích vyztužených nosníků nevykazovaly podobné zlepšení. Shearda kolektiv (1997) neuvádí žádné mechanické nebo fyzikální zhoršení GFRP nebo CFRP systémů po 12 měsících v různých alkalických roztocích při teplotě 20-38 °C. Porter a kolektiv (1997) studovali předpjaté nosníky ponořené do vysoce alkalických roztoků a oznámili, že GFRP systém s polyesterovou pryskyřicí zaznamenal ztrátu předpínací síly, zatímco CFRP, také s polyesterovou pryskyřicí byl nedotčen. Adimia kolektiv (1998) studoval únavu GFRP a CFRP výztuže v různě zásaditě prostředí a naměřili pouze zanedbatelné účinky. Studie trvanlivosti AFRP systému podle Scheibe a Rostasy (1998) testovaných při předepnutí na 0.7-0.85 meze pevnosti v tahu a uložených po dobu 2 let. Kapacita zůstala nezměněna. V další studii, Gangarao a Vijay (1997) ponořený GFRP systém zesilující betonové nosníky ve slané vodě po dobu 240 dní ukázal sníženou momentovou kapacitu 18%.

Tabulka 6 shrnuje výsledky z Chalmers University – snížení pevnosti v tahu získané pro GFRP systémy v alkalickém roztoku, betonu a vodě při teplotě 60 °C a 20 °C

Tabulka 6: Vliv teploty na GFRP výztuže vystavené alkalickému prostředí, betonu a vodě [10].

Expozice (stav)	Teplota (° C)	% Původní pevnosti v tahu				
		Stáří při testu (dny)				
		28	90	180	365	545
Alkálie	60	82	55	37	32	31
Beton	60	91	80	57	51	45
Voda	60	93	84	75	73	72
Vše (průměr)	20	95	92	90	88	80

Čím teplejší prostředí, tím jde lépe prokázat vliv teploty na odbourání GRFP systému. Z těchto výsledků se dá určit model pro zachování pevnosti jako funkcí času pro různé kompozitní intenzity (viz. obrázek 4).



Obrázek 4: Tvar teoretických křivek retenčních sil – příkladem je znázorněn vztah původních retenčních sil 90%, 70%, 50%, 30% po sto letech[10]

Studie trvanlivosti provedena v Kanadě pod záštitou sítě ISIS ukázala, že GFRP systémy mají vynikající odolnost v betonové struktuře. V rámci této studie bylo zkoumáno pět mostovek po

celé Kanadě, z Britské Kolumbie do Nového Skotska. Byly pečlivě sledovány po dobu osmi let za provozních podmínek. Z výsledků zkoušek jádrových vzorků odebraných z těchto pěti struktur bylo zjištěno, že alkalické prostředí nemělo na tyto betonové mostovky s FRP výztuží žádný škodlivý účinek. Výrazně pozitivní výsledky získané z této studie vedly k umožnění použití FRP pro posílení a zpevnění na nové i sanované mosty a betonové struktury.[10]

Shrnutí:

Výkonnostní FRP výztuže v alkalickém prostředí se mění podle použitých materiálů (vláken a pryskyřice) a výrobních procesů. FRP se zhoršuje mnohem rychleji v alkalickém roztoku než v betonu, což je pravděpodobně z důvodu vyšší mobility iontů OH⁻.

- Rozsáhlé degradace bylo prokázáno u GFRP tyčí po vystavení alkalickým zkouškám při vysoké teplotě. Tyče vložené do betonu při různých teplotách a s dobrými kombinacemi vláken a pryskyřicí vykazují pouze v omezené míře degradaci. Ta se zvyšuje s teplotou a úrovní tlaku.

- Zásady ovlivňují AFRP systémy méně než GFRP, ale při kombinaci louhu a vysokého tahového napětí (v řádu 0,75 meze pevnosti v tahu) může dojít k poškození AFRP tyče ve velké míře.

- Neexistuje žádný významný problém s alkalickými útoky na CFRP u systému vlákno a pryskyřice.

- vinylestery mají mnohem lepší odolnost proti alkáliím, než polyesterové pryskyřice.[10]

5.5 Vliv trvalého tlaku (roztržení při namáhání)

FRP vystaveny trvalému napětí v tahu může náhle selhat. Této poruše se říká ruptura stresu, označované také jako pevnost při tečení, nebo statická únava. Výzkumem bylo zjištěno, že okolní podmínky prostředí ovlivňují dobu do poruchy. Suchý FRP ze skleněných vláken odolává 70% své konečné pevnosti po dobu 100 let. Vlákno ve vodě odolá pouze 50% své konečné pevnosti za stejnou dobu, zatímco kontakt kyseliny nebo zásady může vést k náhlé poruše na ještě nižší hodnoty napětí. Někteří výzkumníci dělali předpovědi času potřebného k pevnosti při tečení vláken a vláknových kompozitů. Pro E-skleněné pramence vláken při maximální úrovni napětí odpovídající 120 let byli hlášeny na 30% z původní krátkodobé pevnosti na mezi pevnosti při zkoušce tečení v ovzduší. Teoretická magnetická síla mezi pevností při tečení u GFRP v suchém vzduchu (20 °C, 65% relativní vlhkost), byla přibližně

70% původní konečné krátkodobé pevnosti po 106 hodinách. Kritické napětí v důsledku prasknutí jsou 0,3 u GFRP, 0,66 u AFRP a 0,79 u CFRP po 50 letech.[10]

Tabulka 7: Extrapolované zatížení (% konečné) z pevnosti při regresní analýze na 50 let [10].

Životní prostředí	Tradiční E-sklo	E-sklo bez Boru
Vzduch při 23 ° C	44.6	45.8
Slaná voda při ° C	27.1	36.8
Cementový extrakt při 23 ° C	14.8	24.8
Kyselina při 23 ° C	0.9	12.1
Cementový extrakt při 60 ° C	8.2	18.8
Kyselina při 60 ° C		9.5

5.6 Ultrafialové záření

Ultrafialové záření (UV) má podstatný vliv na polymerní materiály. Ačkoli FRP betonářské oceli zabudované v betonu nejsou vystaveny UV záření během provozu, mohou UV paprsky způsobit degradaci během skladování. Expoziční testy byly provedeny v laboratorních podmínkách. Vliv UV paprsků na AFRP tyče ukazuje snížení pevnosti v tahu o 13 % po 2500 hodinách expozice, GFRP tyče 8% po 500 hodinách a CFRP tyče neprokázaly žádné snížení.

Shrnutí:

Pro FRP výztuže v betonu nepředstavuje UV záření žádný problém, ale tyče by měly být chráněny před přímým slunečním zářením i ve skladech. Všechny vnější FRP výztuže, např. by měly být chráněny před slunečním zářením s použitím proprietárních systémů ochrany.[13], [14].

5.7 Vliv kyselin

Zásadité prostředí betonu chrání pasivací ocelovou výztuž, ale skleněná vlákna ve stejném prostředí silně degradují. Naopak nejlepší odolnost proti alkáliím byla prokázána u uhlíkových vláken. Vláknum by měla dostatečnou ochranu poskytnout polymerní pryskyřice. V současné době je největším problémem při studiu alkalické odolnosti absence mezinárodně uznaných zkušebních metod pro zkoušení FRP kompozitů. Tato skutečnost má za následek velmi rozdílné výsledky různých studií. Většina již provedených studií používala roztoky obsahující NaOH, KOH a Ca (OH)₂ s pH 12 až 13,5. Teploty roztoků se pohybovaly mezi 20

a 80 °C. Takto simulované prostředí je v důsledku lepší mobility iontů OH⁻ mnohem agresivnější než beton. I přes značnou odlišnost testovacích metod, všechny výsledky potvrzují, že působení vodných roztoků s vysokým pH snižuje tahovou pevnost a modul pružnosti výztuže. Při působení vyšší teploty a delší doby expozice je tato skutečnost ještě patrnější. Výzkumy se dále shodují na faktu, že vinylesterová pryskyřice vykazuje v alkalickém roztoku lepší odolnost než polyesterová [16].

5.8 Extrémní teploty (vliv horka a mrazu)

FRP materiály mají v současnosti poměrně široké využití v posílení a sanaci mostů a dalších venkovních konstrukcí. Poměrně malé využití má FRP v budovách a stavbách občanské vybavenosti. U těchto staveb je vysoké riziko požáru a z provedených výzkumů není zcela jasné chování různých druhů FRP výztuže při tepelném namáhání. Srovnání trvanlivosti a zobecnění chování kompozitu v takovém prostředí je velmi obtížné, kvůli různorodým materiálům a technologiím výroby. [13], [14].

Vystavení polymerních pryskyřic extrémně vysokým teplotám je u konstrukcí s FRP výztuží závažným problémem. Ve srovnání s betonem a ocelí je odolnost vůči ohni nízká. Polyesterové matrice ztrácejí svou pevnost již při 100 °C. Při vzplanutí uvolňují hustý, černý a v některých případech toxický kouř. V současnosti jsou poměrně široké možnosti protipožární ochrany zahrnující intumescentní nátěry, keramické barvy a nehořlavá aditiva přidaná do matrice. Při aplikaci těchto typů ochrany je potřeba přistoupit na některé kompromisy z hlediska ceny, snadnosti použití a mechanických vlastností kompozitu. [13], [14], [15].

Normální přírodní teploty nejsou pro FRP materiály indisponující za předpokladu vhodně zvoleného materiálu (teplota skelného přechodu musí být vždy vyšší, než maximální uvažovaná teplota konstrukce). Teplota skelného přechodu závisí především na typu použité pryskyřice (normálně se pohybuje v rozmezí 70 až 175 °C). Z důvodu bezpečného návrhu konstrukce je vhodné, aby teplota skelného přechodu byla navrhována alespoň o 30 °C vyšší, než maximální uvažovaná teplota. Při působení vysokých teplot se však tahové vlastnosti FP zhoršují z důvodu redukce vazby matrice/vláknem. Dochází také ke zhoršení smykové a ohybové pevnosti. Pro experimentální testování urychlení degradace vzorků je doporučeno, aby teplota při testování nepřesahovala 60 °C [20].

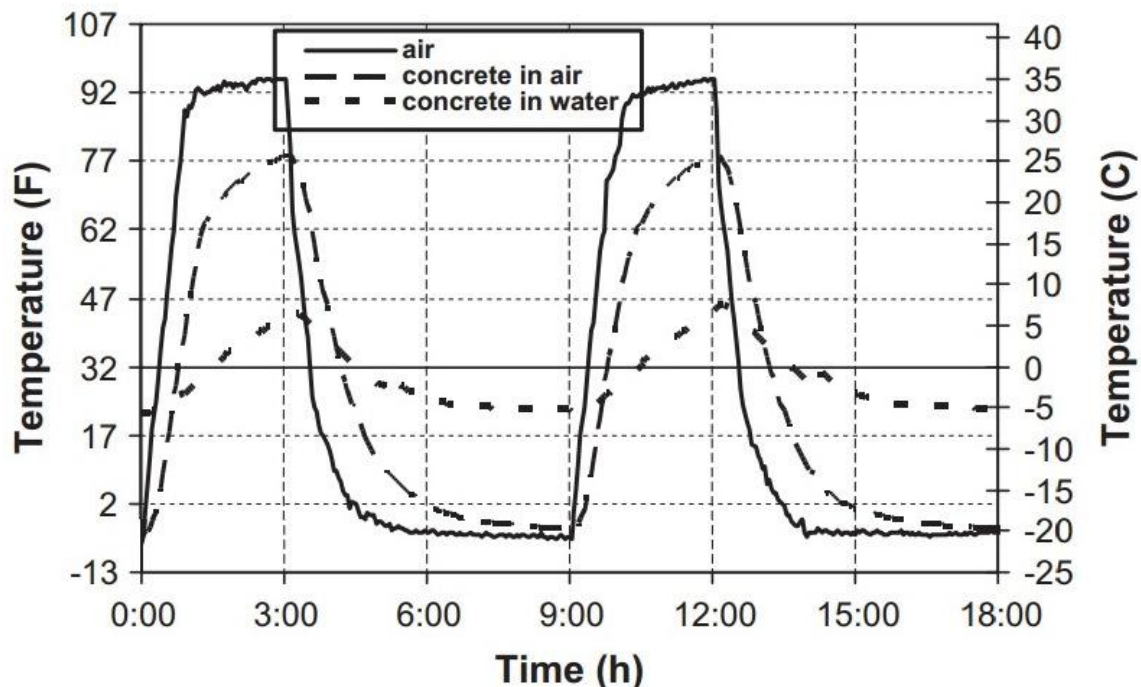
Vazba mezi FRP výztuží a betonem je závislá na vlastnostech polymerní pryskyřice na povrchu výztuže. Při zvýšené teplotě se mohou u konstrukcí vyztužených FRP profily

objevovat zvýšené průhyby konstrukcí nebo zvětšená šířka trhlin. Ke kolapsu prvku dojde tehdy, když polymer změkne a výztuž již není správně zakotvena nebo když teploty překročí prahovou teplotu vláken (880 °C pro skleněná vlákna, 180 °C pro aramidová vlákna a 1600 °C pro uhlíková vlákna) [21].

Vlastnosti matrice jsou limitujícím faktorem pro FRP výztuž, kdy především za nízkých teplot dochází ke snížení ohebnosti polymerů a může tak dojít k poškození při zatěžování. Ovšem vyšší teploty jsou pro FRP výztuž mnohem nepříznivější. Při použití FRP kompozitů v chladném prostředí je nutné zvažovat možnosti poškození v důsledku nízkých teplot. Mráz a zmrazovací/rozmrazovací cykly mají vliv na trvanlivost FRP. Je to dáno chováním materiálů kompozitního materiálu při nízkých teplotách nebo také v důsledku diferenční teplotní roztažnosti mezi polymerní matricí a vlákny. K poškození může případně dojít na rozhraní betonu a FRP výztuže[20], [21].

Při testování odolnosti FRP proti zmrazování a bylo zjištěno, že teplotauvnitř vzorků se mění pomaleji než okolní teplota. Pro testování jsou vhodné betonové válce 100 mm × 200 mm Je doporučeno používat testovací cykly, které trvají 9 hodin, (6hodin zmrazování a 3 hodiny rozmrazování). Při tomto testovacím cyklu bylo docíleno toho, že dojde ke zmrazení FRP i v jádru vzorku.

Doporučený zmrazovací/rozmrazovací cyklus je znázorněn na obrázku č. 5 [20].



Obrázek 5: Zmrazovací/rozmrazovací cykly [22]. Osa x: Time – čas, Osy y: Temperature – teplota, air – teplota vzduchu, concrete in air – teplota betonu na vzduchu, concrete in water – teplota betonu uloženém ve vodě

Při vystavení teplotám pod 0 °C dochází k rozvoji zbytkového napětí v FRP materiálu, které může způsobit mikrotrhliny v matrici nebo porušení soudržnosti vlákna s matricí. Mikrotrhliny mohou vytvářet při opakovaném zmrazování a rozmrazování příčné trhliny a degradovat tak matrici, což způsobuje nejen snížení tuhosti, pevnosti, rozměrové stálosti, ale i snížení odolnosti proti únavě, zvýšení absorpce vlhkosti a snížení odolnosti proti alkalickému prostředí.

Pevnost v tahu ve směru vláken FRP profilů klesá od -10 až -40 °C, naopak pevnost v ohybu se může zvýšit v důsledku ztvrdnutí matrice [13].

Koeficienty tepelné roztažnosti jsou pro FRP výztuž a beton rozdílné. Koeficient teplotní roztažnosti totiž záleží na typu použitých vláken, pryskyřice a na jejich objemovém podílu. Pro GFRP platí, že podélný koeficient tepelné roztažnosti je podobný, jako u betonu, což eliminuje riziko škod. Naopak FRP výztuže, které jsou vyztuženy uhlíkovými a aramidovými vlákny mají řádově odlišné koeficienty teplotní roztažnosti.

Přehled koeficientů jednotlivých druhů FRP v porovnání s ocelí je znázorněno v tabulce č. 8.[21], ze kterých nás nejvíce zajímají koeficienty teplotní roztažnosti u GFRP výztuží.

Tabulka 8: Typické koeficienty teplotní roztažnosti pro ocel a FRP materiály [21].

směr	koeficient teplotní roztažnosti ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)				
	ocel	nerezová ocel	GFRP	CFRP	AFRP
podélný, α_L	11	10 až 16,5	6 až 10	-9 až 0	-2 až -6
transverzální, α_T	11	10 až 16,5	21 až 23	74 až 104	60 až 80

5.9 Shrnutí vlivu působení agresivních prostředí na FRP profily

Závěrem lze konstatovat, že na základě zjištěných informací vykazují FRP relativně dobrou odolnost vůči působení vnějších vlivů na degradaci výztuže.

Vliv působení vlhkosti na výztuž je závažný pouze tehdy, když je výztuž vystavena vysokým teplotám vody, tehdy může docházet k degradaci.

Účinky chloridů a alkálií určitou degradaci výztuže vykazují, ovšem je třeba nadále tyto vlivy degradace zkoumat a testovat.

Okolní vlivy na FRP výztuže, jakými jsou mechanická odolnost a vliv trvalého tlaku, ovlivňují výztuž zcela minimálně. Větší pozornost ovšem musíme věnovat vlivu UV záření a vlivu působení ohně, kde jsou FRP výztuže velice náchylné a mohou snadno degradovat a ztrácet svou pevnost.

Přesto, že FRP kompozitní materiály vykazují ve většině agresivních prostředí dobrou odolnost a často převyšují odolnost materiálů, jako je ocel nebo beton, je třeba provádět testování odolnosti FRP kompozitů při konkrétním použití v různých prostředích.

Požadavky na trvanlivost FRP jsou řešeny v těchto českých a zahraničních technických normách:

6 METODA ZKOUŠENÍ VLASTNOSTÍ FRP VÝZTUŽÍ PO ULOŽENÍ V AGRESIVNÍCH PROSTŘEDÍCH

Zkoušení kompozitních výztuží bylo provedeno dle normy **ISO 10406-1** - Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete — Test methods — Part 1: FRP bars and grids

(FRP pro vyztužování betonu- metody testování – tyče a rošty)
Vláknem vyztužený polymer (FRP) – vyztužení betonu

6.1 Stanovení průřezových vlastností FRP výztužného prutu.

Zkušební kusy FRP se vyříznou na předem stanovenou délku beze změny pro tahové zkoušky. Délka zkušebních vzorků musí být 100 mm při přibližném jmenovitém průměru do 20 mm nebo 200 mm při přibližném průměru nad 20 mm. Počet zkušebních kusů je minimálně 3.

Změří se délka zkušebního kusu pomocí krutimetru v souladu s normou ISO 13385-1. Na měřené části se zaznamenají tři hodnoty, které se zprůměrují na jednu hodnotu a zaokrouhlí přesností na jedno desetinné místo. Tato hodnota je délkou zkušebního vzorku.

Změření objemu zkušebního vzorku s použitím měřicího válce v souladu s normou ISO 4788: 2005, typ 1A nebo 1B (třída A nebo třída B), v závislosti na přibližném průměru zkušebního kusu. Tabulka č. 10 ukazuje vztah mezi přibližným průměrem zkušebního kusu a kapacity odměrného válce. Jsou-li uvedeny dvě kapacity, zvolí se menší kapacita válce. Přidá se předepsané množství vody do odměrného válce a změří se objem. Když je testovaný kus v odměrném válci, voda by se měla dotýkat celého zkušebního kusu a v horní části musí být voda v rozsahu stupnice. Vzduchové bubliny generované na povrchu zkušebního kusu mohou způsobit chybu v měření. Povrchového napětí můžeme snížit rozpouštědlem, jako je například etanol. Rozpouštědla mohou být přidávána do vody také za účelem vytváření vzduchových bublin.

Zkušební teplota vody musí být v rozmezí od 15 °C do 25 °C. Teplota zkušebního prostředí v rozmezí 5 °C až 35 °C.

Tabulka 9: Vztah mezi přibližným průměrem zkušebního kusu a kapacitou měřícího válce [17]

Přibližný průměr zkušebního kusu [mm]	Kapacita odměrného válce [ml]
pod 10	10 nebo 20
11 až 13	25
14 až 20	50 nebo 100
21 až 25	100
nad 25	300 nebo 500

Výpočet nominální plochy průřezu, A, zkušebního kusu dle vzorce (1) a zaokrouhlení na jedno místo za desetinnou čárkou:

$$A = \frac{V_s - V_o}{l_o}(1)$$

kde

V_s je objem celkovému množství vody a zkušební vzorku, vyjádřený v krychlových milimetrech;

V_o je objem vody v odměrném válci, vyjádřený v krychlových milimetrech;

l_o je délka zkušební vzorku, vyjádřený v milimetrech.

POZNÁMKA Nominální průřezová plocha zahrnuje oblast s povrchově vázanými částicemi písku, povrchově vázanými příčnými záby a další oblasti nosné povrchové části.

Výpočet jmenovitého průměru D ze vzorce (2) se zaokrouhluje na jedno místo za desetinnou čárkou:

$$D = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

kde

A je jmenovitý průřez, vyjádřený v milimetrech čtverečních.

Zkušební protokol musí obsahovat následující údaje:

A) Povinné informace

a) datum kontroly;

b) jméno, tvar, datum výroby a číslo šarže z FRP testování;

c) jmenovitý průřez;

d) jmenovitý průměr.

B) Doplnující informace

Protokol o zkoušce může zahrnovat následující další položky:

- a) kapacita odměrného válce použitého v testu;
- b) délka zkušební vzorku;
- c) objem vody v odměrném válci;
- d) objem součtu vody a zkušební vzorku;
- e) název rozpouštědla, je-li jakékoliv rozpouštědlo použito v testu.

6.2 Stanovení tahových vlastností

Zkušební vzorky se nařezou na kusy předem stanovené délky a to takovým způsobem, aby nebyla dotčena struktura testované části.

Délka zkušebních vzorků musí být součtem délky zkušební úseku a kotevní části (viz obrázek č. 6). Délka zkušební úseku pro pruty nesmí být menší než 300 mm a ne méně než 40 násobek jmenovitého průměru.

Zkušební vzorky se musí pečlivě ukládat a chránit proti deformaci teplem, mrazem a vystavení ultrafialovému světelnému záření, což může způsobit změny materiálových vlastností zkušebních vzorků.

Celkový počet zkušebních kusů musí být nejméně pět.

Zkušební stroj musí odpovídat požadavkům na napínací stroje na zkoušení v souladu ISO 7500-1. Ukotvení výztuží musí být přizpůsobeno geometrii zkušebních kusů a musí mít schopnost přenášet pouze tahové síly ve směru podélné osy ze zkušebních kusů.

Extenzometry a tenzometry se používají k měření prodloužení zkušební vzorku při zatížení. Musí být schopny zaznamenávat změny v délce měřidla nebo protažení během testování s přesností alespoň 10^{-5} mm. Délka rozchodu extenzometrem nesmí být menší než 100 mm a ne méně než 8 krát jmenovitý průměr FRP prutu.

Zkušební metoda spočívá v upevnění zkušební kusy, montáže extenzometru a následného zatěžování.

Zkušební vzorek se na zkušebním stroji přichytí tak, aby přenášel pouze axiální zatížení (viz obrázek č. 7). Následně se namontuje extenzometr podél osy středové části zkušební vzorku a výztuž se zatíží. Zatěžování se může provádět pouze v souladu s následujícími požadavky:

Výztuž zatěžujeme konstantní rychlostí bez vlivu na zkušební kus. Míra zatížení činí 0,5% až 1,5% napětí za minutu. Doba zkoušky nesmí překročit 5 minut. Změříme napětí na minimálně 10 krocích rovnoměrně rozložených při zatěžování až do přibližně dvou třetin maximální tahové síly. Zaznamenané maximální tahové síly s přesností na tři platné číslice. Zkušební teplota musí být v rozmezí od 5 ° C do 35 ° C.

Všechny výsledky, s výjimkou případů, kdy selhání je v místě kotvení, musí být použité při. Nicméně pokud je zjištěna častá porucha v místě kotvení, mohou být ve výpočtech zahrnuty i výsledky poruchy v kotvení. V případech, kdy se výsledek (pokud jde o maximální sílu u zkoušky pevnosti v tahu) odchyluje o 10% nebo více procent z průměrné hodnoty, musí být výsledek vyřazen a jsou použity pouze 4 zbývající výsledky.

V těchto případech, je-li jedním z výsledků odchylka o 10% nebo více z průměrně vypočítané hodnoty čtyř výsledků, musí být všechny výsledky zamítnuty a musí být provedena nová zkouška. Vyřazené výsledky zkoušek nesmí být použity pro výpočet tahové tuhosti, Youngova modulu nebo konečné tuhosti.

Průměr, \bar{x} , odchylka, Δx_i , a směrodatná odchylka, σ , jsou definovány, jak je uvedeno u obecného vzorce (3) až (5), v tomto pořadí:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3)$$

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

Průřezová plocha je jmenovitý průřez vypočtený v souladu s Klauzulí 5. Je-li průřez standardní, uvádí jej výrobce FRP.

Standardní průřezová plocha může být použita jako průřezová plocha.

Je nutné zahrnout nominální průřezovou plochu, efektivní plochu vláken a polymerní oblast.

Výpočet pevnosti v tahu, f_u , vyjádřený v newtonech na čtvereční milimetr, s přesností na tři platných číslic pomocí vzorce (6):

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (6)$$

kde

F_u je maximální tahová síla, vyjádřená v newtonech;

A je plocha příčného průřezu, vyjádřená v milimetrech čtverečních.

Výpočet pevnosti v tahu, E_A , vyjádřené v newtonech a Youngův modul, E, vyjádřený v newtonech na čtvereční milimetr, a to jak s přesností na tři platné číslice, za použití vzorce (7) a (8),

$$Ea = \Delta F / \Delta \varepsilon \quad (7)$$

$$E = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon \times A} \quad (8)$$

kde

ΔF je rozdíl mezi zatížení ve výši 20% a 50% maximální tahové síly, vyjádřené v newtonech;

$\Delta \varepsilon$ je rozdíl napětí pro ΔF .

Mezní přetvoření bude odpovídající kapacitou tuhosti v tahu, kdy při tenzometrickém měření zkušebního vzorku jsou k dispozici záznamy až do porušení. V případě, že měření z extenzometru nebo tenzometru není k dispozici až do porušení prutu, se konečná tuhost, ε_u , vypočítá s přesností na tři platné číslice pomocí vzorce (9):

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta F}{E \times A} \quad (9)$$

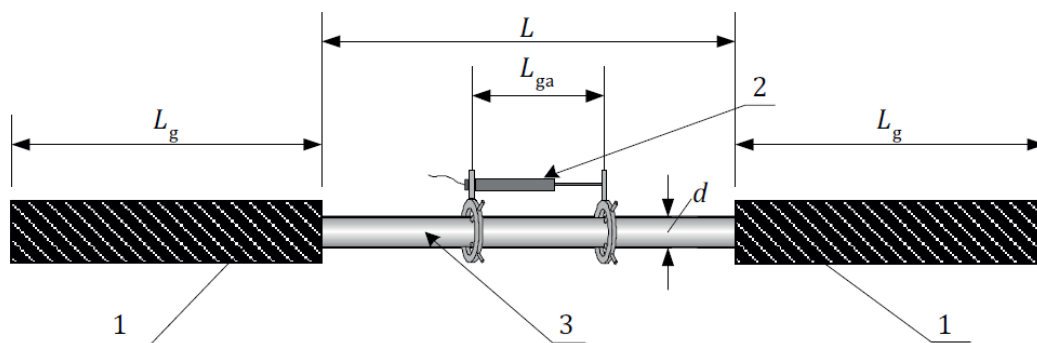
Protokol o zkoušce musí obsahovat následující položky:

- a) jméno, tvar, datum výroby a číslo šarže z FRP testování;
- b) druh vlákniny a vazací polymer vlákna;
- c) nebo identifikační čísla značky zkušebních vzorků;
- d) označení, jmenovitý průřez a průměr;
- e) datum zkoušení, teploty, rychlosti zatěžování;
- f) metoda výpočtu;
- g), průměr a standardní odchylka maximální tahové síly (pevnost), a maximální pevnost v tahu, maximální síla pro každý zkušební kus;
- h) Tuhost v tahu a Youngův modul pro každý zkušební vzorek a průměr;
- i) průměrná mezní přetvoření a mezní přetvoření každého zkušebního kusu;
- j) křivky napětí-deformace pro každý zkušební vzorek;
- k) způsob porušení pro každý zkušební vzorek;
- l) jméno osoby odpovědné za provedení testu.

Doplňující informace protokolu

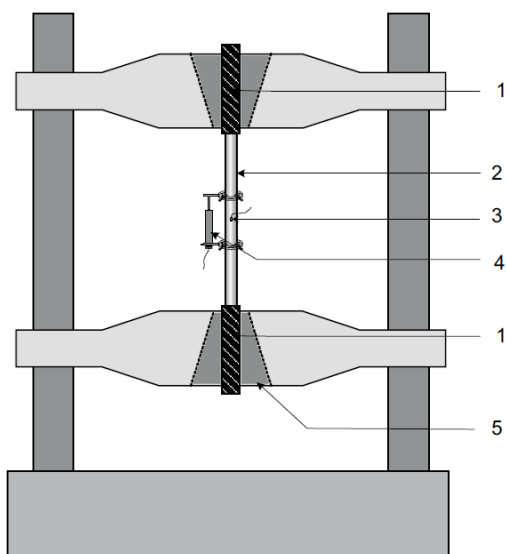
Je-li standardní průřez použitý jako průřezová plocha, může se doplnit:

- standardní plocha příčného průřezu, průměru, a předpokládaná polymerní oblast;
- průměr a standardní odchylka maximální pevnosti v tahu, a maximální pevnost v tahu u každého zkušební vzorku;
- Youngův modul pro každý zkušební vzorek a průměr;
- křivky napětí-deformace pro každý zkušební vzorek;
- pevnost vlákna.



$$L_{\text{tot}} = L + 2 L_g$$

Obrázek 6: Zkušební kus pro zkoušku tahem, L - délka zkušebního úseku, L_{ga} - měrná délka, 1- kotevní část, 2- extenzometr, 3- zkušební úsek [17]



Obrázek 7: Nástin tahové zkoušky, 1- kotevní část, 2- FRP výztuž, 3- tenzometr, 4- extenzometr, 5- kotvící zařízení [17]

6.3 Zkušební metoda pro testování pevnosti spoje

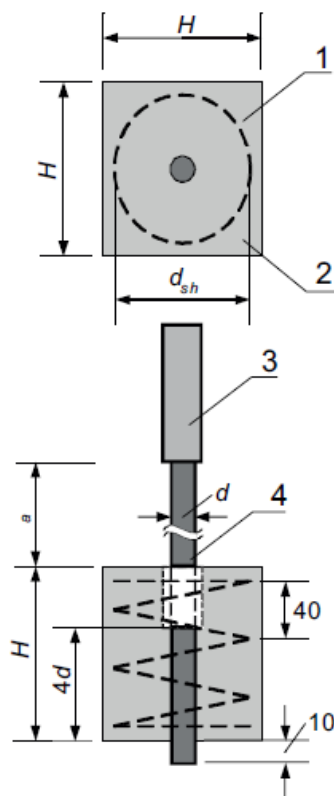
Vzorek FRP výztuže daného průměru a délky je znázorněn v tabulce č. 10.

Zkušební vzorky jsou obvykle betonové kostky s jednou FRP tyčí, vloženou vertikálně podél středové osy (viz obrázek 8).

Délka tyče z FRP musí být ukotvena minimálně jako čtyřnásobek průměru výztuže, aby se vyrovnala tlaku působící desky.

Kotvicí část je většinou ocelová objímka, která je s FRP výztuží spojena pryskyřicí.

Rozměry zkušebních vzorků FRPtyčí jsou uvedeny v tabulce č. 10.



Obrázek 8: Nástin zkoušky pevnosti spoje, 1- spirálová výztuž průměru 6 mm, 2- konkrétní betonová kostka, 3- kotvicí část, 4- FRP výztuž, a- minimálně 300 mm nebo 40 d[17]

Tabulka 10: Hodnoty průměru „d“ a výšky „H“ testované FRP výztuže uvedené v [mm]

d	H	d_{sh}
<17	100	$80 \leq d_{sh} \leq 100$
17 to 30	150	$120 \leq d_{sh} \leq 150$

7 METODIKA EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

Praktická část této bakalářské práce je zaměřena na popis způsobu uložení vzorků v agresivním prostředí a podmínky pro laboratorní testování a zkoumání trvanlivosti GFRP kompozitních výztuží, které jsou určeny pro vyztužování betonových konstrukcí.

V rámci experimentální části je sledována trvanlivost těchto výztuží při působení vlhkosti a zvýšené teploty. Je také sledován vliv alkalického prostředí na změnu vlastností FRP výztuží při různých teplotách alkalického roztoku. Metodika zkoušek vychází z doporučení směrnice ACI 440.3R-04 (nyní řešeno v ASTM D7205), kde vzorky FRP výztuží byly uloženy do prostředí definovaného touto směrnicí. Na jeden litr deionizované vody bylo použito 118,5 g Ca(OH)_2 , 0,9 g NaOH a 4,2 g KOH.

Toto prostředí má zásadité pH, které by se mělo pohybovat v rozmezí hodnot 12,6 – 13,0. V rámci experimentální části je popsáno uložení vzorků GFRP výztuží do agresivního prostředí, při teplotách 20 °C, 40 °C a 60 °C, které byly uloženy v agresivním prostředí po dobu 90 dnů.

Členění experimentu:

1. Popis uložení vzorků
2. Destruktivní zkoušky výztuže
3. Vyhodnocení experimentální části

8 POPIS ULOŽENÍ VZORKŮ

V rámci bakalářské práce bylo popsáno a definováno uložení vzorků výztužido prostředí, kde byly vystaveny působení vlhkosti a zvýšené teplotě. Protože se jedná o vnitřní výztuž do betonu, je nutné simulovat vysoce zásadité prostředí betonu. Voda, která je obsažena v pórech a mikropórech betonu obsahuje také hydroxid vápenatý, draselný a sodný, které zapříčiňují vysoké pH prostředí.

Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že prostředí bude připraveno dle ACI 440.3R–04 Guide Test Methods for Fiber - Rein forced Polymers (FRPs) for Rein forcing or Strengthening Concrete Structures, ACI 440.3R–04, kdy na 1 litr deionizované vody bylo použito 118,5 g Ca(OH)_2 , 0,9 g NaOH a 4,2 g KOH. Procentuálně by se toto složení dalo vyjádřit jako 10% roztok Ca(OH)_2 , 0,1% roztok NaOH, a 0,4% roztok KOH.

Vzorky GFRP výztuží byly vyrobeny z E-skla a AR-skla z toho důvodu, aby byla porovnána degradace dvou různých vzorků. Vzorky GFRP výztuží mají modelové označení PREFA REBAR.

PREFA REBAR GFRP Typ A je výztuž z polyesterové pryskyřice a běžných skleněných vláken (z E-skloviny). Tato výztuž je určena spíše pro nealkalická pojiva, případně pro krátkodobé aplikace.

PREFA REBAR GFRP Typ B je výztuž z vinylesterové pryskyřice a alkalirezistentních skleněných vláken. Tento typ výztuže je oproti předchozímu typu A určen pro dlouhodobé aplikace a je vhodný pro vyztužování konstrukcí, ve kterých je použito pojivo na bázi portlandského cementu.

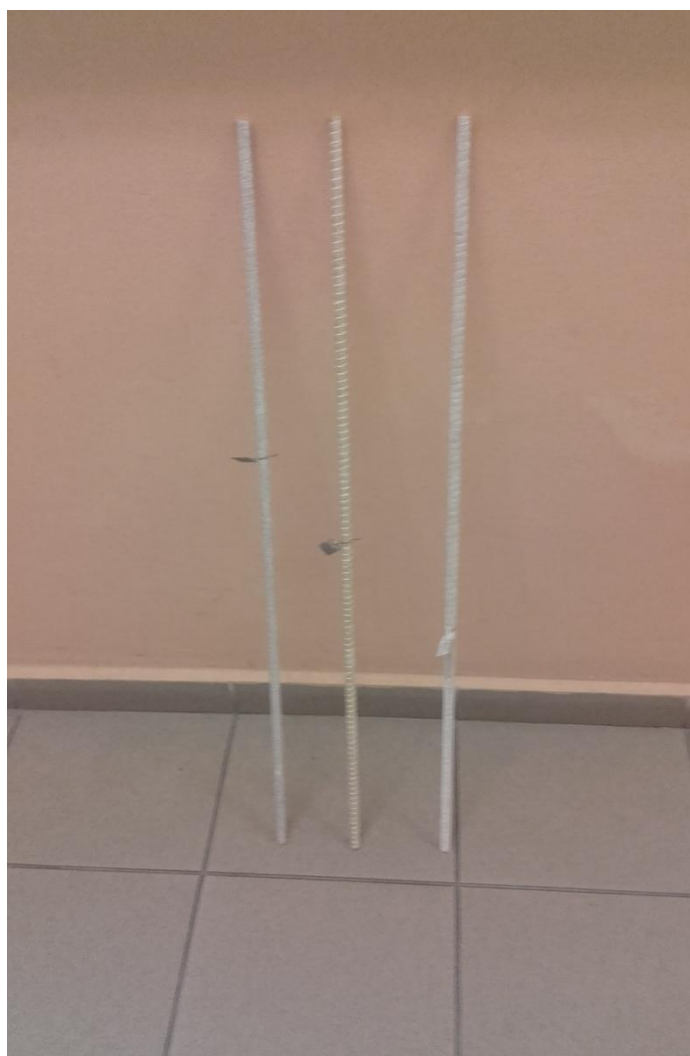
Tyto dva odlišné typy výztuží byly pro dané testování zhotoveny v průměru 10mm, jak pro GFRP výztuže typu A (E-vlákno), tak i pro výztuže typu B (AR-vlákno).

Vzorky GFRP výztuží byly uloženy do agresivního prostředí ve velkoobjemových plastových nádobách opatřených víkem, aby bylo prostředí zcela uzavřené.

V první plastová nádobě bylo prostředí stejné jako teplota v místnosti, a to 20 °C. Druhá plastová nádoba byla již temperována na teplotu 40 °C a třetí plastová nádoba byla vyhřívána na teplotu 60 °C.

Takto uložené vzorky byly vystaveny agresivnímu prostředí po určitou dobu. Po uplynutí doby uložení byla zkušební tělesa vyndána z plastových nádob pomocí ochranných gumových rukavic, osušení vzorků a expedice do laboratoří, kde bylo provedeno odborné zalití GFRP výztuží do ocelových koncovek pro zkoušku pevnosti v příčném tahu.

Testované vzorky výztuží byly vyjmuty z těchto nádob pro destruktivní zkoušky po 90 dnech. Při vizuálním porovnávání vzhledu vzorků temperovaných na 20°C, 40°C a 60 °C bylo zjevné, že se vzorky od sebe vizuálně liší barvou. Prostým pozorováním nelze určit rozsah degradace, ovšem i tento fakt, že vzorky uložené v jiných temperovaných prostředích se vizuálně lišily, nasvědčuje o určité degradaci výztuže. U vzorků temperovaných na teplotu 60 °C bylo vidět zbarvení do bíla a lehce se dal odírat křemičitý písek, jenž zajišťuje soudržnost výztužných prutů a betonu. U vzorků temperovaných na 20 °C a 40 °C křemičitý písek držel lépe, ale odlišné zbarvení od vzorku nezdegradovaného bylo patrné.



Obrázek 9: Porovnání vzorků uložených v degradačním prostředí při teplotách 20 °C (vlevo), 40 °C (uprostřed) a 60 °C (vpravo).

9 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY VÝZTUŽE

Cílem této zkoušky bylo určit maximální osovou tahovou únosnost vzorku a této únosnosti odpovídající poměrné přetvoření. Současně bylo cílem také stanovení modulu pružnosti vzorku v podélném směru a určení pevnosti v tahu. Destruktivní zkoušky byly provedeny pro FRP výztuže uložené v alkalickém roztoku dle ACI 440.3R-04 při teplotě 20 °C, 40 °C a 60 °C po dobu 90 dnů.

Při provádění zkoušky bylo vždy v sadě minimálně 5 kusů vzorků výztuží (tento počet vzorků je vyhovující z hlediska statistického vyhodnocení dle ČSN EN 1990, příloha D). Vzorky FRP výztuží byly pro zkoušku opatřeny ocelovými koncovkami, do kterých se výztuž vložila a zalila epoxidovou pryskyřicí. Nejdůležitější je centrické usazení výztuží do koncovek, aby při zatěžování docházelo k porušení ve středu délky zatěžovaného vzorku (viz. obrázek č.15). Těmito koncovkami se vzorky GFRP následně usadí do zkušebního zařízení pro zkoušení pevnosti v příčném tahu (viz. obrázek č. 15).

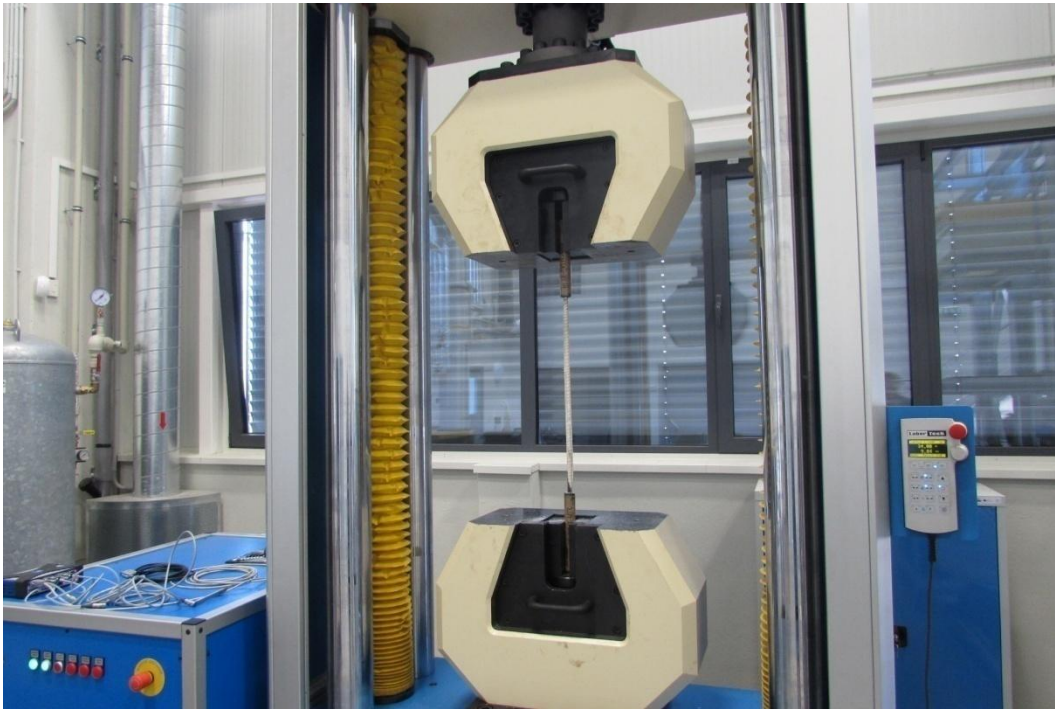


Obrázek 10: GFRP výztuž centricky zalitá epoxidovou pryskyřicí do ocelové koncovky

Vzhledem k tomu, že zkušební vzorky byly z GFRP materiálu, pobíhalo testování se zatěžovací rychlostí 2 mm/min. V rámci vyhodnocení byl proveden výpočet středních hodnot, směrodatných odchylek, variačních koeficientů, modulů pružnosti a také byly vypracovány pracovní diagramy GFRP výztuží jak pro E-sklo, tak i pro AR-sklo.

Vyhodnocování veškerých hodnot probíhalo na měřicím přístroji HACH® HQ11d.

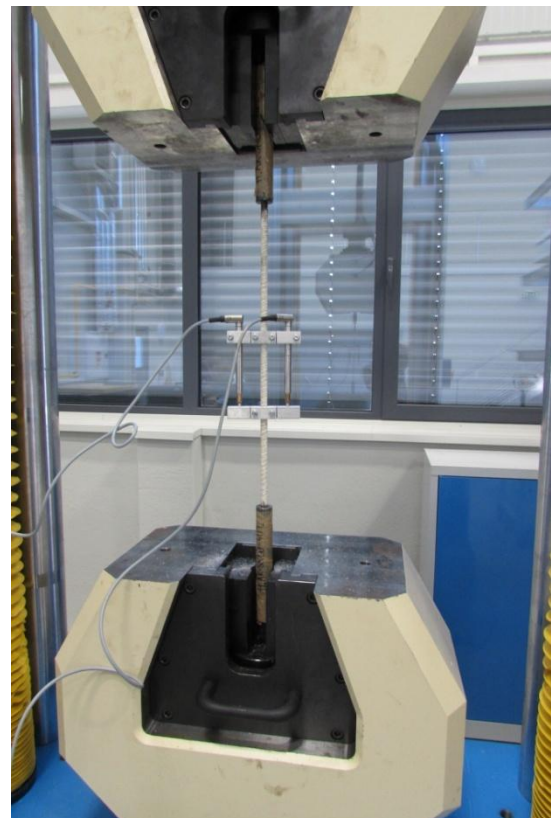
Důležité bylo správné nasazení rámečku pro snímání daných deformací při zatěžování (viz. obrázek č. 13).



Obrázek 11: Usazení zkušební vzorku do lisu



Obrázek 13: Rámeček pro snímání deformací



Obrázek 12: Vzorek usazený v lisu i s rámečkem na měření deformace

V experimentální části této bakalářské práce jsou vyhodnoceny především pracovní diagramy, popsány druhy porušení jednotlivých GFRP výztuží a vyhodnoceny naměřené hodnoty deformací a napětí po dobu 90 dnů uložení vzorků v agresivním prostředí. Do bakalářské práce jsou pro srovnání zařazeny i výsledky a naměřené hodnoty referenčního vzorku a vzorků GFRP testovaných po době uložení 1000 hodin v agresivním prostředí. Naměřené hodnoty po době uložení GFRP 1000 hodin v agresivním prostředí jsou znázorněny v tabulkách číslo 11 a 12.

Tabulka 11: Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 1000 hodin GFRP Ø10 mm, referenční vzorek a E-sklo.

zkoušený vzorek	sada	označení vzorku	teoretická plocha [mm ²]	maximální dosažená síla [kN]	modul pružnosti (sečný) [GPa]	maximální tahová pevnost [MPa]	střední tahová pevnost [MPa]	střední modul pružnosti (sečný) [GPa]	směrodatná odchylka	variace koeficient pevnosti	variace koeficient pružnosti
PREFA REBAR GFRP TYP A Ø = 10 mm	Ref.	2	78,54	63,81	49,52	812,45	801,76	49,49	41,39	0,01	0,05
		4	78,54	64,03	49,87	815,26					
		7	78,54	65,34	–	831,93					
		15	78,54	64,52	50,16	821,49					
		22	78,54	56,45	51,39	718,74					
		26	78,54	63,67	46,53	810,67					
	20 °C	31	78,54	61,04	50,01	777,19	707,45	50,43	70,83	0,03	0,03
		32	78,54	49,57	50,85	631,14					
		33	78,54	50,89	–	647,95					
		34	78,54	54,05	50,66	688,19					
		37	78,54	63,51	50,05	808,63					
		38	78,54	54,32	50,59	691,62					
	40 °C	39	78,54	49,44	50,06	629,49	661,96	49,98	78,00	0,04	0,012
		40	78,54	59,52	49,11	757,83					
		41	78,54	49,88	–	635,09					
		42	78,54	59,28	50,21	754,78					
		43	78,54	44,15	50,04	562,14					
		44	78,54	49,67	50,50	632,42					
	60 °C	45	78,54	43,1	50,96	548,77	643,94	49,78	84,51	0,03	0,06
		47	78,54	61,14	46,41	778,46					
		48	78,54	61,68	–	785,33					
		51	78,54	47,44	51,17	604,02					
		52	78,54	52,67	50,12	670,62					
		53	78,54	58,38	49,80	743,32					
		54	78,54	50,26	50,04	639,93					
		55	78,54	51,6	49,96	656,99					

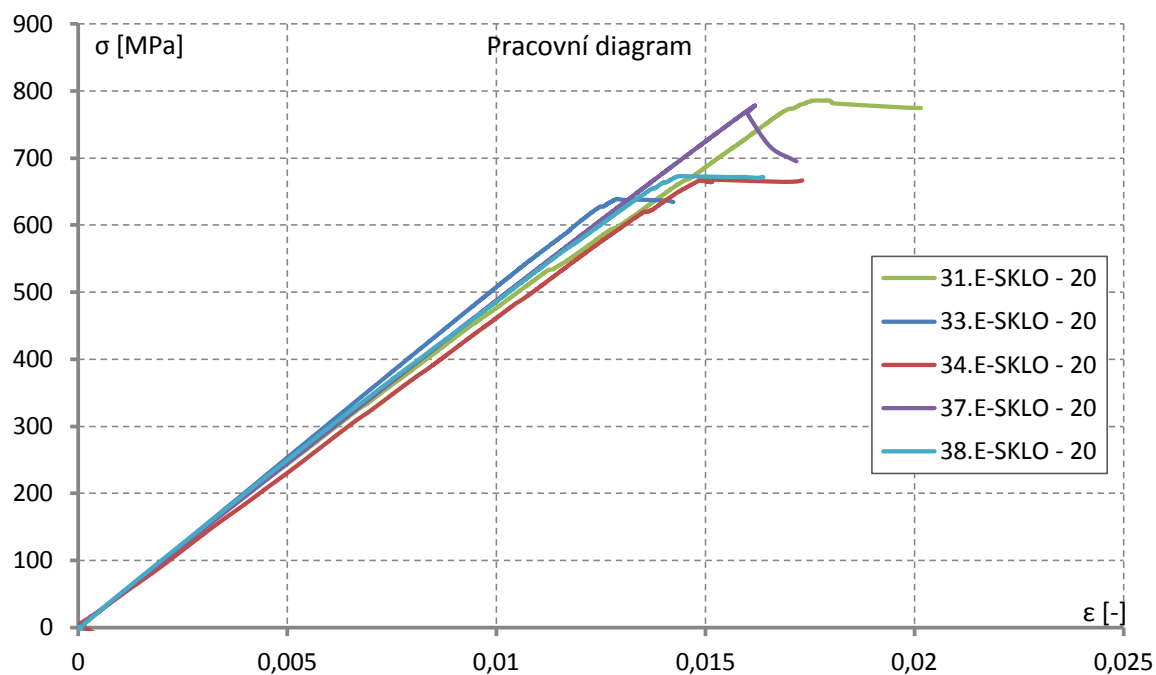
Referenční vzorek je vzorek vystavený běžným podmínkám, na vzduchu, při teplotě 20 °C.

Tabulka 12: Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 1000 hodin GFRP Ø10 mm, AR-sklo.

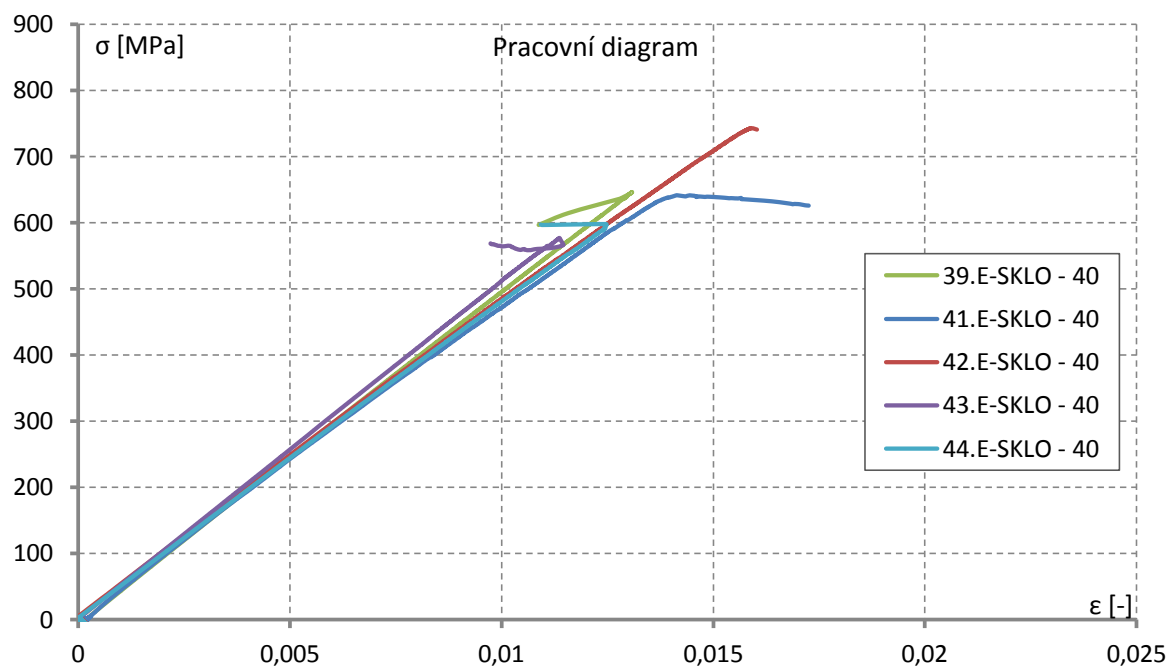
zkoušený vzorek	sada	označení vzorku	teoretická plocha [mm ²]	maximální dosažená síla [kN]	modul pružnosti (sečný) [GPa]	maximální tahová pevnost [MPa]	střední tahová pevnost [MPa]	střední modul pružnosti (sečný) [GPa]	směrodatná odchylka	variální koeficient pevnosti	variální koeficient pevnosti
PREFA REBAR GFRP TYP B Ø = 10 mm	20 °C	1	78,54	39,58	-	503,95	501	44,11	6,63	0,013	0,0034
		5	78,54	40,08	43,87	510,31					
		6	78,54	38,66	43,13	492,23					
		8	78,54	39,20	46,22	499,11					
		9	78,54	39,32	43,00	473,77					
	40 °C	11	78,54	36,26	45,87	461,68	467	43,00	6,70	0,014	0,0049
		17	78,54	36,28	-	461,93					
		24	78,54	36,84	41,99	469,06					
		27	78,54	37,67	43,50	479,63					
		29	78,54	36,74	40,22	467,79					
	60 °C	35	78,54	33,33	43,85	424,37	458	43,60	26,15	0,057	0,0032
		36	78,54	36,02	44,79	458,62					
		46	78,54	39,49	45,32	502,80					
		49	78,54	34,66	41,93	441,30					
		50	78,54	36,11	43,81	459,77					

9.1 Destruktivní zkoušení výztuže po době uložení 90dní – E-SKLO

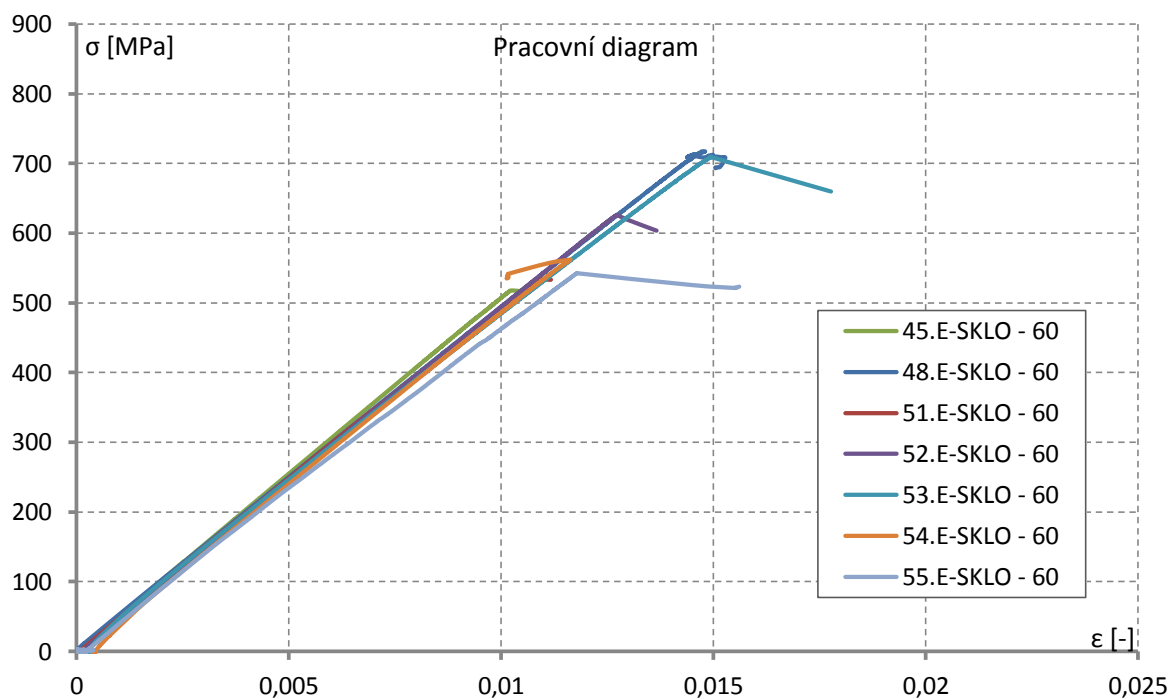
Pracovní diagramy – E-sklo



Obrázek 14: Pracovní diagram – GFRP $\varnothing 10$ mm: E-sklo - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 90 dnů.



Obrázek 15: Pracovní diagram – GFRP $\varnothing 10$ mm: E-sklo - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 90 dnů.



Obrázek 16: Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 90 dnů.

Ukázka porušení výztuží s vlákny E-SKLA:



Obrázek 17: Porušení výztuží na daných vzorcích FRP výztuže s vlákny E-SKLA při teplotě uložení 20 °C

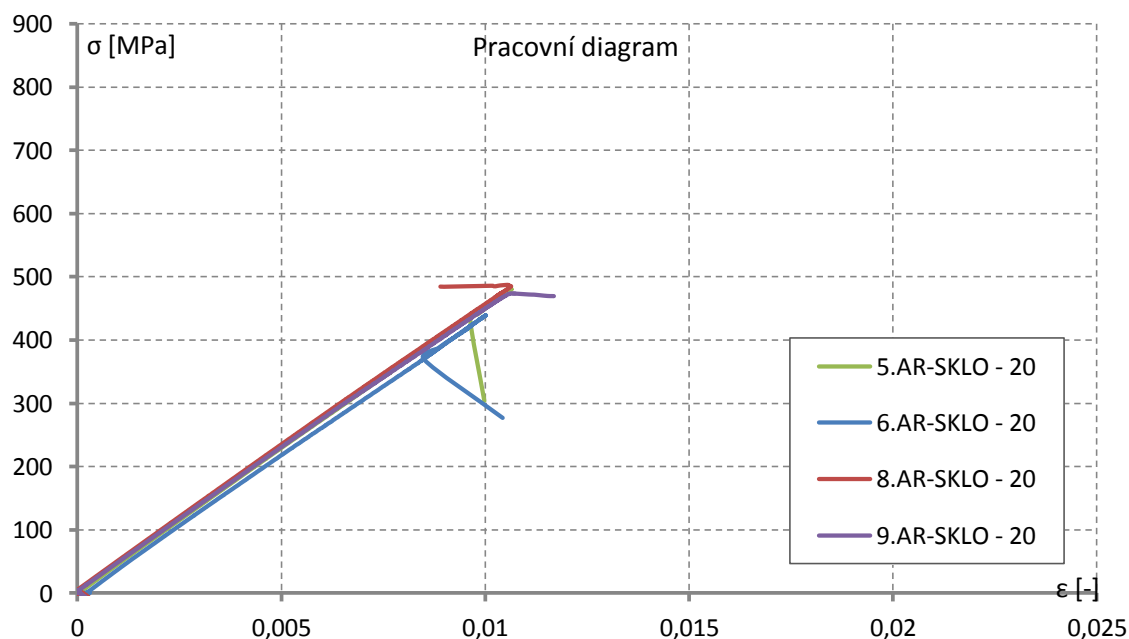
Tabulka 13: Popis typických porušení první sady GFRP Ø10 mm, E-sklo, při 20 °C, 40 °Ca 60 °C po dobu 90 dní v roztoku.

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
E-SKLO-20	Porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken proběhlo pouze u dvou vzorků. U dalších čtyř vzorků proběhlo porušení v jednom řezu a porušení povrchové vrstvy kopírovalo porušení vlnutí provázku.
E-SKLO-40	Porušení delaminací a roztřepením jednotlivých vláken, výrazné roztřepení vláken a přetržení provázku.
E-SKLO-60	V celé této sadě došlo k poškození delaminací s velmi intenzivním roztřepením vláken. Porušení povrchové vrstvy kopírovalo porušení provázku

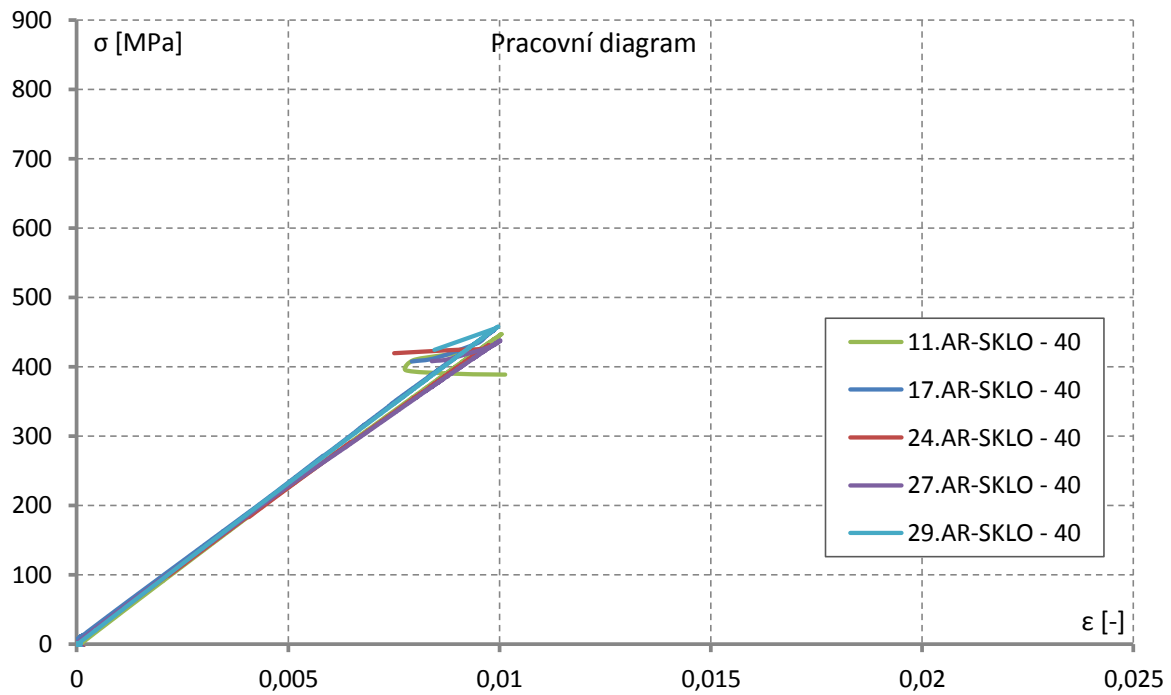
Chování vzorků sady E-SKLA mělo při zatěžování lineární průběh až do samotného porušení. U této sady výztuží docházelo ke značně rozdílným druhům porušení a tím i odlišným hodnotám tahové pevnosti. Tyto odlišné hodnoty poukazují na citlivost E-skla na přesnost a preciznost výroby. Jako typickým znakem poruchy výztuží by mohla být delaminace, která se objevila především u vzorků uložených ve vysokých teplotách v agresivním prostředí.

9.2 Destruktivní zkoušení výztuže po době uložení 90dní – AR-sklo

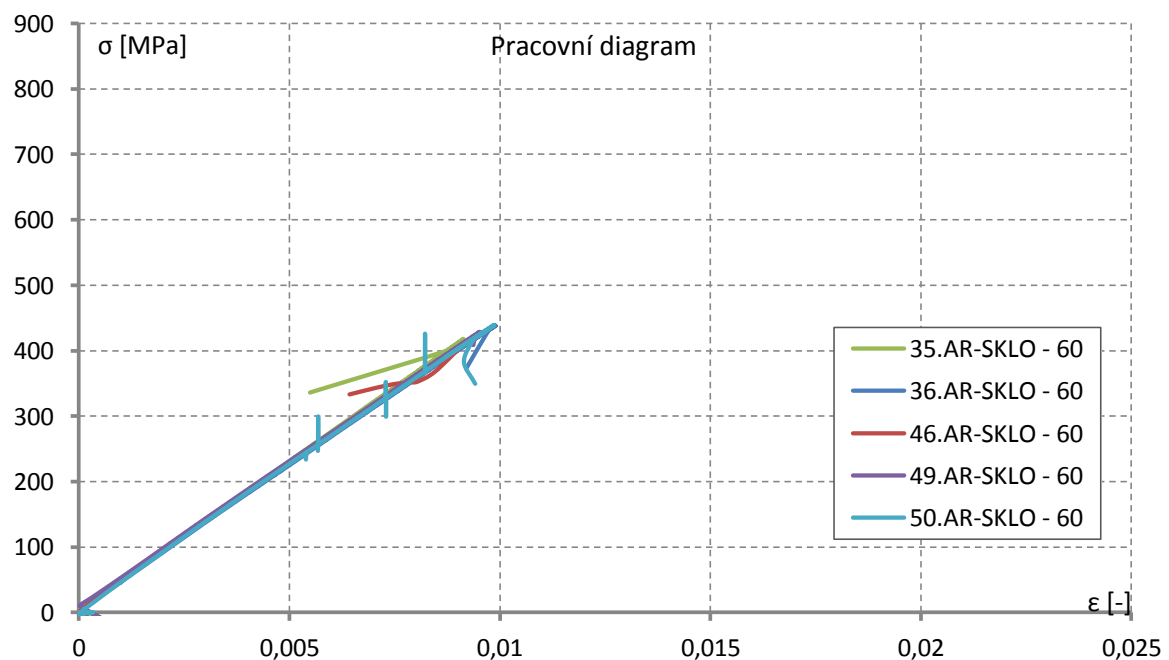
Pracovní diagramy – AR-sklo:



Obrázek 18: Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: AR-sklo - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 90 dnů.



Obrázek 19: Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: AR-sklo - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 90 dnů.



Obrázek 20: Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: AR-sklo - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 90 dnů.

Ukázka porušení výztuží s vlákny AR-SKLA :



Obrázek 21: Porušení výztuží na daných vzorcích FRP výztuže s vlákny AR-SKLA při teplotě uložení 60 °C

Tabulka 14: Popis porušení první sady GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 20 °C, 90 dní v roztoku.

Označení vzorku	Popis poškození výztuže
AR-SKLO-20	K porušení u těchto vzorků docházelo pouze v jednom řezu a porušení povrchové vrstvy kopírovalo vinutí provázku.
AR-SKLO-40	Porušení delaminací a roztřením jednotlivých vláken menšího rozsahu. Docházelo také k přetržení provázku
AR-SKLO-60	U jediného vzorku došlo k delaminaci menšího rozsahu, jinak porucha byla v místě koncovky.

U všech vzorků sady AR-SKLA při teplotě uložení 60 °C došlo kromě vzorku č. 30 k deformaci v ukotvení výztuže v koncovce. Tato deformace byla zřejmě způsobena nedostatečným vyplněním koncovky pryskyřicí a tím i k nesprávnému spolupůsobení koncovky s výztuží. Pouze vzorek č. 30, u kterého došlo k delaminaci menšího rozsahu mohl být uznán jako vyhovující. Výsledky této sady jsou i přes tento fakt dále uvažovány, jelikož se od hodnot vzorku č. 30 příliš neliší.

U těchto druhů výztuží s použitím vláken AR-SKLA nedocházelo k intenzivní delaminaci vláken, ke které mohlo dojít například u sady vzorku uložených při teplotě 60 °C. Při dalším testování a výzkumu doporučuji dbát na kvalitu kotvení výztuže do ocelových koncovek.

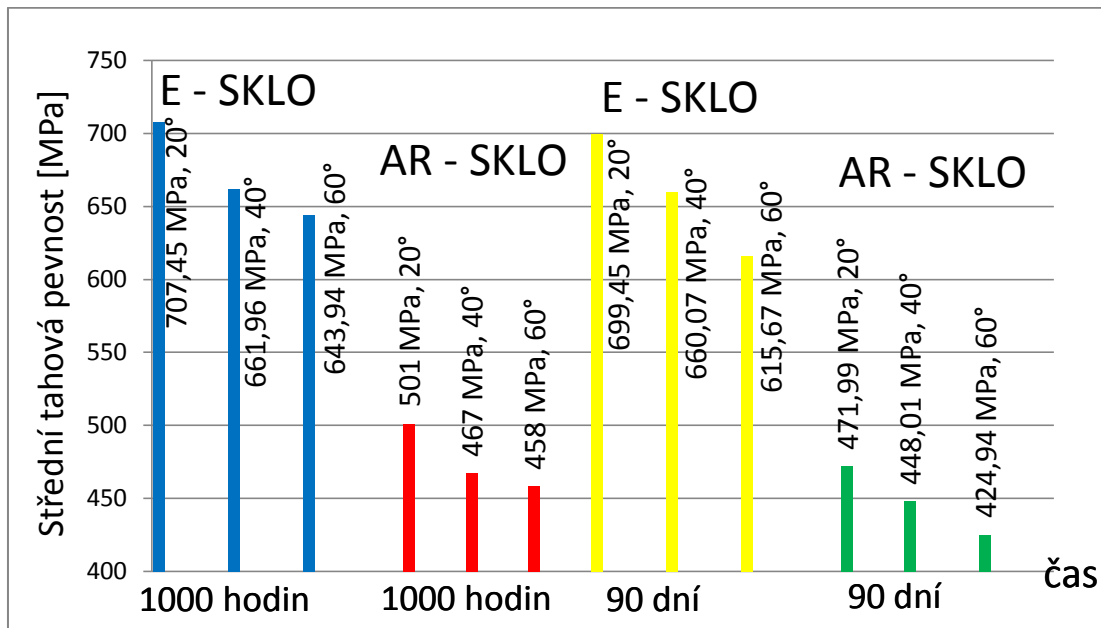
Tabulka 15: Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 90 dní GFRP Ø10 mm, E-sklo.

zkoušený vzorek	sada	označení vzorku	teoretická plocha [mm ²]	maximální dosažená síla [kN]	modul pružnosti (sečný) [GPa]	maximální tahová pevnost [MPa]	střední tahová pevnost [MPa]	střední modul pružnosti (sečný) [GPa]	směrodatná odchylka	variální koeficient pevnosti
PREFA REBAR GFRP TYP A Ø = 10 mm	E-SKLO 20 °C	31	78,54	61,70	45,92	785,59	699,45	47,85	64,94	0,09
		32	78,54	51,09	-	650,50				
		33	78,54	50,18	50,98	638,91				
		34	78,54	52,69	46,01	670,87				
		37	78,54	61,07	48,40	777,57				
		38	78,54	52,88	47,95	673,29				
	E-SKLO 40 °C	39	78,54	50,74	49,98	646,04	660,07	48,61	71,01	0,11
		40	78,54	58,75	-	748,03				
		41	78,54	50,40	46,45	641,71				
		42	78,54	58,38	47,56	743,32				
		43	78,54	45,31	51,18	576,90				
		44	78,54	47,47	47,89	604,41				
	E-SKLO 60 °C	45	78,54	40,66	50,93	517,70	615,67	48,92	87,52	0,14
		47	78,54	56,19	-	715,43				
		48	78,54	56,35	48,95	717,47				
		51	78,54	41,96	49,18	534,25				
		52	78,54	49,18	49,75	626,18				
		53	78,54	55,72	47,91	709,45				
		54	78,54	44,12	49,55	561,75				
		55	78,54	42,66	46,14	543,16				

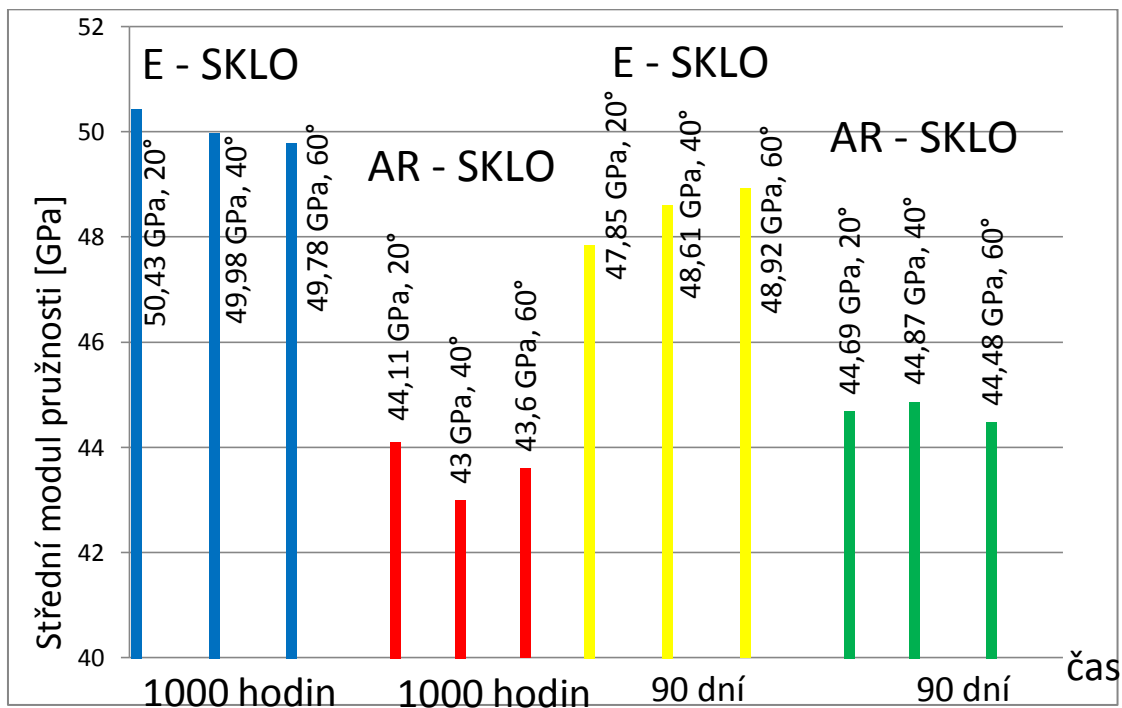
Tabulka 16: Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 90 dní GFRP Ø10 mm, AR-sklo.

zkoušený vzorek	sada	označení vzorku	teoretická plocha [mm ²]	maximální dosažená síla [kN]	modul pružnosti (sečný) [GPa]	maximální tahová pevnost [MPa]	střední tahová pevnost [MPa]	střední modul pružnosti (sečný) [GPa]	směrodatná odchylka	variální koeficient
PREFA REBAR GFRP TYP B Ø = 10 mm	AR-SKLO 20 °C	1	78,54	37,62	-	478,99	471,99	44,69	18,67	0,04
		5	78,54	37,75	45,00	480,65				
		6	78,54	34,53	44,05	439,65				
		8	78,54	38,24	45,07	486,89				
		9	78,54	37,21	44,64	473,77				
	AR-SKLO 40 °C	10	78,54	36,17	-	460,53	448,01	44,87	11,67	0,03
		11	78,54	35,11	44,56	447,03				
		17	78,54	35,62	45,88	453,53				
		24	78,54	33,86	43,96	431,12				
		27	78,54	34,38	43,96	437,74				
	29	78,54	35,98	46,00	458,11					
	AR-SKLO 60 °C	30	78,54	32,08	-	408,45	424,94	44,48	12,62	0,03
		35	78,54	32,83	45,38	418,00				
		36	78,54	34,45	43,92	438,63				
		46	78,54	32,71	44,61	416,48				
		49	78,54	33,69	43,91	428,95				
		50	78,54	34,49	44,60	439,14				

9.3 Porovnání naměřených hodnot středních tahových pevností a modulů pružnosti FRP výztuží s vlákny E-SKLA a AR-SKLA:



Obrázek 22: Graf naměřených hodnot středních tahových pevností FRP výztuží; porovnání výztuží s vlákny E-SKLA a AR-SKLA po době expozice v agresivním prostředí 1000 hodin a 90 dnů.



Obrázek 23: Graf naměřených hodnot středních modulů pružnosti FRP výztuží; porovnání výztuží s vlákny E-SKLA a AR-SKLA po době expozice v agresivním prostředí 1000 hodin a 90 dnů.

10 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

VYHODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ PO 1000 HODINÁCH A PO 90 DNECH ULOŽENÍ VÝZTUŽE V AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍ

Na vzorcích GFRP bylo provedeno vyhodnocení střední tahové pevnosti a střední hodnoty modulu pružnosti (viz tabulka č. 11, 12, 15 a 16). FRP výztuže byly rozřizeny podle typu použitého vlákna (E-SKLO, AR-SKLO) a dále podle teploty prostředí uložení. Průměr testovaných výztuží byl shodný pro všechny testované sady $\varnothing = 10$ mm.

Při použití FRP výztuží vlákny typu E-SKLA při době expozice 1000 hodin byly výztuže rozřizeny do čtyř testovacích sad, kdyv první sadě s názvem "Referenční" byly vzorky uloženy na vzduchu v laboratorních podmínkách při teplotě 20 °C. Další tři sady byly uloženy v definovaném prostředí dle ACI 440.3R-04 při různých teplotách uložení (20 °C, 40 °C a 60 °C). Při uložení výztuží na vzduchu (referenční vzorky), měly výztuže nejvyšší dosaženou střední tahovou pevnost 802 MPa se střední hodnotou modulu pružnosti 49,5 GPa.

Stejně byly rozřizeny i vzorky výztuží vyjmuté z agresivního prostředí po době expozice 90 dnů.

Při testování vzorků, které byly uloženy v různých teplotách agresivního prostředí je patrné, že se zvyšující se teplotou prostředí klesala úměrně i střední tahová pevnost výztuží. Při teplotě uložení 20 °C byla střední tahová pevnost 707,5 MPa při době uložení 1000 hodin, při teplotě 40 °C 662 Mpa a při uložení v teplotě 60 °C a době expozice 1000 hodin byla 644 MPa. Střední modul pružnosti se výrazně nelišil a u všech testovaných vzorků výztuží se pohyboval kolem hodnoty 50 GPa.

U vzorků při době uložení 90 dnů při teplotě 20 °C byla zjištěna střední hodnota tahové pevnosti 699,5 MPa (směrodatná odchylka 64,94, variační koeficient 0,09), při teplotě 40 °C byla hodnota tahové pevnosti 660 MPa (směrodatná odchylka 71,01 a variační koeficient 0,11) a při 60 °C byla pevnost 615,5 MPa (směrodatná odchylka 87,52 a variační koeficient 0,14). Hodnota středního modulu pružnosti se u těchto výztuží pohyboval kolem hodnoty 48 GPa což je o 4 % méně, než modul pevnost v tahu u E-SKLA při době expozice 1000 hodin.

U těchto typů výztuží bylo typickým znakem porušení delaminací vláken s porušením vinutí provázku. Tento druh porušení byl patrný především u vzorků s teplotou uložení 40 °C a 60 °C, kdy docházelo k většímu rozsahu roztřepení vláken.

Při použití FRP výztuží s vlákny AR-SKLA po době uložení 1000 hodin bylo patrné, že hodnoty střední tahové pevnosti dosahovaly výrazně nižších hodnot, nežli u výztuže s vlákny typu E-SKLA a opět platilo, že s rostoucí teplotou prostředí klesala tahová pevnost. U vzorků uložených při teplotě 20 °C byla střední tahová pevnost 501 MPa, u teploty uložení 40 °C byla hodnota 467 MPa a u teploty uložení 60 °C byla střední tahová pevnost 458 MPa. Hodnota středního modulu pružnosti se pohybovala kolem hodnoty 43,5 GPa, což je pokles oproti hodnotě u E-SKLA o 14 %.

U výztuží uložených po dobu 90 dnů byly naměřeny následující hodnoty. Hodnota střední hodnota tahové pevnosti při 20 °C byla 472 MPa (směrodatná odchylka 6,56 a variační koeficient 0,04), při teplotě 40 °C 448 MPa (směrodatná odchylka 11,67 a variační koeficient 0,03) a při 60 °C byla hodnota 425 MPa (směrodatná odchylka 12,62 MPa, variační koeficient 0,03). V případě sady uložené v prostředí o teplotě 60 °C jsou však hodnoty pouze orientační, jelikož téměř u celé této sady došlo k vyjetí FRP výztuže z ocelové koncovky vlivem nekvalitního zalití epoxidovou pryskyřicí. Při optickém posouzení porušení výztuží nelze posoudit způsob porušení, jelikož u většiny testovaných výztuží došlo k vyjetí výztuže z ocelové koncovky nedošlo k žádnému porušení. U jediné výztuže (zn. 30. AR-SKLO-60), která nevyjela z koncovky, lze pozorovat delaminaci menšího rozsahu.

U těchto typů výztuží byla ovšem patrná odlišnost typů porušení. U vzorků při teplotě uložení 20 °C se vlákna netřepila a výztuže měly tendenci poruchy v jednom řezu. U vzorků při teplotě uložení 40 °C a 60 °C se vlákna porušovala delaminací. Hodnoty středního modulu pružnosti byly u výztuží testovaných po době expozice 90 dnů a 1000 hodin takřka stejné a lišily se minimálně.

Při porovnání naměřených hodnot po době 1000 hodin a 90 dní jsem došel k následujícímu výsledku. Když porovnáme referenční vzorek se vzorky, které byly testovány po době uložení v agresivním prostředí 1000 hodin a 90 dnů, dojdeme k výsledku, že čím déle agresivní prostředí působí a čím jsou výztuže uloženy ve vyšší teplotě prostředí, tím je degradace intenzivnější a hodnoty tahových pevností a modulů pružnosti klesají.

Při porovnávání výsledných hodnot u GFRP výztuže Typu A – s vlákny E-SKLA a GFRP výztuže Typu B – s vlákny AR-SKLA zjišťujeme, že u vzorků uložených po dobu 1000 hodin

i 90 dnů je nižší tahová pevnost AR-SKLS v řádech desítek MPa. Jedná se o cca 30 % nižší pevnosti, než dostávají výztuže s E-SKLEM.

Když porovnáme stejnou teplotu uložení vzorků, ale doba uložení bude porovnávána po 1000 hodinách a 90 dnech, zjistíme, že u teploty uložení 20 °C po době 90 dnů došlo ke snížení tahové pevnosti oproti době uložení 1000 hodin o pouhých 7,5 MPa, na hodnotu 700 MPa a to je pokles pouze o 1 %. U teploty uložení 40 °C byl pokles tahové pevnosti pouze o 2 MPa, ale u teploty uložení vzorků 60 °C byl pokles pevnosti po době uložení 90 dnů oproti době uložení 1000 hodin více jak 28 MPa.

Podobné hodnoty poklesu tahových pevností byly zaznamenány u GFRP výztuže Typu B – s vlákny AR-SKLA, kdy se zvyšující se teplotou a delší dobou uložení výztuže v agresivním prostředí klesala i výsledná tahová pevnost.

Modul pružnosti měl také snížené hodnoty v porovnání doby testování po 1000 hodinách a 90 dnech, kdy hodnota modulu pružnosti poklesla o 2 GPa.

Pokud zhodnotíme a porovnáme oba 2 typy GFRP, dojdeme k výsledku, že výztuže s vlákny typu A – vlákna E-SKLA dosahují mnohem vyšších tahových pevností cca o 30 %, než je tomu u vzorků výztuží obsahujících vlákna AR-SKLA. U Modulů pružností jsem výrazný pokles nezaznamenal.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala shrnutím dosavadních poznatků o trvanlivosti FRP výztuží v různých degradačních prostředích. V rámci teoretické části byla provedena rešerše literatury, která se zabývá touto problematikou. Postupně byla probrána problematika a použití vláken, druhy matrice, trvanlivost a výroba FRP výztuží. Probrána byla vlákna skleněná, uhlíková, aramidová, čedičová a přírodní. Pro výrobu FRP výztuží se používají pryskyřice, přičemž v teoretické části byla řešena jak problematika termosetových, tak i termoplastických pryskyřic. Dále byla probrána výroba č. výroba FRP výztuží metodou pultruze. V poslední části byla z hlediska trvanlivosti FRP výztuží byla probrána problematika vlhkosti, chloridů, alkalického prostředí. Probrána však byla i kombinace tepelně vlhkostního stárnutí, problematika extrémních teplot a zmrazovacích – rozmrazovacích cyklů, vliv ultrafialového záření a mechanické zkoušení.

Experimentální část se zabývala sledováním trvanlivosti FRP kompozitních materiálů s ohledem na použití FRP výztuží v betonech. Vysoké pH betonu může u GFRP výztuží způsobit výrazné snížení pevnosti, a modulu pružnosti. Proto byl sledován vliv alkalického prostředí na změnu vlastností FRP výztuží při různých teplotách alkalického roztoku. Metodika zkoušek vycházela z doporučení směrnice ACI 440.3R-04. Vzorky FRP výztuží byly uloženy ve vysoce odolných plastových kádích do prostředí definovaného směrnicí ACI 440.3R-04. Na 1 litr deionizované vody bylo použito 118,5 g $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 0,9 g NaOH a 4,2 g KOH. Toto prostředí mělo pH v rozmezí 12,6 – 13,0. Bylo provedeno vizuální posouzení výztuží a zhodnocení vlastností výztuže, jako je pevnost v příčném tahu, modul pružnosti a další vlastnosti FRP výztuží při působení prostředí a porovnání s nedegradovanou referenční výztuží. Byly zpracovány naměřené hodnoty po době uložení v agresivním prostředí 1000 hodin a 90 dnů a naměřené výsledky vzájemně porovnány. Vzorky uložené v lázni vykazovaly s rostoucí teplotou prostředí intenzivnější degradaci výztuží a tomu odpovídalo i vyhodnocení střední tahové pevnosti. U všech testovaných výztuží byla naměřena velká směrodatná odchylka i variační koeficient, což mohlo být způsobeno nedokonalostí při výrobě výztuží, například nehomogenitou výroby nebo nízkým teplotním tvrzením výztuže.

Byl stanoven sečný modul pružnosti, který při sledované době expozice 1000 hodin v alkalickém roztoku neměl na modul pružnosti výztuže prakticky žádný vliv. Sečný modul pružnosti se u všech výztuží pohyboval shodně kolem 50 GPa.

Naopak sečný modul pružnosti při době expozice výztuže 90 dnů byl jistý pokles zaznamenán, ovšem výrazný pokles nebyl zaznamenán a modul pružnosti se pohyboval okolo 48 GPa.

Pro další výzkum bych doporučil dlouhodobější testování únosnosti FRP výztuží a to při 120, 180 a 240 dnech uložení a následné porovnání zjištěných hodnot s výsledky publikovanými zdrojem [22].

I přes tuto probíranou problematiku a naměřené výsledky tahových pevností a modulu pružnosti konstatuji, že i když tyto vlivy působí na zhoršení vlastností FRP výztuží, je stále tento materiál považován za jeden z nejlepších a nejtrvanlivějších materiálů, který do budoucna bude hojně využíván nejen ve stavebním průmyslu, ale najde uplatnění i v dalších odvětvích.

BIBLIOGRAFIE

- [1] BAREŠ, R. A.: *Kompozitní materiály*, SNTL, Praha, 1988
- [2] BODNÁROVÁ, L. *Kompozitní materiály*. Studijní opora, Brno, 2007
- [3] BÁBÍK, A. Polymerní kompozity s vyššími užitnými vlastnostmi. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2010. 106 s. Vedoucí dizertační práce prof. RNDr. Vladimír Čech, Ph.D..
- [4] VNOUČEK, Milan. Kompozitní materiály. [online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
- [5] Moderní kompozitní materiály[online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z:http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/moderni-kompozitni-materialy-jako-nahrada-klasicke-vyztuze-do-betonu_42548.html
- [6] Technický týdeník [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z:http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/stavbari-v-brne-vyvijeji-nekovove-vyztuze-do-betonu_14973.html
- [7] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [8] RC Modely [online]. [cit. 2016-04-25] Dostupné z:http://www.rcmodely.com/index.php?option=com_content&view=article&id=73:laminovani-materialy&catid=42:nae-dilna&Itemid=65
- [9] DUPONT. Kevlar aramid fiber [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z:http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/fabrics-fibers-and-nonwovens/fibers/documents/Kevlar_Technical_Guide.pdf
- [10] FRP reinforcement in RC structures: technical report prepared by a working party of Task Group 9.3, FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures. 1st pub. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007, 173 s. Bulletin Fédération internationale du béton. ISBN 978-2-88394-080-2.

- [11] Havel Composites. [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
- [12] SMITH, S.T., K. RAUL, R. Sri RAVINDRARAJAH a O.M.A. OTOOM. Durability Considerations for FRP-Strengthened RC Structures in the Australian Environment [online]. [cit. 2015-10-06]. Dostupné z: <http://services.eng.uts.edu.au/~ravir/smith3.pdf>. Centre for Built Infrastructure Research, Faculty of Engineering, University of Technology, Sydney, Australia.
- [13] L.A. BISBY. An Introduction to FRP Composites for Construction. Department of Civil Engineering, Queen's University. 2006. 25s
- [14] JANÁK, Petr. *Sledování trvanlivosti FRP kompozitních materiálů (kompozitů s dlouhovláknovou výztuží a polymerní matricí)* [online]. Brno, 2015 [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=97215. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [15] *Durability of FRP in concrete - Deterioration mechanisms* [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Sotiris_Demis/publication/249920487_Durability_of_FRP_in_concrete__deterioration_mechanisms/links/0c96053086fad47db000000.pdf.
- [16] Technical report. Design and use of fibre reinforced polymer reinforcement (FRP) in reinforced concrete structures. 2007. 173 s.
- [17] ISO 10406-1:2015: *Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete -- Test methods -- Part 1: FRP bars and grids*. 2nd ed. Switzerland: Geneva, 2015. Prefa Kompozity. [online]. [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.prefa-kompozity.cz/>
- [18] JANČÁŘ, J.: *Úvod do materiálového inženýrství kompozitů*. 1. vydání Brno: VUT Brno, 2003. 194 s. IBSN 80-214-2443-5.
- [19] WANG, Huanzi a Abdeldjelil BELARBI. Flexural durability of FRP bars embedded in fiber-reinforced-concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2013,

- 15.4.2013, 44: 541-550 [cit. 2015-12-14]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.065.
ISSN 09500618. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813001943>
- [20] FRP reinforcement in RC structures: technical report prepared by a working party of Task Group 9.3, FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures. 1st pub. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007, x, 147 s. Bulletin Fédération internationale du béton. ISBN 978-2-88394-080-2.
- [21] Bc. Václav Dípold *Sledování trvanlivosti výztuží z kompozitních materiálů s polymerní matricí a dlouhovláknovou výztuží* [online]. Brno, 2015. 96 s., 0 s. příl. [cit. 2016-12-08]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
- [22] CHEN, Yi, Julio F. DAVALOS a Indrajit RAY. Durability Prediction for GFRP Reinforcing Bars Using Short-Term Data of Accelerated Aging Tests. *Journal of Composites for Construction* [online]. 2006, 10(4): 279-286 [cit. 2016-12-28]. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:4(279). ISSN 1090-0268. Dostupné z: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2006\)10:4\(279\)](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:4(279))
- [23] DROCHYTKA, R., *Plastické látky ve stavebnictví*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1998, 122 s. ISBN 80-214-1148-1.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

FRP	Fiber-reinforced polymer (vlákny vyztužený polymer)
GFRP	Glassfiber-reinforced polymer (skleněnými vlákny vyztužený polymer)
AFRP	Aramid fiber-reinforced polymer (aramidovými vlákny vyztužený polymer)
CFRP	Carbonfiber-reinforced polymer (uhlíkovými vlákny vyztužený polymer)
ACI	AmericanConcrete Institute
ISO	International Standard
ČSN EN	Česká státní norma, evropská norma
UV	Ultrafialové (záření)
ASTM	American Society forTesting and Materials
ICRI	International ConcreteRepair Institute
ISIS	IntelligentSensingforInnovativeStructures
PAN	Polyakrylonitril

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Vlastnosti skleněných vláken [8]</i>	15
<i>Tabulka 2: Vlastnosti uhlíkových vláken [8]</i>	16
<i>Tabulka 3: Vlastnosti aramidových vláken [8]</i>	18
<i>Tabulka 4: Typické vlastnosti vinylesterových matric [10]</i>	23
<i>Tabulka 5: Typické vlastnosti pro některé termoplastické matrice [10]</i>	24
<i>Tabulka 6: Vliv teploty na GFRP výztuže vystavené alkalickému prostředí, betonu a vodě [10]</i>	31
<i>Tabulka 7: Extrapolované zatížení (% konečné) z pevnosti při regresní analýze na 50 let [10]</i>	33
<i>Tabulka 8: Typické koeficienty teplotní roztažnosti pro ocel a FRP materiály [21]. ...</i>	37
<i>Tabulka 9: Vztah mezi přibližným průměrem zkušebního kusu a kapacitou měřicího válce [17]</i>	39
<i>Tabulka 10: Hodnoty průměru „d“ a výšky „H“ testované FRP výztuže uvedené v [mm]</i>	44
<i>Tabulka 11: Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 1000 hodin GFRP Ø10 mm, referenční vzorek a E-sklo</i>	50
<i>Tabulka 12: Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 1000 hodin GFRP Ø10 mm, AR-sklo</i>	51
<i>Tabulka 13: Popis typických porušení první sady GFRP Ø10 mm, E-sklo, při 20 °C, 40 °C a 60 °C po dobu 90 dní v roztoku</i>	54
<i>Tabulka 14: Popis porušení první sady GFRP Ø10 mm, AR-sklo, 20 °C, 90 dní v roztoku</i>	56
<i>Tabulka 15: Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 90 dní GFRP Ø10 mm, E-sklo</i>	57
<i>Tabulka 16: Naměřené a vypočtené hodnoty – tahové zkoušky 90 dní GFRP Ø10 mm, AR-sklo</i>	58

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Moderní kompozitní materiály jako náhrada klasické výztuže do betonu[5]</i>	12
<i>Obrázek 2:Křivky napětí-deformace pro všeobecné účely polyesterovou pryskyřicí [10].....</i>	22
<i>Obrázek 3: Křivky napětí-deformace epoxidových pryskyřic různého modulu [10]....</i>	23
<i>Obrázek 4: Tvar teoretických křivek retenčních sil – příkladem je znázorněn vztah původních retenčních sil 90%, 70%, 50%, 30% po sto letech[10]</i>	31
<i>Obrázek 5: Zmrazovací/rozmrazovací cykly [22]. Osa x: Time – čas, Osy y: Temperature – teplota, air – teplota vzduchu, concrete in air – teplota betonu na vzduchu, concrete in water – teplota betonu uloženém ve vodě.....</i>	36
<i>Obrázek 6: Zkušební kus pro zkoušku tahem, L- délka zkušebního úseku, Lga- měrná délka, 1- kotevní část, 2- extenzometr, 3- zkušební úsek [17].....</i>	43
<i>Obrázek 7: Nástin tahové zkoušky, 1- kotevní část, 2- FRP výztuž, 3- tenzometr, 4- extenzometr, 5- kotvící zařízení[17].....</i>	43
<i>Obrázek 8: Nástin zkoušky pevnosti spoje, 1- spirálová výztuž průměru 6 mm, 2- konkrétní betonová kostka, 3- kotvící část, 4- FRP výztuž, a- minimálně 300 mm nebo 40 d[17].....</i>	44
<i>Obrázek 9: Porovnání vzorků uložených v degradačním prostředí při teplotách 20 °C (vlevo), 40 °C (uprostřed) a 60 °C (vpravo).</i>	47
<i>Obrázek 10: GFRP výztuž centricky zalitá epoxidovou pryskyřicí do ocelové koncovky</i>	48
<i>Obrázek 11:Usazení zkušebního vzorku do lisu</i>	49
<i>Obrázek 12: Vzorek usazený v lisu i s rámečkem na měření deformace.....</i>	49
<i>Obrázek 13: Rámeček pro snímání deformací.....</i>	49
<i>Obrázek 14: Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 90 dnů.</i>	52
<i>Obrázek 15: Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 90 dnů.</i>	52

<i>Obrázek 16: Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: E-sklo - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 90 dnů.</i>	53
<i>Obrázek 17: Porušení výztuží na daných vzorcích FRP výztuže s vlákny E-SKLA při teplotě uložení 20 °C.</i>	53
<i>Obrázek 18: Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: AR-sklo - degradace v roztoku při 20 °C po dobu 90 dnů.</i>	54
<i>Obrázek 19: Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: AR-sklo - degradace v roztoku při 40 °C po dobu 90 dnů.</i>	55
<i>Obrázek 20: Pracovní diagram – GFRP Ø10 mm: AR-sklo - degradace v roztoku při 60 °C po dobu 90 dnů.</i>	55
<i>Obrázek 21: Porušení výztuží na daných vzorcích FRP výztuže s vlákny AR-SKLA při teplotě uložení 60 °C.</i>	56
<i>Obrázek 22: Graf naměřených hodnot středních tahových pevností FRP výztuží; porovnání výztuží s vlákny E-SKLA a AR-SKLA po době expozice v agresivním prostředí 1000 hodin a 90 dnů.</i>	59
<i>Obrázek 23: Graf naměřených hodnot středních modulů pružnosti FRP výztuží porovnání výztuží s vlákny E-SKLA a AR-SKLA po době expozice v agresivním prostředí 1000 hodin a 90 dnů.</i>	59