



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 OHÝBANÝCH FRP VÝZTUŽÍ

STUDY OF PROPERTIES OF BENT FRP REINFORCEMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marie Lipoldová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Marie Lipoldová
Název	Studium vlastností ohýbaných FRP výztuží
Vedoucí práce	doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2020
Datum odevzdání	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

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

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

PODKLADY A LITERATURA

440.3R-12 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, 2012

Ceroni, F., Cosenza, E., Gaetano, M., Pecce, M. Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members, Cement and Concrete Composites, 28 (10), 2006, pp.857-868, ISSN 0958-9465

ASTM D7205 / D7205M - 06(2016) Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars

Bodnárová, L. Kompozitní materiály, učební opora VUT Brno, FAST, 2007

Sborníky z tuzemských a zahraničních konferencí (2017-2020)

České a zahraniční technické normy

Internetové zdroje (např. databáze Web of Science, Scopus).

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

FRP kompozitní výztuže (výztuže s polymerní matricí a dlouhovláknovou výztuží) nachází uplatnění především v konstrukcích, kde je zvýšené riziko působení agresivních prostředí. Určitým limitem při použití FRP výztuží je omezení z hlediska jejich tvarové variability. Pultruzním procesem jsou běžně vyráběny přímé profily a vytvoření ohybů na FRP výztuži je značně problematické.

V diplomové práci se zaměřte na ohýbané FRP výztuže. Popište způsob jejich výroby. Uveďte příklady jejich aplikace v konstrukcích.

Na základě rešerší odborných článků vyhledejte informace o možnostech testování vlastností ohýbaných FRP výztuží. Navrhněte a realizujte experiment pro sledování trvanlivosti FRP ohýbaných výztuží. Provedte experimentální ověření trvanlivosti FRP přímých výztužných prutů a ohýbaných FRP výztuží při uložení v alkalickém prostředí a ve vodě při teplotě 20 °C a 40 °C. Dokumentujete stav FRP zkušebních vzorků v průběhu testů trvanlivosti. Provedte vyhodnocení vlivu působení vody a alkalického prostředí na vlastnosti FRP výztuží.

Předpokládaný rozsah diplomové práce min. 80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem ohýbaných FRP výztuží. Popisuje způsoby výroby ohýbaných FRP výztuží, příklady jejich aplikace v konstrukcích. Práce dále zmiňuje vlivy agresivních prostředí na trvanlivost FRP. Je provedena rešerše možností testování vlastností ohýbaných FRP výztuží. Následně je navržen a proveden experiment pro sledování změn vlastností přímých a ohýbaných FRP výztuží při uložení v alkalickém prostředí a ve vodě při teplotě 20 °C a 40 °C. V závěru je provedeno vyhodnocení změn mechanických vlastností a pozorování výztuží pod optickým a elektronovým mikroskopem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vlákný vyztužený polymer, ohýbané FRP výztuže, třmínky, trvanlivost, vlhkost, alkalické prostředí, zkoušení FRP výztuže, optická mikroskopie, rastrovací elektronová mikroskopie

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the study of bent FRP reinforcements with the main focus on the methods of production of bent FRP reinforcement, examples of their application in structures. The work also mentions the effects of aggressive environments on the durability of FRP. In the practical part, a search of the possibilities of testing the properties of bent FRP reinforcement. Subsequently, an experiment is designed and performed to monitor changes in the properties of straight and bent FRP reinforcement exposed to the alkaline environment and water at 20 °C and 40 °C. Finally, the evaluation of changes in mechanical properties and observation of reinforcements using optical and scanning electron microscopy is performed.

KEYWORDS

Fiber-reinforced polymer, bent FRP reinforcement, stirrups, durability, humidity, alkaline environment, testing of FRP reinforcement, optical microscopy, scanning electron microscopy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Marie Lipoldová *Studium vlastností ohýbaných FRP výztuží*. Brno, 2020. 117 s., 4 s. příl.

Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE
Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Studium vlastností ohýbaných FRP výztuží* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13. 1. 2021

Bc. Marie Lipoldová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE
Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Studium vlastností ohýbaných FRP výztuží* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2021

Bc. Marie Lipoldová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat své vedoucí diplomové práce doc. Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Zároveň bych velice ráda poděkovala Ing. Františku Girglemu, Ph.D., Ing. Vojtěchu Kostihovi, Ph.D., Ing. Juraji Lagiňovi a Ing. Ondřeji Janušovi za odbornou pomoc při laboratorních zkouškách a při jejich vyhodnocování. Dále patří dík všem zaměstnancům Ústavu technologie stavebních hmot a dílců, kteří mi byli při zpracování práce ochotně nápomocni.

Obsah

I ÚVOD.....	12
II TEORETICKÁ ČÁST	13
1 Výroba ohýbaných FRP výztuží.....	13
1.1 Složky FRP	13
1.1.1 Vlákna	13
1.1.2 Matrice	13
1.2 Pultruze	14
1.3 Výroba ohýbaných FRP výztuží na bázi termosetové pryskyřice.....	17
1.3.1 FRP se ztraceným bedněním	17
1.3.2 FRP s uspořádanou strukturou vláken.....	18
1.3.3 Vinutí FRP podél trnů	19
1.4 Výroba ohýbaných FRP výztuží na bázi termoplastické pryskyřice	21
1.4.1 Pultrudované FRP s pryskyřicí Elium.....	21
1.4.2. Lisované FRP výztuže	23
2 Příklady aplikace ohýbaných FRP výztuží v konstrukcích.....	25
2.1 Přistávací dráhy	25
2.1.1 Letiště Vídeň	25
2.1.2 Letiště Curych	25
2.2 Železnice	26
2.2.1 Miami-Dade MetroRail	26
2.3 Mosty	27
2.3.1 Twin Bridges Chemin de Ste-Chaterine, Sherbrooke.....	27
2.4 Pobřežní stavby	28
2.4.1 Old Florida Keys Bridge.....	28
2.4.2 Estee Lauder estate Palm Beach	29
2.5 Portálové stěny tunelů.....	29
2.5.1 SMART Kuala Lumpur.....	29
2.5.2 Circle Line a Downtown Line v Singapuru	30

2.6 Další aplikace	31
3 Trvanlivost FRP výztuží	31
3.1 Vliv teploty	32
3.2 Vliv UV záření	33
3.3 Vliv alkalického prostředí	34
3.4 Vliv chloridů	35
3.5 Vliv vlhkosti	35
3.6 Vliv mechanického namáhání	36
III PRAKTICKÁ ČÁST	37
1 Cíl diplomové práce	37
2 Metodika práce	37
3 ETAPA I: Možnosti testování vlastností ohýbaných FRP výztuží	39
3.1 Možnosti testování mechanických vlastností	39
3.1.1 Pevnost v tahu přímých výztuží	39
3.1.1.1 Testování dle ASTM D7205	39
3.1.1.2 Testování dle CSA S806	40
3.1.2 Pevnost ohýbaných výztuží	41
3.1.2.1 Testování dle ACI 440.3R	41
3.1.2.2 Testování dle CSA S806	44
3.1.3 Účinek poloměru ohybu na pevnost v tahu výztuže	47
3.2 Možnosti testování trvanlivosti	48
3.2.1 Zrychlená zkušební metoda pro odolnost FRP tyčí proti alkáliím	48
3.2.2 Dlouhodobé mechanické vlastnosti FRP výztuží	49
4 ETAPA II: Návrh testování mechanických vlastností ohýbaných FRP výztuží	50
4.1 Návrh konfigurace zkoušky	50
4.1.1 I. experiment – U-konfigurace	50
4.1.2 II. a III. experiment – U a L-konfigurace	51
4.2 Charakteristika betonu	54
4.2.1 Vstupní suroviny	54

4.2.2 Vlastnosti betonu.....	55
4.3 Charakteristika vzorků GFRP.....	57
4.4 Vyhodnocení mechanických vlastností testovaných navrženou metodou.....	58
4.4.1 I. sada – referenční (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U – konfigurace.....	59
4.4.1.1 Pevnost v tahu přímých prutů.....	59
4.4.1.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí.....	60
4.4.1.3 Grafy průběhu zatěžování I. experimentu.....	62
4.4.2 II. sada – referenční (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), L + U – konfigurace, neúspěšné zkoušení.....	64
4.4.3 III. sada – referenční (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), L + U – konfigurace.....	65
4.4.3.1 Pevnost v tahu přímých prutů.....	65
4.4.3.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí.....	66
4.4.3.3 Grafy průběhu zatěžování II. + III. experimentu.....	68
4.4.4 Shrnutí poznatků II. etapy.....	70
5 ETAPA III: Sledování trvanlivosti ohýbaných FRP výztuží.....	71
5.1 Návrh a příprava agresivních prostředí.....	71
5.2 Testování mechanických vlastností.....	72
5.2.1 IV. sada – 30denní expozice (uložení ve vodě při 20 °C), L – konfigurace.....	74
5.2.1.1 Pevnost v tahu přímých prutů.....	74
5.2.1.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí.....	74
5.2.2 V. sada – 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C), L – konfigurace	76
5.2.2.1 Pevnost v tahu přímých prutů.....	76
5.2.2.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí.....	76
5.2.3 VI. sada – 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C), L – konfigurace.....	78
5.2.3.1 Pevnost v tahu přímých prutů.....	78
5.2.3.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí.....	78

5.2.4 VII. sada – 1000 h expozice (uložení ve vodě při 20 °C), L – konfigurace.....	80
5.2.4.1 Pevnost v tahu přímých prutů.....	80
5.2.4.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí.....	80
5.2.5 VIII. sada – 1000 h expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C), L – konfigurace.....	82
5.2.5.1 Pevnost v tahu přímých prutů.....	82
5.2.5.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí.....	82
5.2.6 IX. sada – 1000 h expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C), L – konfigurace	84
5.2.6.1 Pevnost v tahu přímých prutů.....	84
5.2.6.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí.....	84
5.2.7 Grafické vyhodnocení mechanických vlastností.....	86
5.2.8 Shrnutí pozorování mechanických vlastností	89
5.3 Pozorování vlivu agresivního prostředí	91
5.3.1 Optická mikroskopie	91
5.3.2 Elektronová mikroskopie.....	99
IV ZÁVĚR.....	102
V ZKRATKY	105
IV SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	106
IIV SEZNAM OBRÁZKŮ.....	110
IIX SEZNAM TABULEK.....	114
IX SEZNAM GRAFŮ.....	116
X SEZNAM PŘÍLOH.....	117

I ÚVOD

FRP výztuže jsou jedním z rychle se rozvíjejících materiálů používaných nejen ve stavebnictví. Tyto kompozitní výztuže nekorodují a nevedou elektromagnetickou energii, jsou relativně odolné vůči rozmrazovacím solím a chemickým látkám a mají zajímavý poměr hmotnosti ku pevnosti. V kontextu dlouhé životnosti tvoří zajímavou alternativu k běžně používaným ocelovým výztužím i z ekonomického hlediska. Použití kompozitní výztuže také umožňuje při výrobě betonu použít kamenivo kontaminované solí. To je významné pro pobřežní nebo suché oblasti světa, kde je nedostatek sladké vody. [13]

Trvanlivost FRP je při srovnání s ocelovou výztuží vysoká. Nicméně má tendenci být složitější, protože degradace kompozitního materiálu může záviset jak na vlastnostech pryskyřice a vláken, tak i na vlastnostech jejich rozhraní. Na trhu jsou k dostání různé druhy komerčních FRP výztuží, která se odlišují chováním při vysokých teplotách, povětrnostních podmínkách a dlouhodobém zatížení. Nepříznivým prostředím může být samotný beton v důsledku své alkalické povahy a absorpce vlhkosti. [21]

Použití FRP tyčí jako vnitřní výztuže pro beton je v současnosti většinou omezeno na konkrétní konstrukční prvky a nevztahuje se na celou konstrukci. Důvodem je omezená dostupnost zakřivených nebo tvarovaných výztužných prvků na trhu a jejich omezené pevnostní charakteristiky. Mechanické vlastnosti ohnutých částí kompozitních tyčí se významně zhoršují při víceosé kombinaci napětí a pevnost v tahu v místě ohybu může klesnout až na 25 % maximální pevnosti v tahu v přímé části výztuže. [4]

II TEORETICKÁ ČÁST

1 Výroba ohýbaných FRP výztuží

1.1 Složky FRP

FRP výztuže jsou kompozitní materiál sestávající vždy z vláken a polymerní matrice. Jejich společným použitím dochází k synergickému působení a je získán materiál s lepšími vlastnostmi, než jsou vlastnosti jednotlivých složek. [1]

1.1.1 Vlákna

Vlákna tvoří základní nosný prvek kompozitu a zajišťují pevnost a tuhost v podélném směru. V běžně dostupných FRP výztužích se používají především vlákna:

- skleněná (kompozit je poté označován jako GFRP – glass fiber reinforced polymer);
- uhlíková (CFRP – carbon fiber reinforced polymer);
- aramidová (AFRP – aramid fiber reinforced polymer);
- čedičová (BFRP – basalt fiber reinforced polymer). [1]

1.1.2 Matrice

Matrice neboli pojivo zajišťuje tvar prvku a pozici vláken, spojuje vlákna a přenáší mezi nimi zatížení, přenáší zatížení z betonu na vlákna a chrání vlákna proti vnějším vlivům. Kombinací správného typu a množství vláken s matricí získáme finální fyzikálně mechanické vlastnosti. Polymerní pojiva využívané pro výrobu kompozitů se dělí na termoplasty a termosety. [2]

Termoplasty jsou tuhé látky, které měknou a tečou za zvýšené teploty nad charakteristickou hodnotu pro daný polymer. Po ochlazení pod tuto teplotu přecházejí opět do pevného skupenství. Příklady používaných termoplastů:

- polystyren, polypropylen, polyethylen, polykarbonát, polyethylen tereftalát a další.

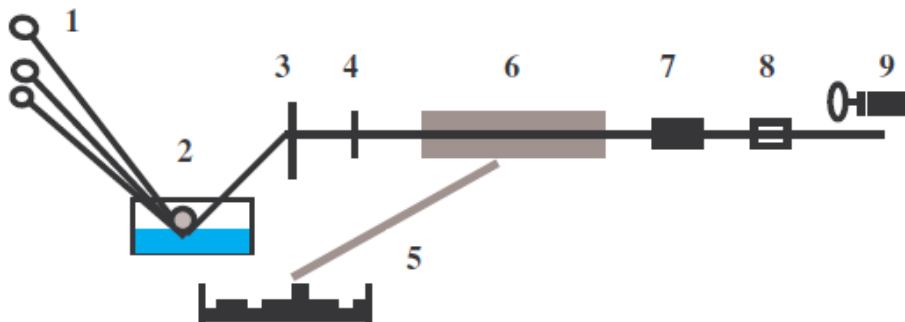
Termosety jsou obvykle kapaliny nebo nízkotavitelné pevné látky, které se vytvrzují chemickou reakcí buď dodáním katalyzátoru, UV záření nebo tepla, popř. kombinací. Některé technologie vyžadují přídavek urychlovače, aby byla zkrácena doba vytvrzování. Při vytvrzování dochází ke vzniku chemických vazeb mezi jednotlivými molekulami. Tento proces vede k vytvoření prostorové makromolekuly s vysokou molární hmotností. Výhodou termosetů oproti termoplastům je právě jejich houževnatost. Jen minimum termoplastů dosáhne obdobných hodnot modulu pružnosti, tepelné odolnosti a odolnosti proti chemickým vlivům jako termosety. Díky této větší stálosti jsou termosety nejčastěji využívaným pojivem pro FRP a mezi využívané zástupce patří:

- nenasyčené polyesterové pryskyřice (unsaturated polyesters UP), epoxidové pryskyřice (EP), vinylesterové pryskyřice a fenolické pryskyřice. [2]

1.2 Pultruze

Jednou z metod výroby ohýbaných FRP výztuží je výroba pultruzí přímých profilů, které nejsou v místech budoucích ohybů nebo v celé svojí délce vytvrzeny. Takto připravené přímé pruty jsou následně dle potřeby ohnuty a dodatečně vytvrzeny.

Pomocí technologie pultruze probíhá průmyslová výroba přímých prutů nejčastěji. Jedná se o kontinuální proces tažení svazků vláken (nejčastěji skleněných, případně uhlíkových, čedičových nebo aramidových), které prochází pryskyřičnou lázní (nejčastěji na bázi polyesteru, epoxidu, vinylesteru). Vlákná prosycená pryskyřicí se formují do požadovaného průřezu, u výztuží do betonu se nejčastěji jedná o kruhový průřez. Vytvarovaný svazek vláken pokračuje do pece, kde prochází vytvrzovací hlavou a následně je tažným zařízením dopravován k pile. [1]



Obrázek 1 Schéma výroby technologií pultruze (1 – zásoby rovingů, 2 – pryskyřičná lázeň, 3 – naváděcí lišta, 4 – destička odstraňující přebytečnou pryskyřici z vláken, 5 – nádobka s přebytečnou pryskyřicí, 6 – vyhřívaná vytvrzovací hlava, 7,8 – tažné zařízení, 9 – pila) [1]

Popis výrobní linky:

Zásobník výztuží a naváděcí zařízení

Správné prostorové uspořádání výztuže je nezbytné pro dosažení maximálních užitných vlastností, a proto je vhodné uspořádání zásobníku jeden z klíčových kroků. Jednoduché profily jako výztuže do betonu jsou tvořeny pouze jednosměrnými svazky vláken. Tato vlákna jsou v pramencích odvíjena z cívek označovaných jako rovingy. Naváděcí zařízení slouží k usměrnění vláken a má podobu desek kolmých ke směru tažení se soustavou otvorů. [1]



Obrázek 2 Zásobník rovingů a navádění vláken [3]

Impregnační sektor a předtvarování

Po prvotním uspořádání vláken následuje jejich sycení pryskyřičným pojivem v otevřené lázni. Součástí pryskyřičného pojiva jsou veškerá aditiva jako iniciátory, UV inhibitory, barviva, zpomalovač hoření atd. Aby došlo k proniknutí pryskyřice do celého objemu a k vytlačení vzduchových bublin je součástí lázně soustava tyčí, které mění směr procházejících vláken. Pro snížení viskozity, a tedy zlepšení impregnace, je možné lázeň vyhřát na vyšší teplotu. [1]



Obrázek 3 Impregnace v otevřené lázni [3]

Tvarovací a vytvrzovací hlava

V této sekci dochází ke kontinuálnímu vytvrzování pryskyřice pomocí vytvrzovací hlavy vyhřívané elektronicky nebo olejovým topením. Vytvrzovací hlava se skládá z 1–4 teplotních

zón, které jsou sledovány a udržovány na konstantní teplotě pomocí kontrolních termočlánků umístěných podél vytvrzovací hlavy. Tažený profil je vytvrzen na délce 0,3–1,6 m. [1]



Obrázek 4 Tvarování a vytvrzování [3]

Tažná sekce

Tažná sekce je pohonem celé linky. Pomocí dvou hydraulických posuvníků mechanicky táhne vytvrzený profil, a tím zajišťuje pohyb vláken impregnačním sektorem, tvarovací a vytvrzovací hlavou. [1]



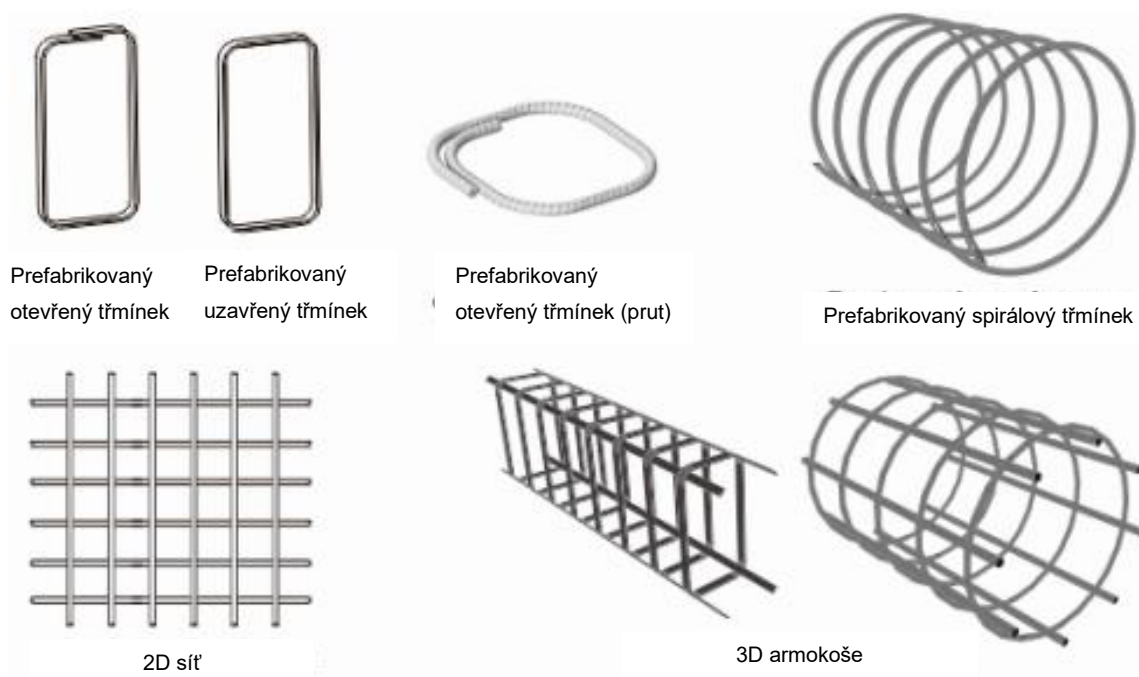
Obrázek 5 Hydraulické posuvníky [3]

Pila

Poslední částí linky, umístěnou za tažným zařízením, je pohyblivá pila. Slouží k řezání nekonečného taženého profilu na požadovanou délku. [1]

1.3 Výroba ohýbaných FRP výztuží na bázi termosetové pryskyřice

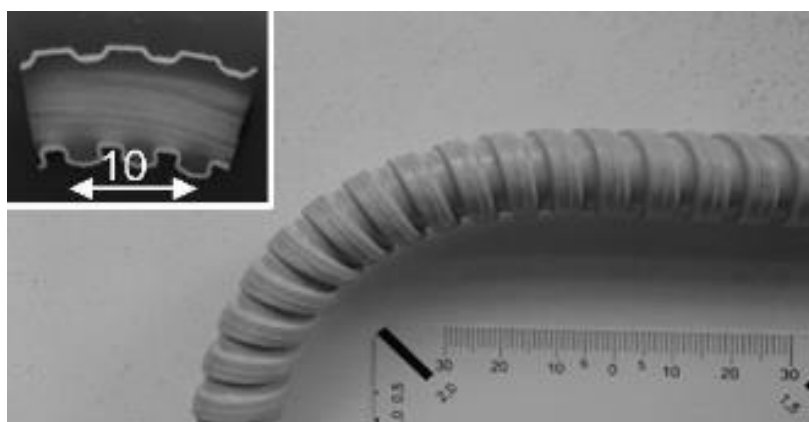
V současné době je vyráběna celá řada prefabrikovaných ohýbaných FRP prvků. Naprostá většina z nich je založena na termosetové pryskyřici. Průmyslovou výrobou sortimentu ohýbaných FRP prvků se zabývají například společnosti FiReP Inc. [5], MST-BAR® [6] nebo TUF-BAR [7].



Obrázek 6 Tvary komerčně dostupných prvků FRP výztuží [4]

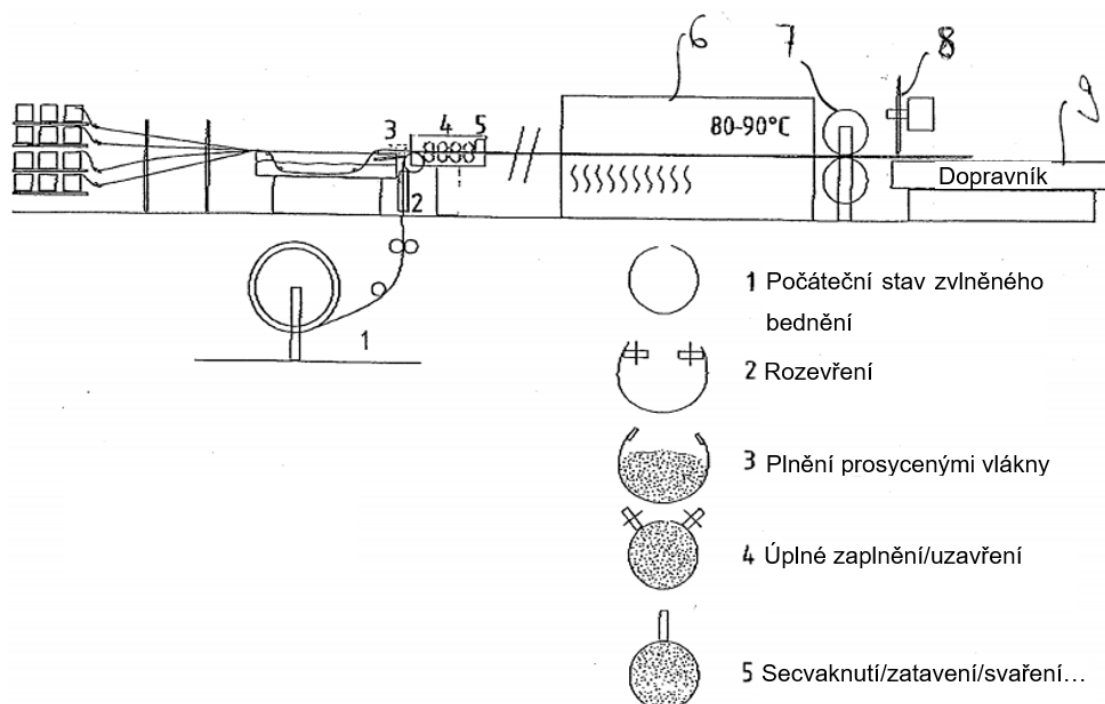
1.3.1 FRP se ztraceným bedněním

Německá společnost Schoeck Bauteile GmbH vlastní patent na výrobu ohýbaných FRP profilů s pomocí ztraceného bednění [8].



Obrázek 7 Vzorek FRP třmínku s plastovým bedněním [9]

Jedná se o výrobní technologii, při které je impregnovaný svazek vláken protažen ohebnou plastovou trubkou (neboli „husím krkem“). Dále následuje ohnutí do požadovaného tvaru a vytvrzení. Po vytvrzení je plastové ztracené bednění odstraněno nebo může být na FRP výztuži ponecháno jako ochranný prvek před slunečním zářením a dalšími vlivy. Výhoda plastového ztraceného bednění je, že může být při výrobě libovolně profilováno a umožňuje na vyráběných FRP výztužích vytvářet žebra nebo podobné povrchové struktury. Další výhodou této technologie je, že jednotlivé kroky (tvarování a vytvrzování) zde mohou být odděleny a profily není nutno ihned vytvrzovat. Jednotlivé poloměry zakřivení vytvořené touto výrobní technologií jsou omezeny minimálně na sedminásobek hodnoty průměru tyče. [8]

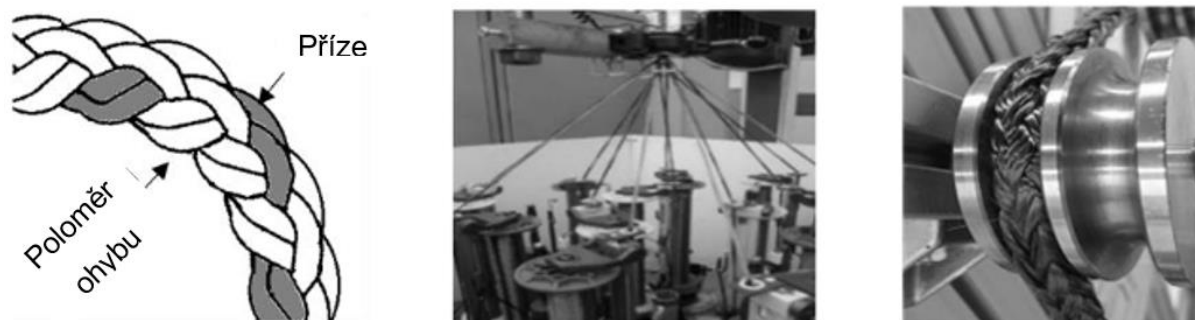


Obrázek 8 Schéma výrobního procesu (1 – odvíjení bednění z bubnového zásobníku, 2 – rozevření bednění pro umožnění plnění, 3 – plnění svazkem vláken prosycených pryskyřicí, 4 – návrat rozšířených konců bednění, 5 – trvale uzavřené bednění, 6 – vytvrzování v peci při teplotě 80-90 °C, 7 – tažení profilů, 8 – pila, 9 – dopravník pro další zpracování) [8]

1.3.2 FRP s uspořádanou strukturou vláken

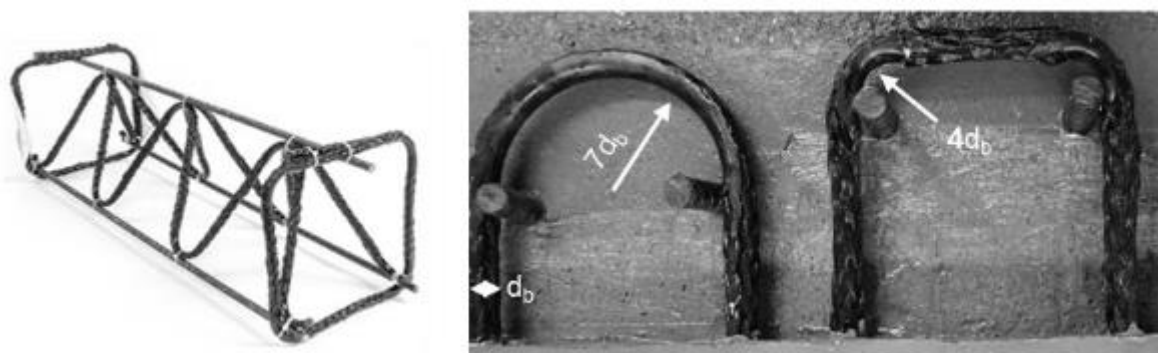
V této technologii probíhá před vytvrzením tváření propletených svazků vláken impregnovaných pryskyřicí přes kladky.

Na základě teoretických a numerických modelů byl navržena architektura kruhových čedičových vláken, ve které jsou průchozí a vnější vlákna uspořádána rotačně v rozsahu ohybu (Obrázek 9, vlevo). [9]



Obrázek 9 Výroba strukturovaně uspořádané výztuže (vlevo – princip, uprostřed – spřádání vláken, vpravo – formování) [9]

Tento způsob uspořádání vláken teoreticky poskytuje konstantní napětí vláken v průřezu profilu, které při ohýbání brání zvrásnění vrstev vláken na vnitřní straně ohybu. Tím je umožněna výroba třmínek s výrazně menším poloměrem ohybu než u pultrudované výztuže. [9]



Obrázek 10 Vzorek BFRP výztuže s porovnáním průměrů ohybu [9]

1.3.3 Vinutí FRP podél trnů

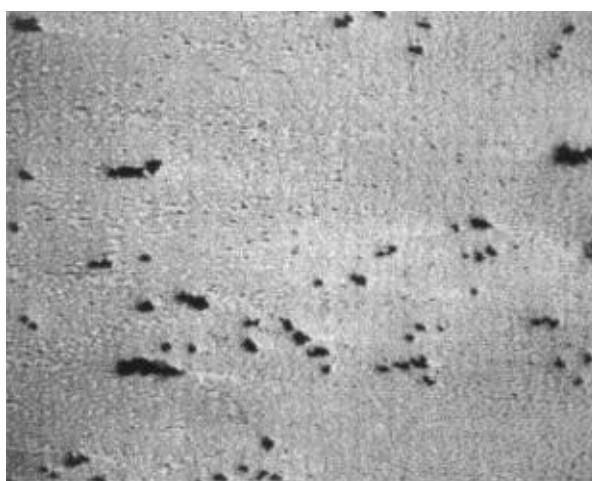
Pro výrobu armokošů byl vyvinut výrobní proces navíjení vláken, při kterém se vlákna impregnovaná pryskyřicí pod napětím navíjejí na speciálně navržené trny, aby se vytvořily přizpůsobené uzavřené třmínky. Tato technologie vyrábí třmínky s obdélníkovým průřezem prutů a velkým poměrem šířky k tloušťce. Toto uspořádání může vést ke zvýšení pevnosti v tahu ohýbaných částí až na 76 % pevnosti v tahu přímé části FRP. Důvodem je nižší počet zauzlených vláken v rozích dosažený zmenšením rozdílu mezi vnějším a vnitřním poloměrem. Technika navíjení vlákna umožňuje, aby byl poloměr zakřivení ohybu těsnější než u tradičních otevřených třmenů, protože vlákna nemusí klouzat přes sebe, jak je požadováno při ohýbání rovné pultrudované tyče před polymerací pryskyřice. [10]



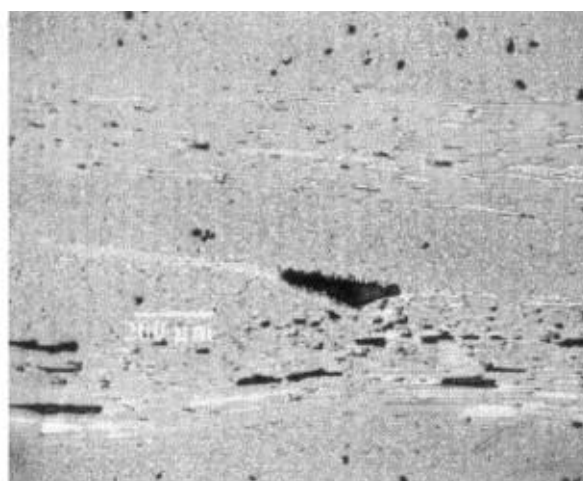
Obrázek 11 Armokoš vyrobený vinutím třmíneků kolem přímých prutů [10]

Výzkumný tým univerzity v Bath využil tuto technologii při výrobě vzorků třmíneků. Čtyři výztužné tyče CFRP byly podélně připevněny k trnu, aby vytvořily rohy idealizovaného hranolu. CFRP tyče o průměru 10 mm měly za cíl během výroby třmíneků simulovat podélnou výztuž realistického betonového nosníku. K navíjení jedné nebo více vrstev uhlíkových vláken impregnovaných pryskyřicí byl použit speciální systém řízení. Uhlíková vlákna byla navinuta kolem tyčí ve formě uzavřených obdélníkových třmenů se zakřivenými rohy (s poloměrem ohybu 5 mm), což je proces velmi podobný procesu použitému k výrobě optimalizovaných armokošů. [10]

Thaynongsak a kol. ve svém článku popisuje výrobu třmíneků taktéž pomocí vinutí, s rozdílem, že je materiál navinut kolem formy do jednoho velkého třmenu. Po dokončení procesu vytvrzování se forma odstraní a velké třmeny se poté nařezají na menší třmeny s příslušnými šířkami. [4]



(a)



(b)

Obrázek 12 Porozita v laminovaných vrstvách a – uvnitř vrstvy, b – mezi vrstvami [12]

Technologie vinutí kolem trnů čítá řadu úskalí, kterým je třeba se vyvarovat. U kvalitního kompozitního dílu musí být prameny během aplikace v neustálém napětí, aby bylo zajištěno soustředění vláken v požadovaném směru a sníženo prověšení. Běžnou vadou vinutých dílů jsou dutiny způsobené zvlněním (Obrázek 12,b), ke kterému dochází, když navíjená vrstva vláken stlačí a zdeformuje dříve položené vrstvy [11]. Póry se nachází i uvnitř laminovaných vrstev, ale zůstávají rovnoměrně rozprostřeny, zatímco ve zvlněných oblastech se póry shromažďují mezi vrstvami a vytváří dutiny. [12]

Ve zvlněných oblastech zalitých čistou pryskyřicí může docházet k mikrotrhlinám. Při nesprávném smáčení vláken nebo nerovnoměrném setření přebytečné pryskyřice mohou také bubliny pocházet z lázně s pryskyřicí. Dalším problémem, ke kterému může docházet je delaminace vláken. V případě použití prepregů (předimpregnovaných vláken) vede k delaminaci špatná adheze suchých vrstev s dříve navinutými vrstvami. [11]

1.4 Výroba ohýbaných FRP výztuží na bázi termoplastické pryskyřice

FRP výztuže na bázi termoplastické pryskyřice skýtají možnost ohýbání přímo na staveništi stejně jako ocelová výztuž, obecně však mají horší vlastnosti než termosetové výztuže.

1.4.1 Pultrudované FRP s pryskyřicí Elium

Společnosti Sireg (Itálie) a Arkema (Francie) společně vyvíjí kompozitní výztuže do betonu a kabely pro předpjatý beton s použitím termoplastické pryskyřice Elium od společnosti Arkema jako alternativu termosetových řešení. [13]

Tato akrylová pryskyřice je kapalná při pokojové teplotě (100-500 mPa·s), což není pro termoplastické pryskyřice běžné. Teplota při zpracování se v závislosti na typu pryskyřice pohybuje v rozmezí 20–115 °C. Mechanické vlastnosti jsou porovnané v následující tabulce s epoxidovou pryskyřicí. [14]

Tabulka 1 Porovnání mechanických vlastností epoxidové pryskyřice a pryskyřice Elium [14]

	Epoxidová pryskyřice	Pryskyřice Elium
Stupeň krystalinity	krystalická	amorfní
Hustota [kg/dm ³]	>1,16	>1,18
Modul pružnosti v tahu [MPa]	2800–3400	3100–3300
Pevnost v tahu [MPa]	45–85	55–76
Modul pružnosti v ohybu [MPa]	2600–3600	3250
Pevnost v ohybu [MPa]	100–130	130
Prodloužení při přetržení [%]	1,3–5,0	4–6

Na rozdíl od většiny termoplastických pryskyřic lze Elium snadno zpracovat pomocí standardního vybavení tradiční technologie pultruze (Obrázek 13).



Obrázek 13 Pultruze prutu ze skleněných vláken a pryskyřice Elium [13]

Pruty a kabely na bázi pryskyřice Elium lze znovu zahřát na teplotu 180–200 °C a snadno tvarovat nebo ohýbat, což snižuje náklady na zásobování prefabrikovanými pruty. Použití termoplastické matrice navíc otevírá cestu pro recyklaci odpadu vznikajícího ve výrobě s potenciálním silným snížením dopadu na životní prostředí. [13]



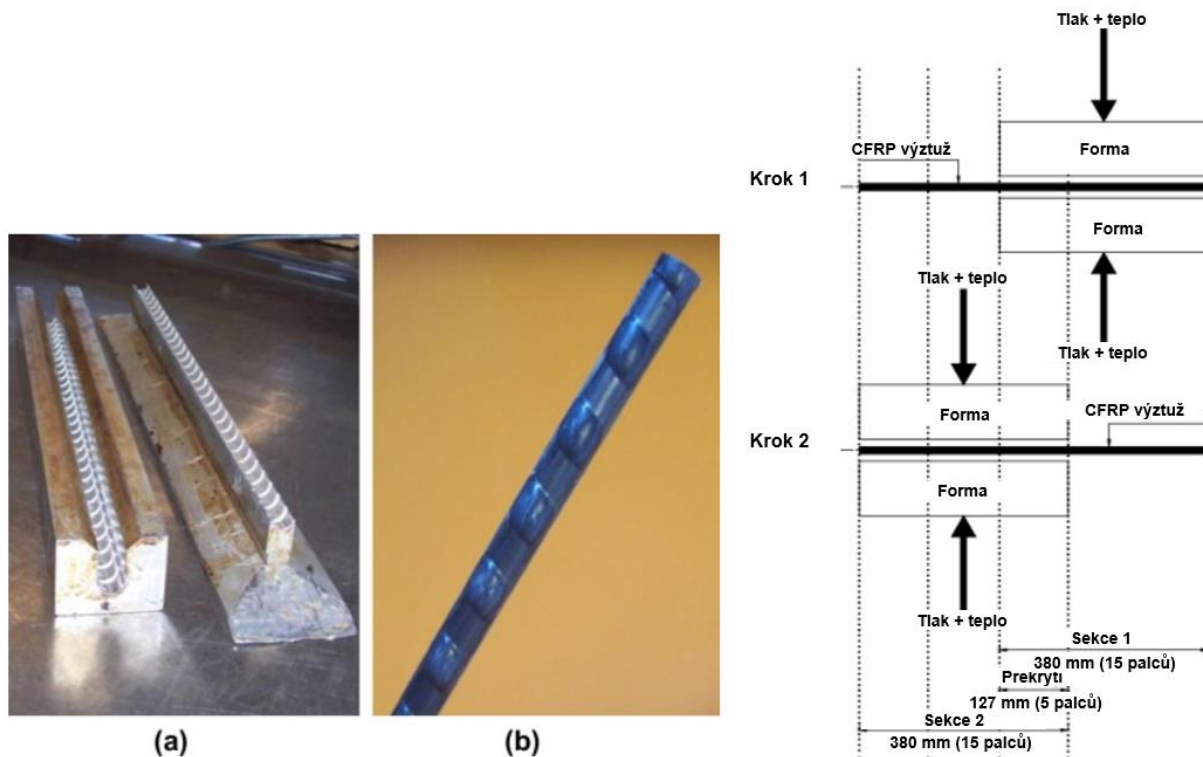
Obrázek 14 Předpínací FRP kabely s pryskyřicí Elium [13]

Několik pultruzí vyrobených kompozitních prutů tvořený termoplastickou pryskyřicí Elium vyztuženou skleněnými vlákny tvoří zkroucením kabel, který je možno použít jako předpínací výztuž. Díky použití termoplastické pryskyřice je možné balení velmi dlouhých délek výztuží na cívkách. Systém kotvení předpínané FRP výztuže je stejný jako se používá pro ocelová lana, přechod na nový materiál je tak bezproblémový. [13]

1.4.2. Lisované FRP výztuže

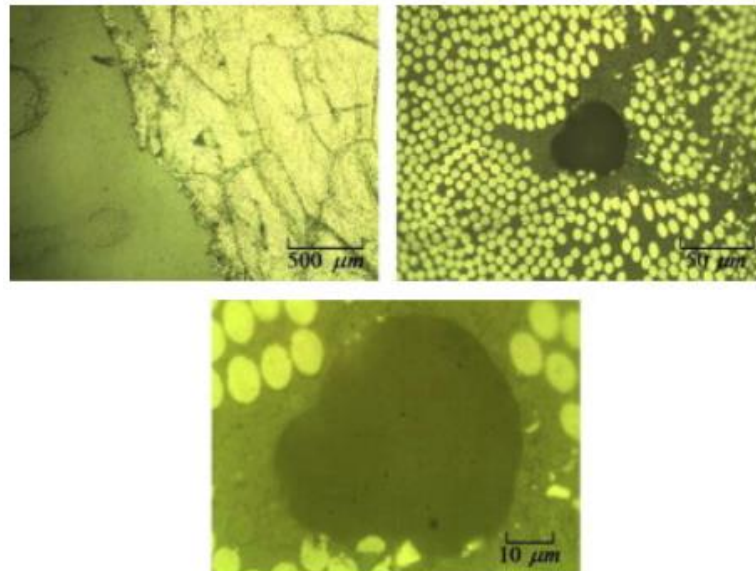
Kanadský tým výzkumníků z Concordia University v Montrealu pracuje na vývoji termoplastické CFRP výztuže. Tato výztuž je navržena s integrovanými elipsoidními žebry a v rámci studie byly optimalizovány výrobní parametry, konkrétně teplota a tlak. Dále byly na této výztuži vyhodnoceny mechanické vlastnosti (pevnost v tahu, modul pružnosti a poměrné prodloužení), soudržnost s betonem a zkoušky ohýbaných výztuží a třmínků. [15]

Vyvíjené výztuže se snažily eliminovat usmýknutí žeber vlivem stříhového namáhání. Z tohoto důvodu byla navržena elipsoidní žebra tvořena samotnými podélnými vlákny výztuže. Výroba probíhala technikou lisování, přičemž forma měla délku 380 mm. Pro výrobu výztuže delší než 380 mm bylo postupováno po sekcích, přičemž pro zajištění přímosti se každá sekce skládala ze 127 mm staré zpevněné sekce a 255 mm nově tvořené (viz Obrázek 15). [15]



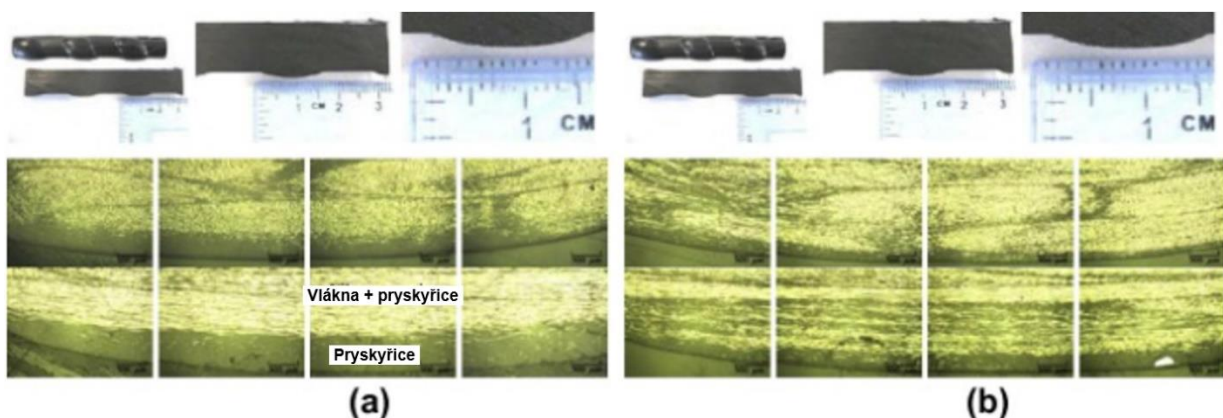
Obrázek 15 Vlevo: a) forma na tvarování výztuže, b) vytvořená výztuž; vpravo: schématický náčrt výroby výztuže delší než 380 mm [15]

Pro výrobu byly jako optimální stanoveny parametry teploty 220 °C a tlaku lisu 4 tun, následovalo chlazení vzduchem. Aby bylo možno ohýbání do požadovaného tvaru je nutno tyč opětovně prohřát na 220 °C (nechat ustálit teplotu po dobu 15 minut). Poté je možno tyč ohýbat pomocí přípravku podobnému nástroji na ohýbání měděných trubek. [15]



Obrázek 16 Mikroskopický průřez CFRP výztuže ukazující dutinu způsobenou vzduchovými bublinami. [15]

V průběhu optimalizace bylo prováděno mikroskopické pozorování k odhalení nehomogenit výztuže po výrobě. U některých vzorků byly v příčném řezu nalezeny vzduchové bubliny, které byly eliminovány zvýšením lisovacího tlaku. V podélném řezu výztuží bylo pozorováno rozložení uhlíkových vláken a termoplastické pryskyřice ve formu vytvarovaných elipsoidních žebrech. Nesprávné uložení vláken, kdy byla povrchová vrstva žebek tvořena samotnou pryskyřicí, bylo zlepšeno použitím postupného tlaku během topného cyklu. [15]



Obrázek 17 Mikroskopický podélný řez ukazující vzorky: a) nesprávné konsolidace v oblasti žebra výztuže a b) zlepšené konsolidace v oblasti žebra výztuže [15]

2 Příklady aplikace ohýbaných FRP výztuží v konstrukcích

Ohýbané FRP výztuže nachází uplatnění v celé řadě oblastí. S výhodou jsou používány v agresivních prostředích, kde ocelová výztuž rychle koroduje. Dalšími důvody použití jsou elektrická a magnetická nevodivost. V dočasných konstrukcích mohou být FRP výztuže aplikovány pro svoji jednoduchou demolici.

2.1 Přistávací dráhy

Použití nekovové výztuže na letištích může být vyvoláno nutností zajistit elektromagnetickou nevodivost, která je vyžadována v oblastech přistávacích drah se signalizační instalací. Také vysoce citlivé elektronické vybavení v letadlech potřebuje pro správné fungování magnetickou neutralitu. Dalším aspektem pro využití FRP výztuže je požadavek na maximální eliminaci koroze betonové konstrukce vlivem rozmrazovacích prostředků. [17]

2.1.1 Letiště Vídeň

Při rekonstrukci runwaye v roce 2006 bylo na ploše 1000 m² použito FRP výztužných desek. Důvodem je dlouhodobá trvanlivost konstrukce a zajištění magnetické neutrality výztuže. Na této stavbě byly využity přímé FRP pruty Ø 12 mm, třmínky Ø 12 mm a distančníky Ø 12 mm. [5]



Obrázek 18 Vyvazování FRP výztuže při rekonstrukci přistávací dráhy letiště ve Vídni [5]

2.1.2 Letiště Curych

V letech 2009-2010 proběhla rekonstrukce doku B z důvodu zvýšení kapacity letiště v Curychu. Hlavním důvodem použití FRP výztuže zde bylo docílení elektrické nevodivosti desky přistávací dráhy obsahující signalizační prvky. [5]



Obrázek 19 Aplikace FRP výztuže při rekonstrukci runway na letišti v Curychu [5]

2.2 Železnice

Se zvyšováním přepravní kapacity veřejné dopravy nachází FRP výztuž uplatnění při výstavbě železnic, jejich elektrifikace vyžaduje použití co nejméně elektromagneticky vodivých prvků. Druhou výhodou je vyšší trvanlivost a nízká objemová hmotnost při stejných nebo lepších mechanických vlastnostech, než nabízí ocelová výztuž. [7]

2.2.1 Miami-Dade MetroRail

Pro projekt 4 km dlouhé trati Miami-Dade MetroRail, která přepravuje cestující z mezinárodního letiště Miami do centra města byla zvolena GFRP výztuž.



Obrázek 20 Výstavba železničních pražců Miami-Dade MetroRail [18]

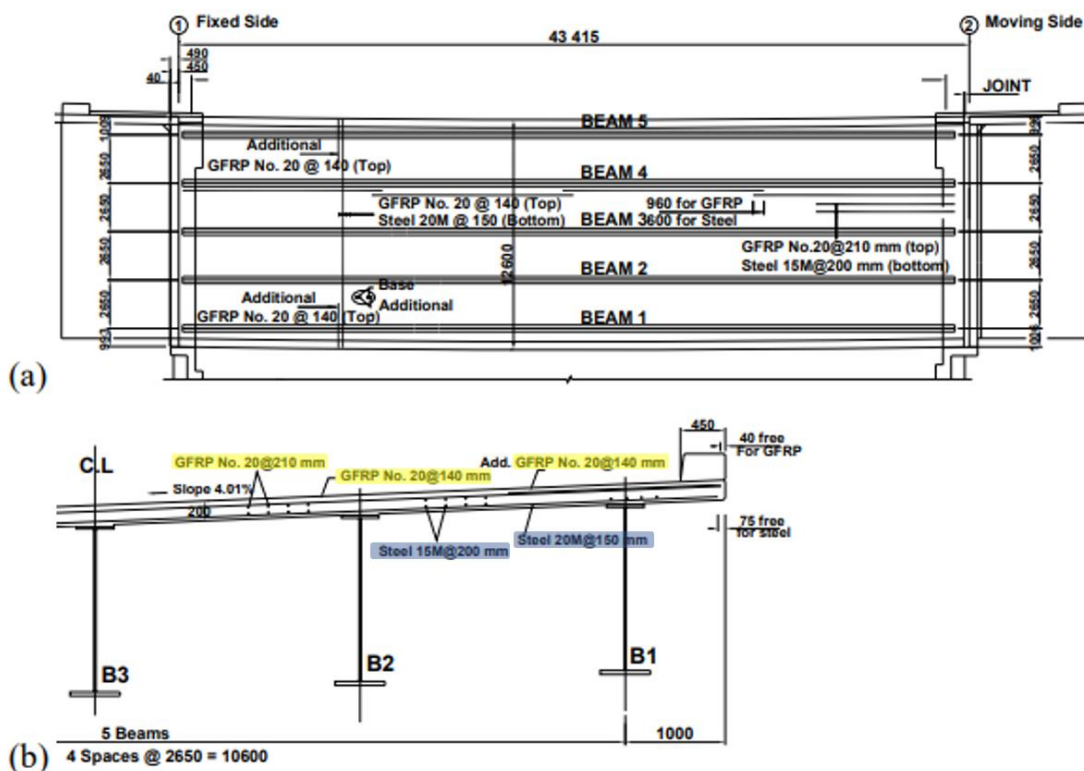
Použití korozivzdorné kompozitní výztuže zajistí dlouhodobou životnost železniční dráhy a sníží náklady na údržbu. [18]

2.3 Mosty

Při používání chemických rozmrazovacích látek v zimním období trpí ocelová výztuž mostovek. Aplikace FRP výztuží prodlouží trvanlivost konstrukce a tím jsou sníženy náklady na opravy.

2.3.1 Twin Bridges Chemin de Ste-Chateline, Sherbrooke

Tento most je hybridně vyztužen, tedy výztuž při horním líci desky je tvořena GFRP výztuží Ø 19,5 mm (GFRP No.20) a výztuž při spodním líci je tvořena ocelovou výztuží Ø 16 a 19,5 mm (Steel 15M a 20M) [19].



Obrázek 21 Geometrie mostu o pěti nosnících a) půdorys, b) příčný řez se znázorněnými typy výztuže (GFRP – žlutě, ocel – modře) [19]



Obrázek 22 Instalace výztuže mostovky Twin Bridges [19]

2.4 Pobřežní stavby

Stejně jako mosty jsou pobřežní stavby, jako opěrné stěny nebo vlnolamy, díky mořské vodě namáhány zvýšenou koncentrací chloridů, které urychlují korozi ocelové výztuže.

2.4.1 Old Florida Keys Bridge

Zde je ukázka aplikace GFRP a CFRP při dovyztužování mostovky namáhané mořskou vodou, která je pro ocel velmi agresivní. Nejprve byl odstraněn nesoudržný beton, poté byl spolu s původní výztuží ošetřen a na původní výztuž bylo přikotveno FRP dovyztužení. Posledním krokem bylo obnovení krytí a celková reprofilace betonu. [20]



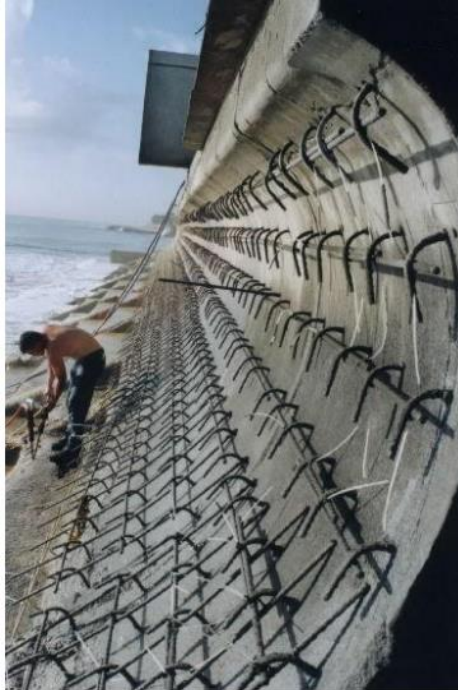
Obrázek 23 Most Keys Bridge v Old Florida [20]



Obrázek 24 Sanovaný spodní líc mostovky s dovyztužením CFRP a GFRP [20]

2.4.2 Estee Lauder estate Palm Beach

Na následující fotografii je ukázka výstavby vlnolamů v Palm Beach na Floridě. Tyto konstrukce jsou vystaveny přímému působení mořské vody a jsou tedy velmi namáhány chloridy, které vyvolávají korozi ocelové výztuže. [20]



Obrázek 25 Výstavba vlnolamů na Floridě [20]

2.5 Portálové stěny tunelů

Při výstavbě tunelů pomocí plnoprofilových razících strojů TBM (Tunnel Boring Machines) je klíčový průjezd razícího stroje portálovými stěnami. Tyto stavební jámy jsou tvořeny z hloubených nebo pilotových stěn a slouží k dočasnému přístupu stavebních technologií pro založení podzemních stavebních objektů. Pokud je portálová stěna vyztužena klasicky pomocí ocelové výztuže, nastává problém při průjezdu razícím strojem a výztuž musí být ručně přeřezána nebo hrozí riziko stabilního porušení stěny. Pokud je však tato stěna v místě budoucího průjezdu vyztužena FRP výztuží, při průjezdu strojem je namáhána na stříh a ohyb, což vzhledem k pevnostním charakteristikám tohoto kompozitního materiálu umožní čistý průjezd TBM. Tato technologie si pro velmi čistou a precizní konturu při průchodu řezné hlavy získala název Soft-Eye. [16]

2.5.1 SMART Kuala Lumpur

Zkratka SMART znamená „Stormway Management and Road Tunnel“. Tunel se tedy skládá ze dvou částí: tunelu pro dešťovou vodu a dálničního tunelu, což z něj činí nejdelší víceúčelový

tunel na světě. FRP výztuž je zde aplikována ve formě přímých výztuží Ø 32 mm a 22 mm a třmínků Ø 20 mm pro vyztužení vrtaných pilot technologie Soft-Eye. [5]



Obrázek 26 Průchod řezné hlavice portálem tunelu v Kuala Lumpur vyztuženým FRP výztuží [5]

2.5.2 Circle Line a Downtown Line v Singapuru

Na fotografiích (Obrázek 27) je zachycena instalace armokoše hloubené stěny při výstavbě linky metra v Singapuru. Ze snímků je patrná kombinace materiálu, kdy vrchní a spodní část armokoše je tvořena ocelovou výztuží a prostřední část, kterou bude procházet razicí stroj je tvořena FRP výztuží. FRP výztuž je zde aplikována ve formě přímých výztuží Ø 32 mm a 20 mm a třmínků Ø 20 mm. [5]



Obrázek 27 Armokoš hloubené stěny při výstavbě linky metra Circle Line v Singapuru [5]

Portálová stěna linky Downtown Line je tvořena z pilot – na snímcích jsou vidět armokoše kruhového průřezu. FRP výztuž je zde aplikována ve formě přímých výztuží Ø 38 mm a třmínků Ø 22 mm. [5]



Obrázek 28 Armokoše pilotové stěny při výstavbě linky metra Downtown Line v Singapuru [5]

2.6 Další aplikace

Mezi další stavební konstrukce, kde se mohou ohýbané FRP výztuže uplatnit, patří například:

- parkovací domy, které jsou zvláště v zimním období vystaveny účinku chloridů z posypových solí;
- chladicí věže, pro svoji rychlou výstavbu a vyšší trvanlivost;
- prefabrikované betonové díly, určené pro montáž jeřábem – oka pro zvedání jeřábem vyrobené z FRP lze po usazení prvku snadno odřezat a není je třeba dále zapravovat;
- zařízení pro zdravotnické nebo informační technologie, aby nedocházelo k rušení citlivých elektrických obvodů nebo zařízení, které generují magnetické pole nebo vyžadují velmi vysoký proud. [7]

3 Trvanlivost FRP výztuží

FRP výztuže vykazují ve srovnání s ocelovou výztuží vysokou trvanlivost, ale přímé stanovení trvanlivosti tohoto materiálu je složitější, protože jeho degradace může záviset na samotné pryskyřici, vláknech nebo na vlastnostech rozhraní pryskyřice-vlákno. Na trhu jsou dostupné různé druhy FRP výztuží a jejich výroba se neustále vyvíjí. Výztuže se odlišují různým chováním při vysoké teplotě, vlivem expozičního prostředí (nepříznivý je zejména vliv vlhkosti a alkálií) nebo při dlouhodobém zatěžování. [21]

Pryskyřičná matrice chrání vlákna a rovnoměrně mezi nimi přenáší napětí. Účinnost pryskyřice závisí na spojitosti povrchu a absenci defektů. Například neošetřené řezy na koncích

kompozitu vlákna přímo vystavují vnějšímu prostředí, což z pohledu trvanlivosti přináší nežádoucí účinky. V takových oblastech mohou účinky prostředí způsobit poškození vazby pryskyřice-vlákno. [21]

Vlastnosti pryskyřic ovlivňující trvanlivost nezávisle na typu pryskyřice nebo vláken:

- Smáčivost pryskyřice (kvalita prosycení vláken pryskyřicí);
- Absence trhlin (povrchových nebo zasahujících do tloušťky průřezu);
- Absence dutin (obecně jsou vhodnější menší a dobře distribuované dutiny);
- Stupeň vytvrzení pryskyřice (pokud výrobní proces neproběhl správně, může být pryskyřice nedostatečně zesíťována).

Výběrem typu pryskyřice lze dále ovlivňovat:

- Odolnost proti působení zásad a chloridů;
- Houževnatost (schopnost odolávat mikrotrhlinám);
- Zamezení vniku agresivního prostředí do výztuže;
- Snadnost výroby s minimalizací kolísání kvality;
- Vysoká kompatibilita s vlákny pro zajištění silné vazby pryskyřice-vlákno. [21]

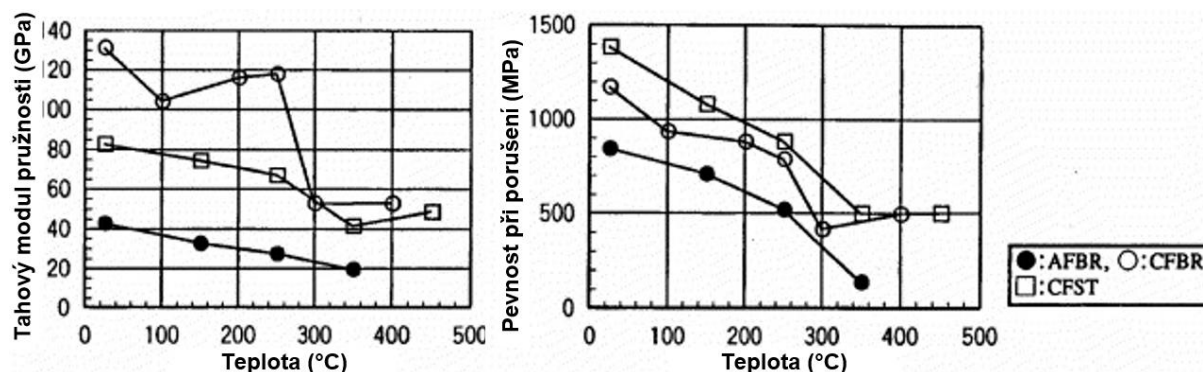
Vlákna kompozitního materiálu propůjčují tuhost a pevnost, takže i jejich mechanické vlastnosti a trvanlivost jsou pro výsledné vlastnosti kompozitu zásadní. Trvanlivost skleněných, aramidových a uhlíkových vláken, která jsou nejběžnějšími typy používanými ve stavebnictví, se liší. Obecně jsou skleněná vlákna použita jako výztuž v betonu méně odolná kvůli vysoké chemické citlivosti na alkalické prostředí (nicméně se často používají pro nejnižší cenu).

Trvanlivost kompozitního materiálu souvisí také s integritou rozhraní mezi těmito dvěma složkami (pryskyřice + vlákna). Soudržnost FRP výztuže závisí na přenosu smykových a příčných sil na rozhraní mezi prutem a betonem a mezi jednotlivými vlákny uvnitř prutu. Tyto síly jsou přenášeny pryskyřicí a prostředím, které degradují polymerní pryskyřice nebo rozhraní pryskyřice-vlákno, pravděpodobně degradují soudržnost FRP výztuže s betonem. [21]

3.1 Vliv teploty

V polymerním kompozitu jsou zvýšením teploty více než vlastnosti vláken ovlivněny vlastnosti matrice. Teplota skelného přechodu (T_g) matrice, je klíčovým parametrem, protože definuje teplotní bod odpovídající významným změnám struktury se značným snížením mechanických vlastností. Modul pružnosti a pevnost FRP tyče se při dlouhodobém zatěžování při vysoké

teplotě snižují. Z krátkodobého hlediska nemá zvýšení teploty mezi 30 a 40 °C podstatný vliv, což je významná podmínka pro životnost konstrukce. [21]



Obrázek 29 Vliv teploty na modul pružnosti (vlevo) a pevnost v tahu (vpravo) aramidových (AFBR) a uhlíkových (CFBR a CFST) výztuží [21]

Ve stavebních aplikacích jsou konstrukce vystavovány vysokému počtu zmrazovacích cyklů, které mají za následek vnikání vody a chloridových iontů do betonu. Takto nízké teploty nepřímou způsobují přístup agresivních médií a následnou degradaci pryskyřice, vláken a mezifázové vazby FRP výztuže. [21]

Co se týká požární odolnosti FRP, jsou určeny pryskyřicí, protože polymerní materiály jsou obvykle hořlavé. Pryskyřice obvykle měknou a taví se nebo se vznítí nad 150–200 °C. Samotná vlákna jsou více či méně schopná odolávat vyšším teplotám: aramid do 200 °C, sklo do 300–500 °C, zatímco uhlík v neoxidujícím prostředí až do 800–1000 °C [22]. Díky teplotní nezávislosti samotných uhlíkových vláken vykazuje CFRP nejpříznivější chování.

3.2 Vliv UV záření

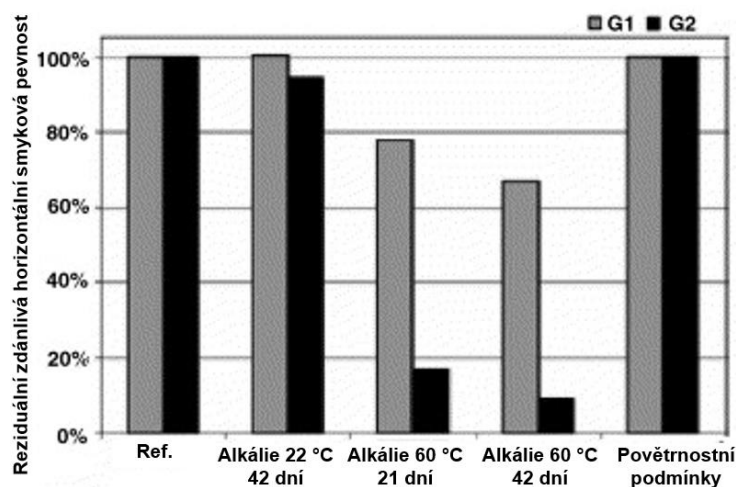
Ultrafialové paprsky ovlivňují polymerní materiály, které mohou značně degradovat [23]. Expoziční testy [24],[25] ukázaly pro AFRP tyče po 2 500 hodinách expozice UV záření přibližně 13% snížení pevnosti v tahu, pro GFRP tyče po 500 hodinách expozice 8% snížení pevnosti v tahu (poté již žádné další snížení) a u CFRP tyčí nedošlo k žádnému snížení. Některé výsledky kombinovaných testů expozice ultrafialovému záření a vlhkosti s mechanickým namáháním tyčí nebo bez mechanického namáhání [26],[27] ukázaly snížení pevnosti v tahu o 0–20 % počátečních hodnot u CFRP, 0–30 % u AFRP a 0–40 % u GFRP.

FRP výztuže jsou po většinu svojí životnosti před UV zářením chráněny samotným betonem, je však nutno věnovat pozornost podmínkám skladování.

3.3 Vliv alkalického prostředí

Nejčastějšími vlivy, kterým jsou FRP výztuže zabudované v betonu vystavovány, jsou vlhkost a zásadité pH 12,5-14. Toto alkalické prostředí umožňuje pasivaci ocelové výztuže, která se však s procesem karbonatace betonu vytrácí a ocelová výztuž začíná silně degradovat. S výhodou se tedy využívá FRP výztuží, pro které změna pH vlivem karbonatace není zásadní. Na druhou stranu zásadité prostředí degraduje skleněná vlákna a pokud nejsou chráněna vhodnou polymerní pryskyřicí, může být trvanlivost kompozitu snížena. [21]

V experimentu [28] srovnávajícím degradaci GFRP s termoplastickou a s polyesterovou výztuží byl prokázán značný pokles mechanických vlastností GFRP s polyesterovou pryskyřicí při vystavení alkalickému prostředí a zvýšené teplotě.



Obrázek 30 Degradace GFRP prutů vystavených různým typům alkalického prostředí a simulaci povětrnostních podmínek (G1 – výztuž s termoplastickou pryskyřicí a G2 – výztuž s polyesterovou pryskyřicí) [28]

Nejlepší odolnost v alkalickém prostředí mají uhlíková vlákna, následovaná aramidovými a poté skleněnými vlákny. [29]

Byly provedeny některé experimentální studie, které zkoumaly vlastnosti GFRP materiálů zabudovaných do betonových stavebních konstrukcí. Nebyla zjištěna žádná degradace GFRP výztuže (tyče a rošty) v prostředí v reálných inženýrských stavbách vystavených podmínkám prostředí po dobu 5–8 let. Energiově disperzní analýza (EDX) neukázala žádné vniknutí alkálií do GFRP výztuže z roztoku pórů v betonu. Výsledkem bylo, že pod napětím je GFRP výztuž odolná a vysoce kompatibilní s betonem. [21],[30]

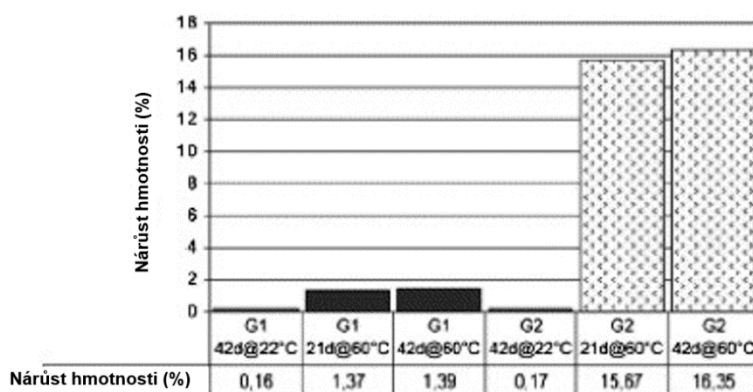
3.4 Vliv chloridů

Přítomnost chloridů z mořské vody nebo rozmrazovacích solí v betonových konstrukcích obvykle urychluje korozi výztuže. Výsledky výzkumů se značně liší, protože je obtížné rozlišit účinky chloridového napadení a degradace v důsledku difúze vlhkosti nebo alkalického napadení vláken. Experimentální studie prokázaly, že CFRP a AFRP výztuže nejsou citlivé na chloridové ionty, ale GFRP výztuže mohou být v mořském prostředí nebo v přítomnosti rozmrazovacích solí vážně poškozeny. [31]

3.5 Vliv vlhkosti

Již při betonáži nebo později za provozu mohou FRP výztuže absorbovat vodu, která v kombinaci se zvýšenou teplotou vyvolává napětí v materiálu kompozitu s následným poškozením vláken, matrice a jejich rozhraní. Nastává snižování pevnosti FRP výztuže v čase. [21]

Vlhkost lze absorbovat kapilární absorpcí podél jakékoli již existující trhliny nebo rozhraní mezi vlákny a pryskyřičnou matricí. Vlhkost se na FRP výztužích projevuje hmotnostní absorpcí (Obrázek 31), následovanou plastifikací matrice a snížením teploty skelného přechodu. Vlhkost může působit jako změkčovadlo, které narušuje Van-der-Waalsovy vazby v polymerních řetězcích [32] a způsobuje porušení vazby mezi vlákny a matricí [33]. Tento jev se nejvíce projevuje u polyesterových pryskyřic a vysokých teplot (> 60 °C). [21]



Obrázek 31 Absorpční kapacita (G1 – výztuž s termoplastickou pryskyřicí a G2 – výztuž s polyesterovou pryskyřicí) [28]

Uhlíková a skleněná vlákna nemohou absorbovat vodu [34]. Naopak absorpce vody v aramidových vláknech způsobuje reverzibilní snížení pevnosti v tahu a modulu pružnosti nebo relaxaci a nevratné snížení únavové pevnosti [35]. Zhoršení vlastností AFRP v důsledku absorpce vody je asi 15–25 % [36]. Cyklické střídání sucha a vlhkosti (např. u pobřežních staveb namáhaných odšťrkující vodou) způsobuje u výztuže AFRP bobtnání, v jehož důsledku

vznikají trhliny ve vazbě mezi vlákny a maticí. Z tohoto důvodu nejsou aramidová vlákna použitelná v mořském prostředí, ačkoliv vykazují nízkou citlivost na chloridy [37].

Tabulka 2 Souhrn trvanlivosti FRP výztuží v betonu vystavenému agresivním prostředí [21]

Expoziční prostředí	AFRP	CFRP	GFRP	Ovlivňující parametry
Alkalická expozice	Snížení pevnosti v tahu o 0-20 %	Snížení pevnosti v tahu o 0-20 %	Snížení pevnosti v tahu o 0-75 %	Typ pryskyřice, teplota, tahové napětí
Chloridová expozice	Nízká citlivost	Odolné	Citlivé	-
Vlhkost	Zhoršení mechanických vlastností vláken	Poškození pryskyřice	Poškození pryskyřice	Typ pryskyřice, teplota

3.6 Vliv mechanického namáhání

Mezi vlastnosti závislémi na mechanickém namáhání v čase patří tečení, relaxace a únava.

Tečení se u FRP výztuží projevuje deformací při trvalém zatížení a dlouhodobou pevností v tahu při trvalém zatížení. Pevnost v tečení může být definována jako tahové napětí způsobující poruchu po stanovené době od zahájení trvalého zatížení. Náchylnost k tečení určují zejména vlastnosti polymerních pryskyřic a orientace a objemový podíl vláken. Experimentálně [38] bylo prokázáno, že selhání výztuží tečením nenastává, pokud je trvalé napětí nižší než 60 % krátkodobé pevnosti, a proto je tento jev obzvlášť sledován u předpínaných FRP výztuží. [21]

Relaxace je definována jako pokles napětí v zatěžované výztuži v čase při dané konstantní teplotě a aplikovaném počátečním zatížení, jež je udržováno k dosažení konstantní deformace. [21]

Únava je poškození soudržnosti FRP materiálu způsobené působením cyklického namáhání, které snižuje pevnost a tuhost. Hodnocení únavové odolnosti je složité kvůli různým mechanismům poškození FRP prvku: praskání matrice, trhání vláken, propojování trhlin, počátek a růst delaminace. Úroveň napětí, pod kterou lze materiál cyklicky namáhat nekonečně mnohokrát bez poruchy se nazývá mez únavového napětí. [21]

III PRAKTICKÁ ČÁST

1 Cíl diplomové práce

Cílem diplomové práce je studium vlastností ohýbaných FRP výztuží.

Teoretická část diplomové práce popisuje výrobu ohýbaných FRP výztuží, uvádí příklady aplikace ohýbaných FRP výztuží v betonových konstrukcích a vlivy na jejich trvanlivost. Je provedena rešerše možností testování vlastností ohýbaných FRP výztuží.

Cílem praktické části diplomové práce je návrh a realizace experimentu pro sledování trvanlivosti ohýbaných FRP výztuží. Experimentálně je ověřena trvanlivost přímých a ohýbaných FRP prutů při uložení ve vodě a alkalickém roztoku při 20 °C a 40 °C. Stav zkušebních vzorků je dokumentován a je vyhodnocen vliv působení těchto agresivních prostředí na vlastnosti FRP výztuží.

2 Metodika práce

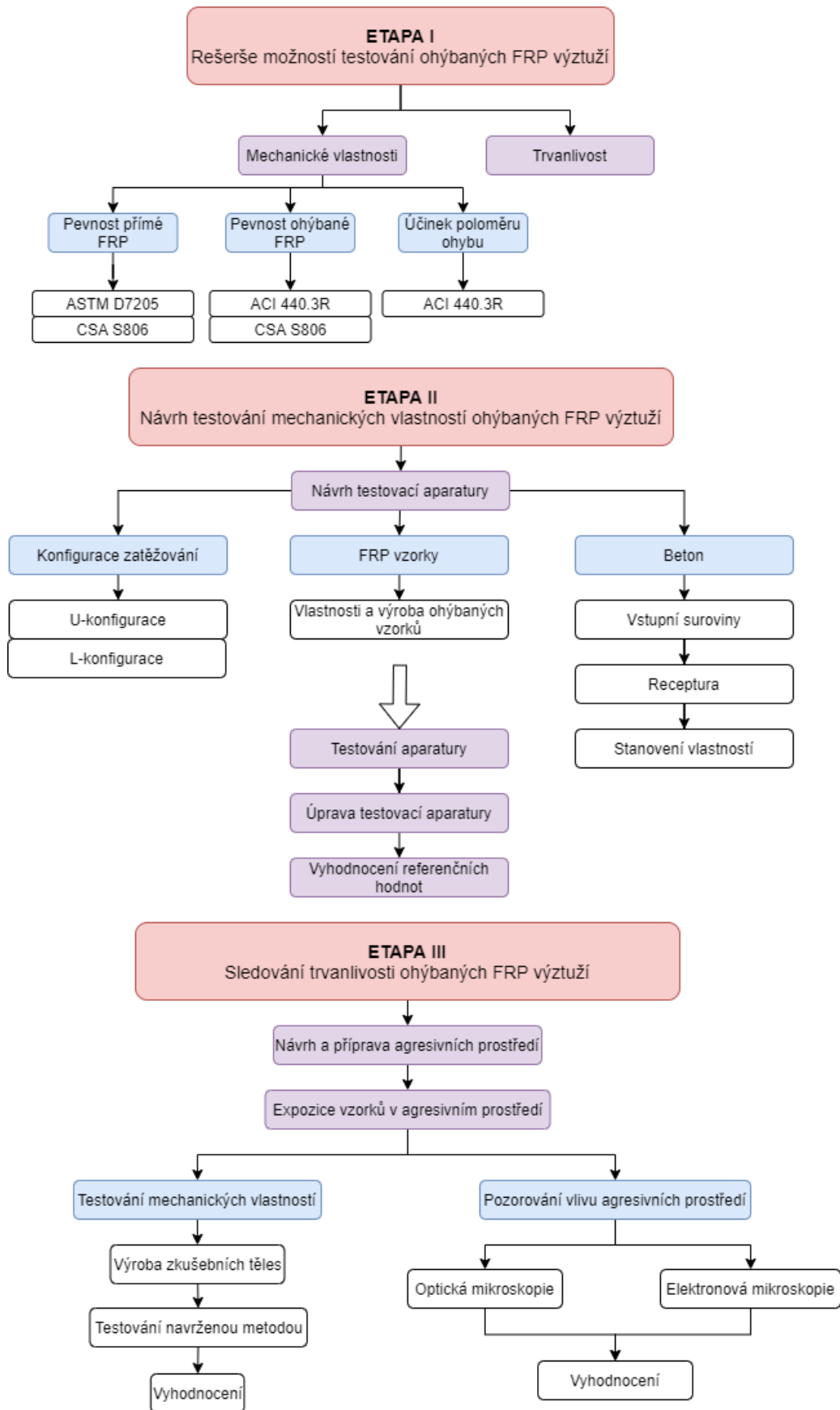
Praktická část diplomové práce se skládá ze 3 etap.

V I. etapě je provedena rešerše možností testování ohýbaných FRP výztuží. Pozornost je zde zaměřena především na existující normy zabývající se zkoušením mechanických vlastností ohýbaných FRP výztuží do betonu. Druhá část je poté zaměřena na testování trvanlivosti tohoto materiálu při zatížení agresivními vlivy a dlouhodobým mechanickým zatížením.

II. etapa se zabývá návrhem testování mechanických vlastností ohýbaných FRP výztuží. Je proveden prvotní návrh testovací aparatury, který spočívá v popisu testovaných FRP vzorků, použitého betonu a různých konfigurací prováděné zkoušky. Prvotní návrh aparatury je otestován a upraven. Součástí této etapy je získání a vyhodnocení referenčních hodnot mechanických vlastností.

III. etapa se věnuje sledování trvanlivosti ohýbaných FRP výztuží. Je zde popsán návrh a příprava agresivních prostředí, kterým jsou vzorky FRP výztuží následně podrobeny. Vzorky jsou po daných dobách expozice mechanicky testovány a je sledován vliv agresivních prostředí pomocí mikroskopického pozorování.

Schéma metodiky práce shrnuje Obrázek 32.



Obrázek 32 Schéma metodiky práce

3 ETAPA I: Možnosti testování vlastností ohýbaných FRP výztuží

3.1 Možnosti testování mechanických vlastností

Testováním vlastností ohýbaných FRP výztuží se zabývá americká norma ACI 440.3R, která se pro testování dílčích materiálových vlastností odkazuje na normy ASTM. Dále pro testování vlastností FRP výztuží existuje kanadská řada norem CSA S806.

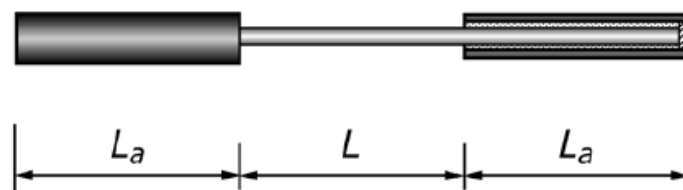
3.1.1 Pevnost v tahu přímých výztuží

Aby bylo možné porovnat pokles pevností ohýbané FRP výztuže, je nejprve třeba znát pevnost v tahu přímých FRP prutů. Tímto se zabývá americká norma ASTM D7205. Její kanadská alternativa CSA S806 a evropská alternativa ISO 10406-1 se odlišují pouze v detailech, princip zkoušky zůstává stejný.

3.1.1.1 Testování dle ASTM D7205

Podstatou testování dle ASTM D7205 je FRP tyč opatřená kotvícími koncovkami, která je ukotvena v mechanickém zkušebním stroji a konstantní rychlostí zatěžována tahem do porušení při zaznamenávání síly, podélného přetvoření a podélného posunutí. [39]

Po získání vypovídajících hodnot je třeba otestovat alespoň pět vzorků, pokud nelze získat platné výsledky použitím menšího počtu vzorků. Celková délka vzorku se skládá z volné délky L a dvojnásobku délky kotvy L_a . Volná délka mezi kotvami L nesmí být menší než 380 mm nebo 40násobek účinného průměru tyče. Rychlost deformace se zvolí tak, aby došlo k poruše od 1 do 10 minut od začátku působení síly. [39]



Obrázek 33 Geometrické uspořádání vzorku [39]

Pevnost v tahu se vypočítá z rovnice:

$$F_{tu} = P_{max}/A,$$

kde F_{tu} je mezní pevnost v tahu [MPa],

P_{max} je maximální síla při porušení [N],

A je plocha průřezu tyče [mm].

Modul pružnosti v tahu se vypočítá z rovnice:

$$E_{chord} = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon,$$

kde E_{chord} je modul pružnosti [MPa],

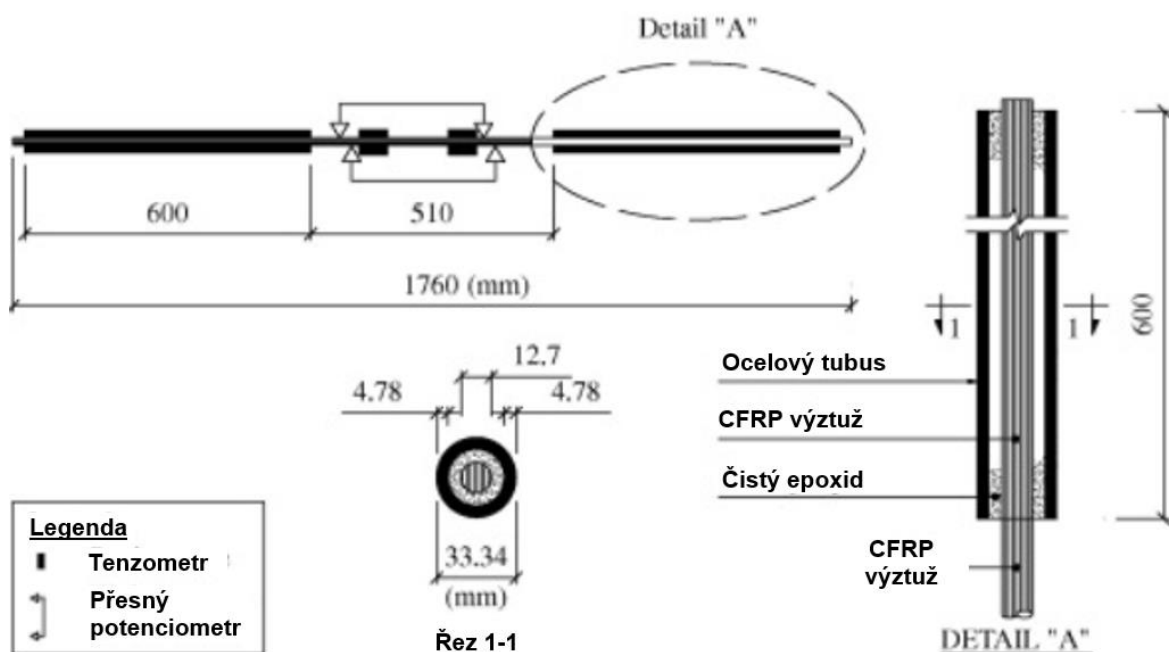
$\Delta\sigma$ je rozdíl aplikovaného tahového napětí mezi počátečním a koncovým bodem přetvoření [MPa],

$\Delta\varepsilon$ je rozdíl přetvoření v tahu mezi počátečním a koncovým bodem přetvoření [mm/mm].

Rozsah přetvoření má být v dolní polovině křivky napětí/deformace, přičemž počáteční bod je přetvoření 0,001 a koncový bod je přetvoření 0,003. Pro materiály, které selhaly při přetvoření pod 0,006, musí být počáteční bod 25 % maximálního napětí a koncový bod 50 % maximálního napětí. Modul pružnosti v tahu se uvádí na tři platné číslice. [39]

3.1.1.2 Testování dle CSA S806

Výše zmiňovaný kanadský tým výzkumníků z Concordia University v Montrealu, který pracuje na vývoji termoplastické CFRP výztuže použil pro testování normu CSA S806 [41]. Cílem této sady zkoušek bylo získat pevnost v tahu, modul pružnosti a poměrné prodloužení termoplastických CFRP výztuží. Výztuž byla z obou konců opatřena kotvicí úchytkou v délce 620 mm a zalita epoxidovou pryskyřicí. Volná vzdálenost mezi kotvami byla 510 mm (40násobek průměru výztuže). Dále byl každý vzorek opatřen 4 tenzometry pro měření napětí a 2 potenciometry pro měření protažení. [15]



Obrázek 34 Schéma vzorku pro zkoušku pevnosti v tahu [15]

3.1.2 Pevnost ohýbaných výztuží

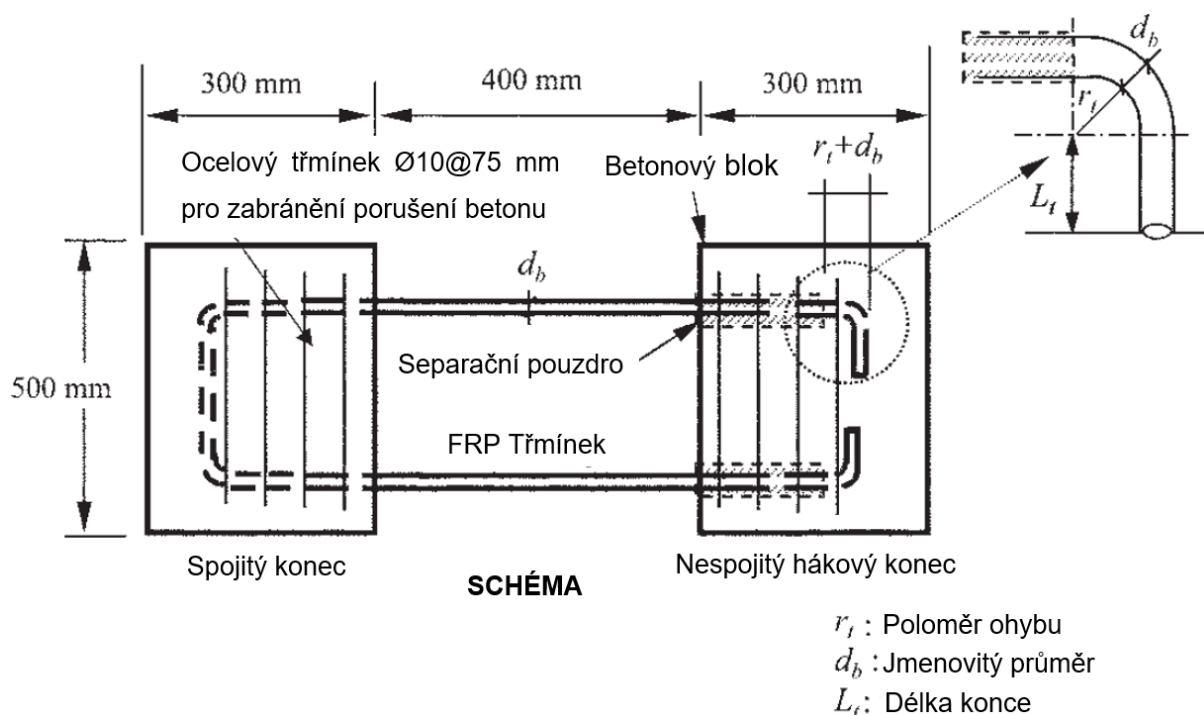
Zkoušením tahové pevnosti v ohybu FRP tyčí a třmenů se zabývá zkušební metoda dle ACI 440.3R-12 část B.5. a kanadská norma CSA S806.

3.1.2.1 Testování dle ACI 440.3R

Zkušební metoda dle ACI 440.3R specifikuje zkušební požadavky pro pevnost ohýbaných FRP tyčí používaných jako třmeny v betonových konstrukcích. Při ohýbání třmínek FRP pro vytvoření ukotvení dochází k významnému snížení pevnosti třmínek. Hlavními proměnnými ovlivňujícími pevnost ohnuté části jsou průměr tyče, poloměr ohybu, délka volného konce třmínku nebo typ třmínku FRP. Tato zkušební metoda měří mezní únosnost FRP třmeny vystaveného tahovým silám ve směru přímé části. [40]

Zkušební zařízení a požadavky

Hydraulický lis a siloměr by měly být kalibrovány podle ASTM E4, měly by mít schopnost vyvodit zatížení překračující pevnostní charakteristiku vzorku a být schopné aplikovat zatížení při požadované rychlosti zatížení. Siloměr by měl být také schopen poskytovat hodnoty s přesností na 1 % během celého testu. [40]



Obrázek 35 Konfigurace zkušebního vzorku [40]

Příprava vzorků

Konfiguraci typického vzorku zobrazuje Obrázek 35. Rozměry každého betonového bloku použitého k ukotvení FRP třmínku se mohou lišit podle rozměrů použitého třmínku. Volná délka třmínku mezi dvěma bloky by však neměla být menší než 200 mm, doporučuje se 400 mm. Betonový blok by měl být vyztužen ocelovými třmeny, jak je znázorněno na obrázku, aby se zabránilo porušení betonového bloku před prasknutím FRP třmínku v ohybu. Délka volného konce L_t testovaného FRP třmenu by neměla přesáhnout 150 mm. Pro vyloučení spolupůsobení s betonem se v přímé části FRP třmenu používá separační pouzdro. Separací pouzdro by mělo prokluzovat přes FRP tyč a konce trubek separačního pouzdra by měly být vyplněny těsnícím materiálem, aby se zabránilo vyplnění trubek betonem během lití.

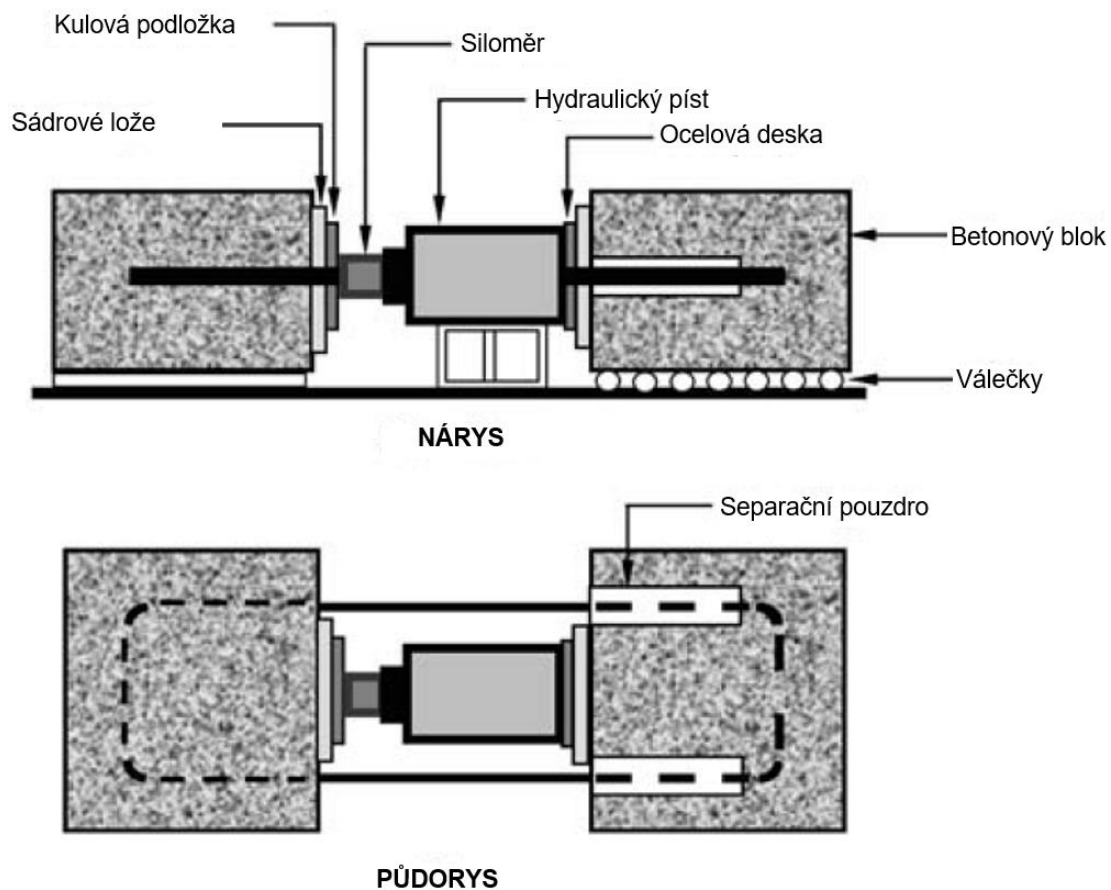
Beton by měl být standardní směs s hrubým kamenivem o maximálním rozměru 20 až 25 mm. Měl by být dávkován a míchán v souladu s příslušnými částmi norem ASTM C192 / C192M. Beton by měl mít sednutí 100 ± 20 mm dle ASTM C143 / C143M a pevnost v tlaku po 28 dnech by měla být 30 ± 3 MPa dle ASTM C39 / C39M. Pro stanovení pevnosti v tlaku by mělo být z každé dávky betonu vyrobeno minimálně pět standardních kontrolních válců 150 x 300 mm nebo 100 x 200 mm.

Počet platných výsledků zkoušky pro každou sadu vzorků by neměl být menší než pět. Pokud vzorek selže rozštěpením betonového bloku, výsledek testu by neměl být brán v úvahu a další test by měl být proveden na samostatném vzorku odebraném ze stejné šarže jako vadný vzorek.

Pokud zkušební vzorky selžou v důsledku vytažení ohnuté tyče z betonu, znamená to, že poloměr ohybu a délka volného konce třmínku nejsou pro testovanou tyč dostačující. Je nutné upravit tyto parametry (možno upravit i velikost testovacích bloků) a znovu otestovat. [40]

Testovací metoda

Zkušební sestava, kterou znázorňuje Obrázek 36, se skládá z hydraulického zvedáku pro vyvození relativního posunu mezi dvěma betonovými bloky a snímače zatížení pro měření aplikovaného zatížení. Aby se zatížení rozložilo na povrch betonu, je třeba před snímač zatížení a hydraulický zvedák umístit ocelové desky a sádrové vaky. Blok obsahující zkušební část tyče by měl být umístěn na ocelové válečky, aby se minimalizovaly třecí síly mezi blokem a zkušebním ložem. [40]



Obrázek 36 Schéma zkoušky tahu ohýbaného třmínku [40]

Pevnost v tahu přímých FRP tyčí se stejným průměrem jako FRP třmínky by měla být hodnocena podle ASTM D7205 / D7205M.

Zkušební vzorky by během zkoušky neměly být vystaveny žádným nárazům, vibracím nebo kroucení. Nárůst síly by měl být plynulý, dokud vzorek neselže a nemělo by docházet k pozastavení zatěžování. Rychlost zatěžování by měla být zvolena tak, aby vzorek selhal mezi 1 a 10 minutami od začátku zkoušky.

Zaznamená se hodnota maximálního porušení a povaha poruchy vzorku. [40]

Výpočet

Únosnost v ohybu FRP třmínku by měla být hodnocena pouze na vzorku, který byl v záhybu poškozen. V případech, kdy jednoznačně došlo k rozdělení bloku, by měla být data ignorována a měly by být provedeny další zkoušky, dokud počet zkušebních vzorků prasklých v ohybu není alespoň pět.

Výpočet pevnosti ohybu FRP třmenů f_{ub} [MPa] se provede dle následující rovnice a zaokrouhlí na 3 platné číslice,

$$f_{ub} = \frac{F_{ub}}{2A}$$

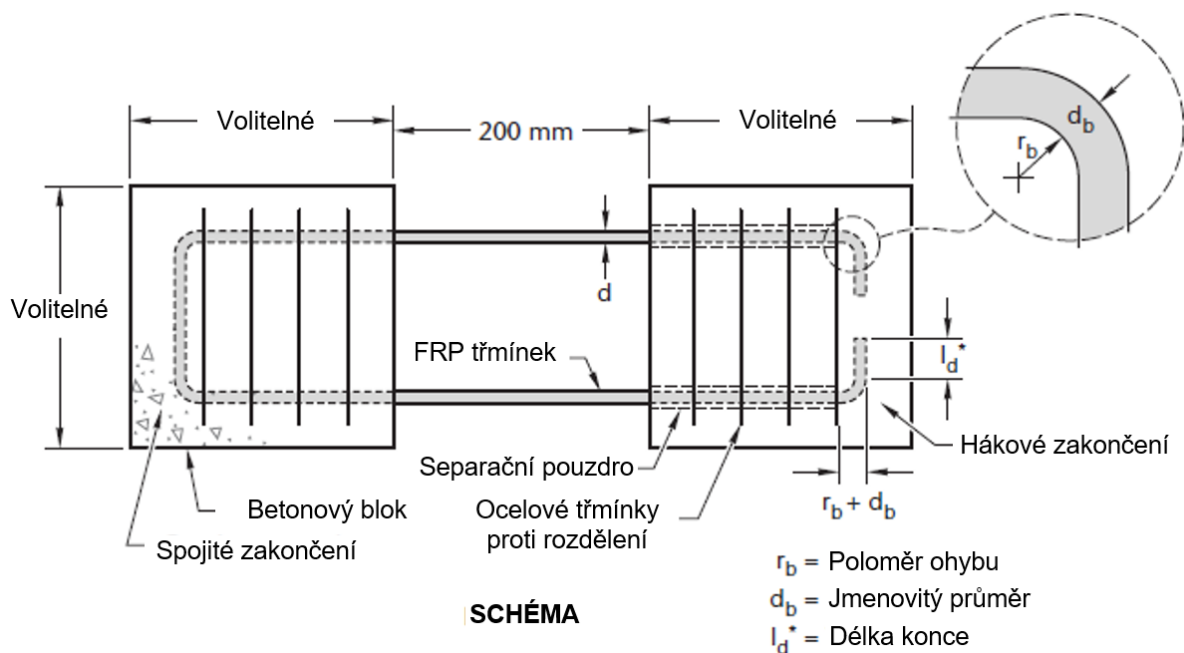
přičemž F_{ub} je maximální zatěžovací síla při porušení [N],
 A je plocha průřezu tyče [mm].

Následně je možno vypočítat poměrné snížení pevnosti ohybem FRP výztuže χ [-] porovnáním s pevností v tahu přímých FRP prutů f_u [MPa]. [40]

$$\chi = \frac{f_{ub}}{f_u}$$

3.1.2.2 Testování dle CSA S806

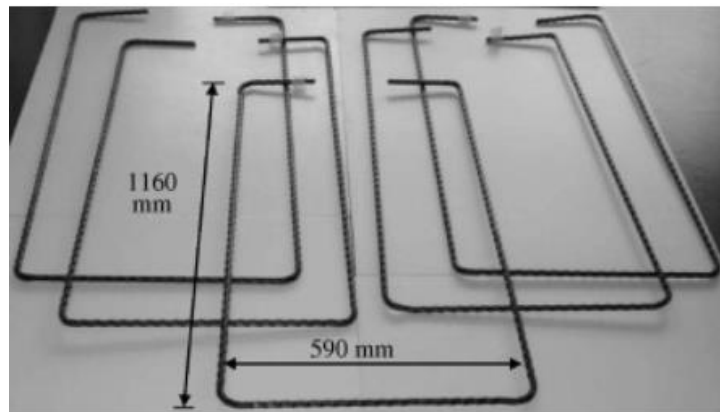
Kanadská norma CSA S806 popisuje stanovování pevnosti v tahu ohýbaných částí stručněji než ACI 440.3R, nicméně se od sebe výrazně neliší a princip testování zůstává stejný [41].



Obrázek 37 Konfigurace zkoušky pevnosti v tahu ohýbané části dle CSA S806 [41]

Kanadský tým výzkumníků z Concordia University v Montrealu, který pracuje na vývoji termoplastické CFRP pro vyhodnocování mechanických vlastností ohýbaných výztuží použil normu CSA S806. Každý vzorek byl vyroben z výztuže o délce 3200 mm, která byla ohnuta na 4 místech pro vytvoření třmínku (viz Obrázek 38). Vyrobené třmínky byly vloženy do dvou

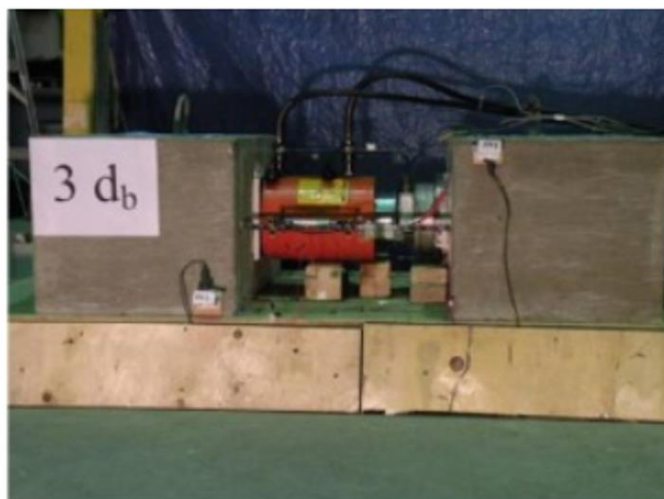
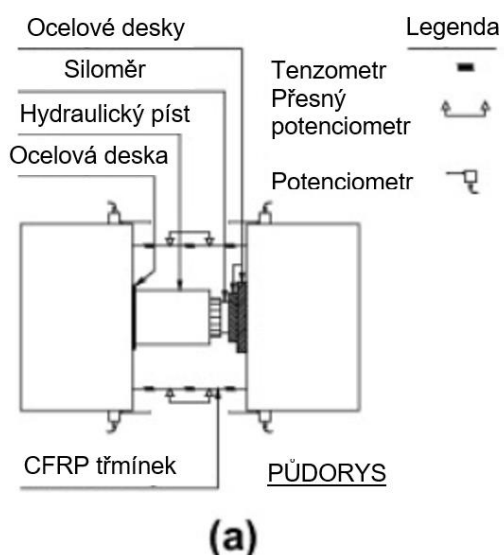
betonových kvádrů o rozměrech 450 mm x 750 mm x 400 mm. Pevnost betonu v tlaku po 28 dnech zrání byla 31 MPa. Betonové kvádry byly vyztuženy podélně a příčně, aby se předešlo poškození rozdrčením nebo rozštípnutím kvádrů. Mezi tyto kvádry byl umístěn hydraulický zvedák, který vyvozoval napětí vzájemným odtlačováním betonových kvádrů. Byly testovány 4 různé délky volného konce (3, 6, 9 a 12násobek průměru třmínku), přičemž průměr ohybu je zachován konstantní (4násobek průměru třmínku). Požadovaná kotevní délka byla dosažena vložením separační vrstvy z PVC trubek, vysokopevnostního silikonu a lepicí pásky. [15]



Obrázek 38 Geometrie testovaných CFRP třmínků [15]

Odhalené části třmínků byly velmi citlivé na poničení vlivem manipulace s betonovými kvádry. Pro manipulaci před samotnou zkouškou byl vzorek opatřen dřevěným rámem pro zamezení jakéhokoliv pohybu a kroucení třmínků.

Pro zatěžování byl použit hydraulický lis s únosností 1 500 kN umístěný mezi betonovými kvádry. Pro rozložení napětí byl mezi lis a povrch betonu vložen ocelový plech. Každý třmínek byl opatřen 6 tenzometry a 2 potenciometry s vysokou přesností. Dále byly osazeny 4 potenciometry na betonové kvádry pro měření relativního posunu kvádrů. Zatěžování pobíhalo postupně konstantní rychlostí až do porušení. [15]

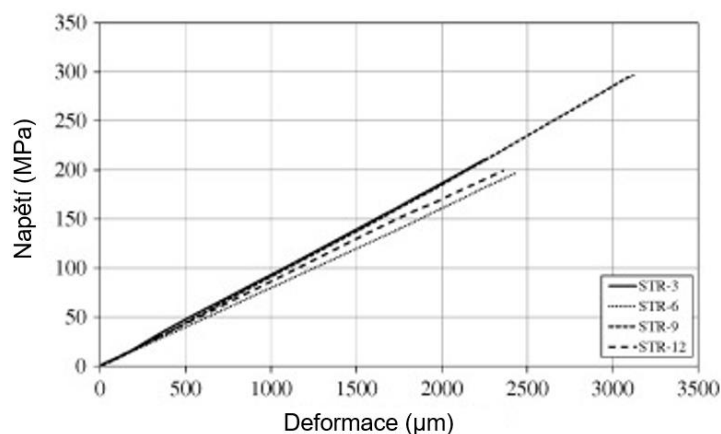


Obrázek 39 Uspořádání vzorků pro zkoušení ohýbaných výztuží dle CSA S806: a) schématický náčrt, b) reálné uspořádání [15]

Výsledky této zkoušky jsou shrnuty v následující tabulce a grafu. Všechny testované vzorky vykazovali lineární nárůst deformace až do porušení. Vzorky s délkou volného konce 3, 6 a 9násobku průměru se porušily v ohybu a vzorek s délkou volného konce 12násobku průměru se předčasně porušil podélným rozštípnutím. Pro porovnání byla stanovena pevnost v tahu přímých prutů 825 MPa. U vzorku s nejvyšší dosaženou pevností došlo k poklesu pevnosti ohybu na 37 % hodnoty pevnosti přímých prutů. Průměrný modul pružnosti byl stanoven na $91,1 \pm 5$ GPa. [15]

Tabulka 3 Výsledky testování pevnosti ohybu třmínek CFRP výztuže z termoplastické pryskyřice [15]

Označení vzorku	Délka volného konce [mm]	Mezní zatížení [kN]	Maximální pevnost [MPa]	Maximální přetvoření [$\cdot 10^{-3}$]	Modul pružnosti [GPa]	Poměr pevnosti ohybu ku přímým prutům
STR-3	38 (3 db)	27,7	219	2,265	94,5	0,27
STR-6	76 (6 db)	25,8	204	2,425	85,1	0,24
STR-9	114 (9 db)	38,8	306	3,120	96,4	0,37
STR-12	154 (12 db)	25,2	199	3,260	88,4	0,24

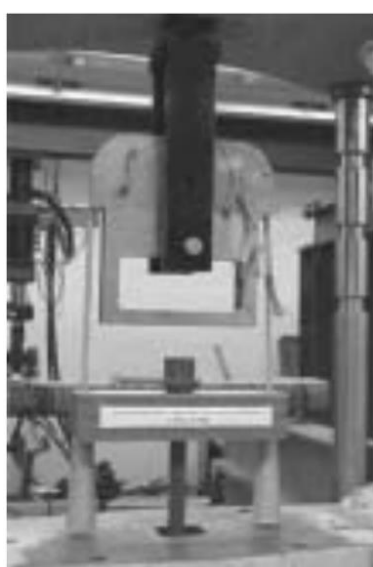


Graf 1 Lineární závislost napětí a deformace v průběhu testování pevnosti v ohybu CFRP třmínku [15]

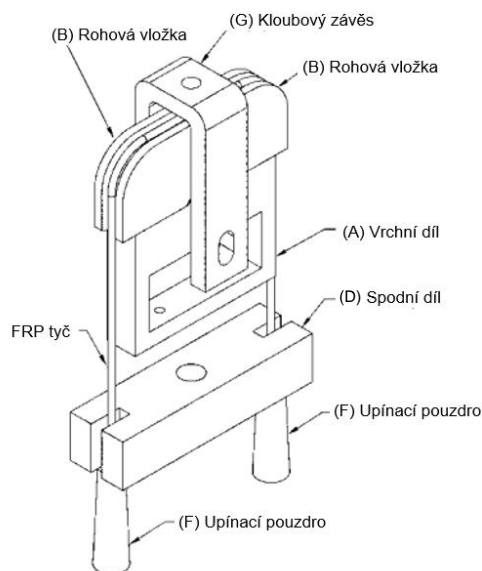
3.1.3 Účinek poloměru ohybu na pevnost v tahu výztuže

Touto problematikou se zabývá norma ACI 440.3R-12 v části B.12 Zkušební metoda pro určení účinku poloměru ohybu na pevnost v tahu FRP tyčí.

Testování se provádí působením tahového zatížení pomocí tříšlžkového zkušebního přípravku. Jedná se o horní část, dolní část a vyměnitelné rohové vložky z jakéhokoli vhodného kovu, jako je hliník nebo ocel. [40]



(a)



(b)

Obrázek 40 Konfigurace testování účinku poloměru ohybu na pevnost v tahu výztuže [40]

Vzorek FRP ve formě ohnuté tyče se umístí do drážky, která probíhá po stranách a horní části zkušebního přípravku a rohových vložek. Konce FRP vzorku jsou opatřeny kotvami, které přenáší zatěžovací sílu do dolní části zatěžovacího přípravku pro ukotvení. Přístrojové vybavení je připojeno v závislosti na sledovaných proměnných. Pokud je požadován modul pružnosti a průběh přetvoření, lze kolem rohových oblastí namontovat tenzometry. Zatížení se aplikuje až do selhání FRP vzorku, přičemž se očekává selhání v oblasti ohybů. Pro vyhodnocení je třeba minimálně 5 platných výsledků. [40]

Výpočet snížené pevnosti v tahu se provede dle následující rovnice a zaokrouhlí na 3 platné číslice:

$$S = \frac{P}{2A}$$

přičemž P je maximální zatěžovací síla při porušení [N],

A je plocha průřezu tyče [mm].

Modul pružnosti se vypočítá pomocí hodnot zatížení ΔP a přetvoření $\Delta \varepsilon$ odpovídajících 20 a 50 % snížené pevnosti v tahu S dle vzorce:

$$E_L = \frac{\Delta P}{2A\Delta \varepsilon}$$

3.2 Možnosti testování trvanlivosti

Pro stanovování trvanlivosti vůči agresivním prostředím se používají zrychlené zkoušky, které vystavují FRP výztuže extrémnějším podmínkám, než jsou běžné při aplikace v konstrukcích. Tím je dosaženo urychlení stárnutí a zkrácení testování. Druhou oblastí je stanovování vlivu dlouhodobého mechanického namáhání na vlastnosti FRP výztuží.

3.2.1 Zrychlená zkušební metoda pro odolnost FRP tyčí proti alkáliím

Pro zrychlené zkoušky odolnosti FRP materiálů vůči alkáliím se využívá norma řady ACI 440. Tato norma uvádí tři typy urychlených degračních zkoušek s nebo bez vlivu působícího zatížení:

- Metoda A – vzorek výztuže je po definované dobu ponořen do alkalického roztoku bez vlivu zatížení

- Metoda B – vzorek výztuže je po definovanou dobu ponořen do alkalického roztoku s působením tahového zatížení
- Metoda C – vzorek výztuže je po definovanou dobu obklopen vlhkým betonem s působením tahového zatížení

Alkalický roztok využívaný v metodě A dle ACI 440.3R část B.6 svým složením představuje pórovou vodu uvnitř betonu z portlandského cementu. Navrhované složení alkalického roztoku sestává ze 118,5 g Ca(OH)_2 , 0,9 g NaOH a 4,2 g KOH v 1 l deionizované vody. Roztok by měl mít hodnotu pH 12,6 až 13 – což je reprezentativní hodnota pH roztoku pórů zralého betonu. Alkalický roztok by měl být před a během testování zakryt, aby se zabránilo interakci s atmosférickým CO_2 a aby se zabránilo odpařování vody.

Vzorky by měly být ponořeny do alkalického roztoku při 60 ± 3 ° C po dobu expozice 1, 2, 3, 4 a 6 měsíců, pokud nejsou stanoveny delší doby expozice. Po stanovených časech by měly být vzorky odstraněny z alkalického roztoku, důkladně promyty deionizovanou vodou, osušeny ručníkem, zváženy a testovány na tah do selhání. [40]

3.2.2 Dlouhodobé mechanické vlastnosti FRP výztuží

Norma ACI 440.3R také uvádí několik zkušebních metod pro testování dlouhodobých mechanických vlastností FRP výztuží. Konkrétně se jedná o tyto části normy:

- Část B.7 – Metoda testování tahové únavy FRP tyčí;
- Část B.8 – Metoda testování selhání tečením FRP tyčí („creep test“);
- Část B.9 – Metoda testování dlouhodobé relaxace FRP tyčí. [40]

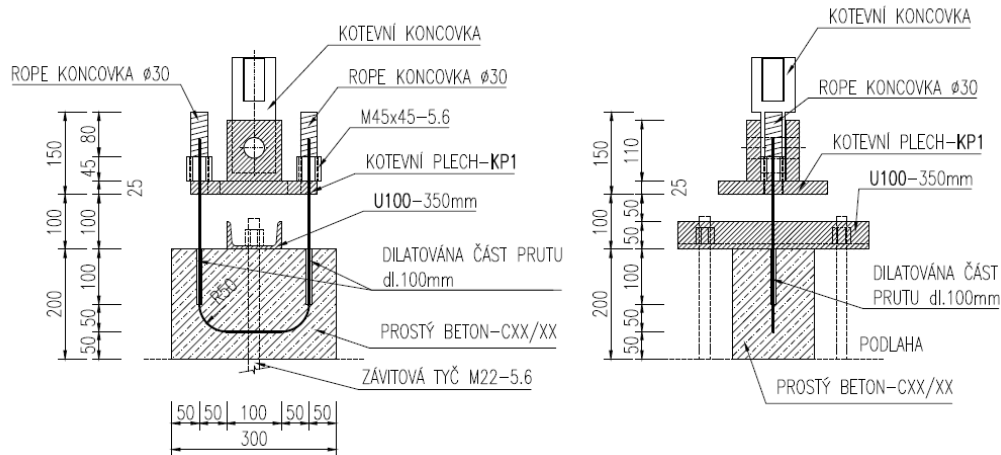
4 ETAPA II: Návrh testování mechanických vlastností ohýbaných FRP výztuží

4.1 Návrh konfigurace zkoušky

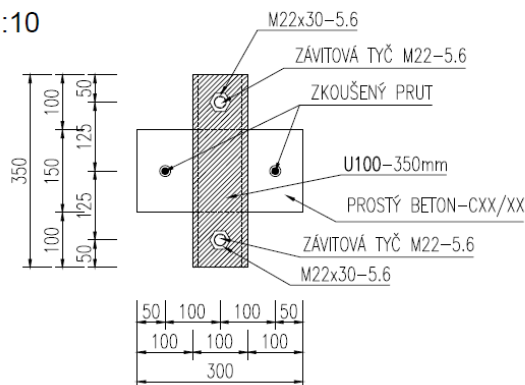
4.1.1 I. experiment – U-konfigurace

Navrhovaná konfigurace zkoušení pevnosti v tahu ohybu třmínku vychází z kombinace testovacích metod dle ACI 440.3R části B.5 a B.12. Při testování dle B.5 hrozí poškození vzorků při manipulaci, kdy může dojít ke kroutícímu namáhání či ohybu výztuží při různém pohybu dvou betonových bloků, ve kterých je třmínek zabetonován. Proto je navržena konfigurace, kde je část třmínku zabetonována pouze do jednoho betonového bloku a konce prutů jsou opatřeny kotvícími koncovkami pro upnutí do zatěžovacího zařízení. Betonový blok je poté přikotven pomocí ocelového profilu a závitových tyčí připevněných do kotvící dráhy umístěné pod úrovní podlahy. Zároveň je zvolen vysokopevnostní beton pro eliminaci ocelového vyztužování betonových bloků.

SCHÉMA ZKOUŠKY OHYBŮ POHLED M 1:10



PŮDORYS M 1:10



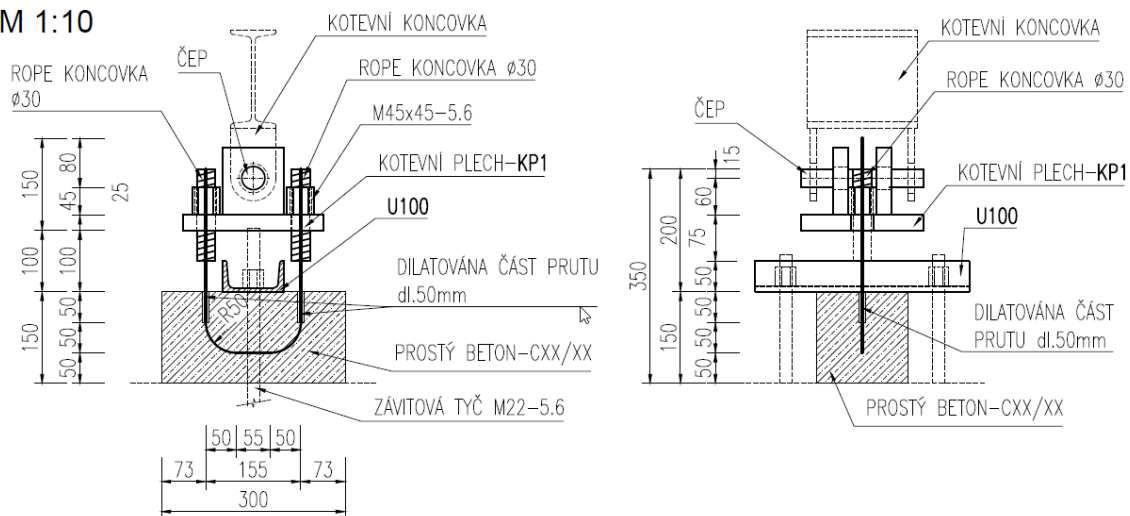
Obrázek 41 Schéma konfigurace I. experimentu

4.1.2 II. a III. experiment – U a L-konfigurace

Při I. experimentu byla úspěšně ověřena proveditelnost experimentu, avšak naměřené hodnoty vykazovaly poněkud vyšší rozptyl. Současné zatěžování obou prutů třmínku (U-konfigurace), které nejsou dokonale rovnoběžné způsobuje nerovnoměrné zatěžování každého z prutů. Proto byla pro další experimenty navržena druhá konfigurace zkoušky, kde je zabetonován a zatěžován pouze jeden z prutů třmínku (L-konfigurace). Zároveň je použitý menší rozměr třmínků a tomu je uzpůsoben i rozměr betonových bloků, které jsou taktéž zmenšeny.

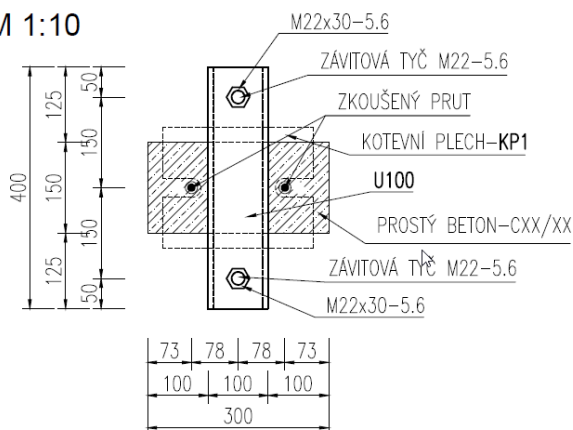
SCHÉMA ZKOUŠKY OHYBŮ TYPU U POHLED

M 1:10



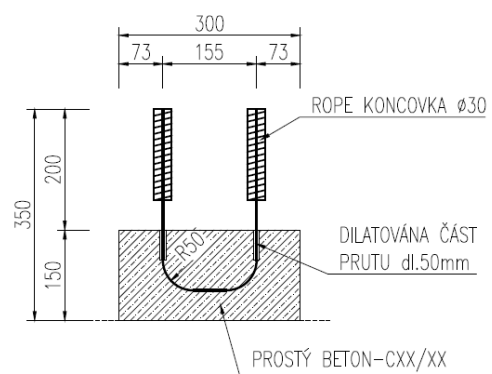
PŮDORYS

M 1:10



ZKOUŠENÝ PRVEK

M 1:10



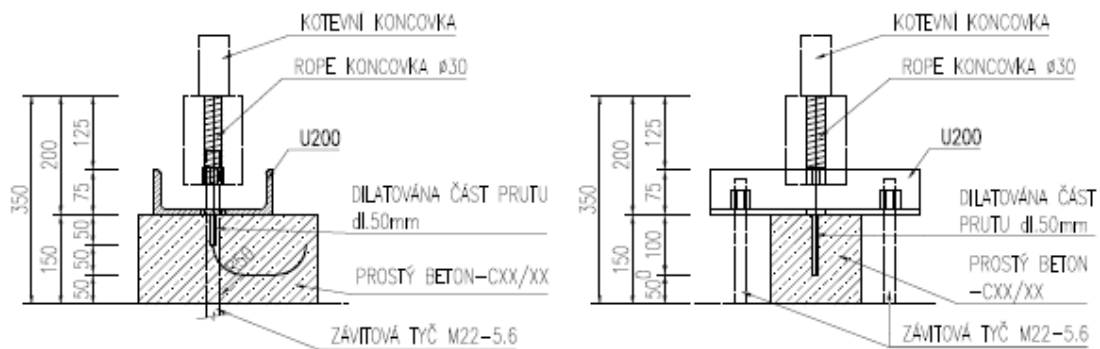
Obrázek 42 Schéma U-konfigurace II. a III. experimentu



Obrázek 43 Vzorek U-konfigurace před zkouškou

V I. experimentu byly použity vzorky vyrobené v jiné sérii než vzorky použité v dalších experimentech. Tyto vzorky dosahovaly nižších tahových pevností. V II. experimentu s tímto nebylo počítáno a kotevní délka upínacích koncovek nebyla dimenzovaná na vyšší pevnost. Z tohoto důvodu byla značná část vzorků při zatěžování porušena povytažením z kotevní koncovky, nikoliv v ohybu třmínků. Následně byl proveden III. experiment pro získání více relevantních dat. V tomto experimentu byla konfigurace zkoušek stejná jako při II. experimentu, pouze byla prodloužena kotevní délka upínacích koncovek. Vzorky ze II. a III. experimentu, které byly porušeny dle požadavku v ohybu třmínku, byly vyhodnoceny společně.

SCHÉMA ZKOUŠKY OHYBŮ TYPU L POHLED M 1:10



PŮDORYS M 1:10

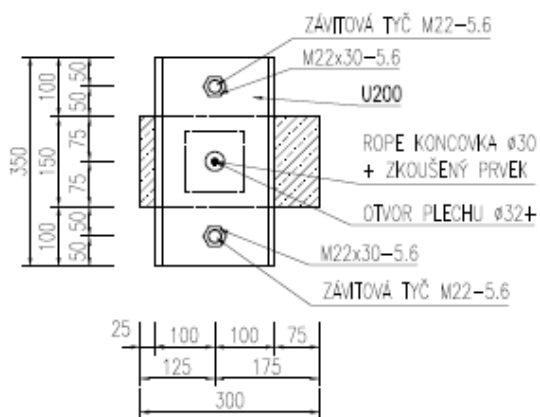
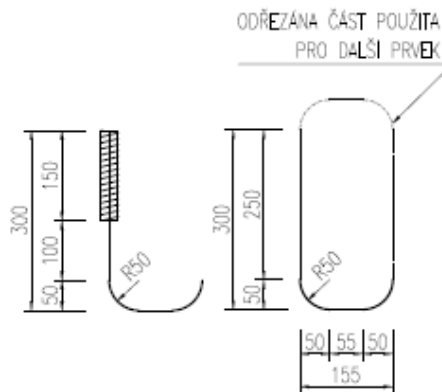


SCHÉMA VZORKU M 1:10



Obrázek 44 Schéma L-konfigurace II. a III. experimentu



Obrázek 45 Vzorek L-konfigurace před zkouškou

Po vyhodnocení obou konfigurací byla vybrána jako výhodnější L-konfigurace, která byla dále použita pro testování vzorků uložených v agresivních prostředích. Důvodem je dosažení přesnějších výsledků při zatěžování pouze jednoho prutu a také efektivnější a časově jednodušší příprava vzorků L-konfigurace. Nevýhodou této konfigurace zkoušky je nemožnost připevnění indukčních snímačů dráhy a chybí tedy záznam posunů pro výpočet modulu pružnosti.

4.2 Charakteristika betonu

V normách ACI 440.3R a CSA S806 je součástí betonových bloků ocelová výztuž, která má zabránit porušení betonu při zkoušení FRP výztuže. Pro zjednodušení přípravy vzorků byl zvolen vysokopevnostní beton C60/75, který nebylo nutno vyztužovat ocelí.

4.2.1 Vstupní suroviny

- **Cement**

Jako hlavní pojivo byl použit CEM I 42,5 R z výrobního závodu Mokrá (Českomoravský cement a.s.). Viz příloha č. 1.

- **Mikrosilika**

Druhou složkou pojiv byla mikrosilika od společnosti BASF Stavební hmoty Česká republika s.r.o.

- **Kamenivo**

Jako plnivo byly použity 3 frakce kameniva:

- 8-16 mm – hrubé drcené kamenivo Olbramovice,
- 4-8 mm – hrubé drcené kamenivo Polnička,
- 0-4 mm – drobné těžené prané kamenivo Žabčice.



Obrázek 46 Vzorky kameniva frakce 8-16, 4-8 a 0-4 mm

- **Plastifikační přísada**

Pro zachování nízkého vodního součinitele při vysokém obsahu jemných podílů a požadované zpracovatelnosti byla použita superplastifikační přísada Mapei Dynamon SF Advanced 36 (příloha č. 2) na bázi polykarboxylátů.

- **Voda**

Záměsová voda byla použita z vodovodního řadu města Brna a splňuje požadavky normy ČSN EN 1008.

4.2.2 Vlastnosti betonu

- **Sednutí kužele** (ČSN EN 12350-2 Zkouška čerstvého betonu – Zkouška sednutím) [42]

Tabulka 4 Klasifikace podle sednutí kužele [42]

	Stupeň	Sednutí [mm]
S1	směs tuhá	10–40
S2	směs plastická	50–90
S3	směs měkká	100–150
S4	směs velmi měkká	160–210
S5	směs tekutá	≥ 220



Obrázek 47 Zkouška sednutí kužele

Vyhodnocení:

$h(S) = 70 \text{ mm}$

Na základě zkoušky sednutím kužele byla stanovena konzistence čerstvého betonu **S2 – plastická směs**.

- **Objemová hmotnost čerstvého betonu** (ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu Část 6: Objemová hmotnost) [43]

Tabulka 5 Naměřené a vypočítané hodnoty pro stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu

Označení vzorku	Objem formy [m ³]	Hmotnost ČB [kg]	Objemová hmotnost ČB [kg/m ³]	Průměrná objemová hmotnost ČB [kg/m ³]
III/1	0,003375	8,1254	2410	2410
III/2		8,0399	2380	
III/3		8,1036	2400	
IV/1		8,1545	2420	
IV/2		8,1557	2420	
IV/3		8,1462	2410	

- **Objemová hmotnost zatvrdlého betonu** (ČSN EN 12350-7 Zkoušení ztvrdlého betonu Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu) [44]

Tabulka 6 Naměřené a vypočítané hodnoty pro stanovení objemové hmotnosti zatvrdlého betonu

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]			Hmotnost ZB [kg]	Objemová hmotnost ZB [kg/m ³]	Průměrná objemová hmotnost ZB [kg/m ³]
	l	b	h			
III/1	149,8	149,7	148,6	7,975	2390	2400
III/2	149,7	149,7	149,7	8,048	2400	
III/3	149,8	149,8	149,3	8,056	2410	
IV/1	149,9	149,9	150,3	8,139	2410	
IV/2	149,9	150	149,8	8,13	2410	

- **Pevnost v tlaku** (ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles) [45]

Tabulka 7 Naměřené a vypočítané hodnoty pro stanovení pevnosti v tlaku po 6 dnech

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]			Zatížení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]
	l	b	h			
III/1	149,8	149,7	148,6	1760	79,1	80,5
III/2	149,7	149,7	149,7	1809	80,7	
III/3	149,8	149,8	149,3	1719	76,9	
IV/1	149,9	149,9	150,3	1854	82,3	
IV/2	149,9	150	149,8	1877	83,5	

- **Pevnost v příčném tahu** (ČSN EN 12390-6 Zkoušení ztvrdlého betonu Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles) [46]

Tabulka 8 Naměřené a vypočítané hodnoty pro stanovení pevnosti v příčném tahu po 6 dnech

Označení vzorku	Rozměry vzorku [mm]		Zatížení [kN]	Pevnost v příčném tahu	Průměrná pevnost v příčném tahu
	d	L		[MPa]	[MPa]
III/4	149,8	149,7	149,5	4,25	4,90
III/5	149,7	149,8	150,5	4,25	
III/6	149,8	149,8	165	4,70	
IV/1	149,8	149,8	215,1	6,10	
IV/2	149,8	149,7	179,4	5,10	

4.3 Charakteristika vzorků GFRP

Pro sledování trvanlivosti ohýbaných GFRP prvků byly ve firmě Prefa Kompozity a.s. vyrobeny vzorky třmínků a přímých prutů pro srovnání.

Informace o testovaných GFRP výztužích:

- Vlákna: E-CR sklo (R25H 2400, výrobce 3B, přibližně 80 % hmotnosti)
- Pryskyřice: Epoxid (20 % hmotnosti)
- Povrchová úprava: křemičité opískování + nylonový ovin.
- Průměr jádra: 10 mm



Obrázek 48 Vzorky GFRP před uložením do agresivních prostředí

Přímé pruty, které byly testovány pro porovnání poklesu tahové pevnosti ohybu třmínků, byly vyrobeny standartně na pultruzní lince. Výroba třmínků probíhala ručně z pultrudovaných přímých prutů, které byly po částečném vytvrzení (při snížené teplotě v pecích) navíjeny na formu ve tvaru třmínků. Tato forma byla kontinuálně posouvána ve směru kolmém na směr navíjení a vznikala tak „nekonečná spirála“ třmínků. Následně byla navinutá spirála vytvrzena a z ní byly nařezány jednotlivé třmínky. Díky tomuto technologickému postupu nebyly pruty třmínků dokonale rovnoběžné.

4.4 Vyhodnocení mechanických vlastností testovaných navrženou metodou

Princip vyhodnocování je stejný jako u výše popisovaných zkoušek dle norem ASTM D 7205 a ACI 440.3R. Statistické vyhodnocení vždy uvažovalo minimálně se 3 platnými hodnotami, aby bylo možno vyhodnotit daný soubor.

Střední hodnota je uvažována jako aritmetický průměr \bar{x} .

Směrodatná odchylka S_x je poté vypočtena pomocí vzorce:

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum (x_i - m_x)^2$$

kde: n – počet prvků,

x_i – i -tá hodnota náhodného výběru,

m_x – průměr z n výsledků náhodného výběru.

Variační koeficient V_x je vypočten jako podíl směrodatné odchylky a aritmetického průměru.

5% kvantil se jakožto charakteristická hodnota X_k vypočítá:

$$X_k = \eta_d \cdot m_x (1 - k_n V_x)$$

kde: η_d – návrhová hodnota součinitele konverze (uvažován =1,0),

m_x – průměr z n výsledků náhodného výběru,

k_n – koeficient kvantilu charakteristické hodnoty, viz. tabulka pro 5% kvantil (Tabulka 9)

Tabulka 9 Koeficient 5% kvantilu charakteristické hodnoty pro normální rozdělení

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
S_x známá	2,31	2,01	1,89	1,83	1,8	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,6449
S_x neznámá	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,6449

5% kvantil bez vlivu počtu vzorků uvažuje $k_n = 1,6449$ a 5% kvantil počítaný dle normy EN 1990 (Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí) uvažuje k_n dle počtu vzorků daného souboru při neznámém variačním koeficientu.

4.4.1 I. sada – referenční (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C),
U – konfigurace

Jednalo se o prvotní testování, které mělo prokázat proveditelnosti navrženého zkoušení 5 vzorků U-konfigurace.

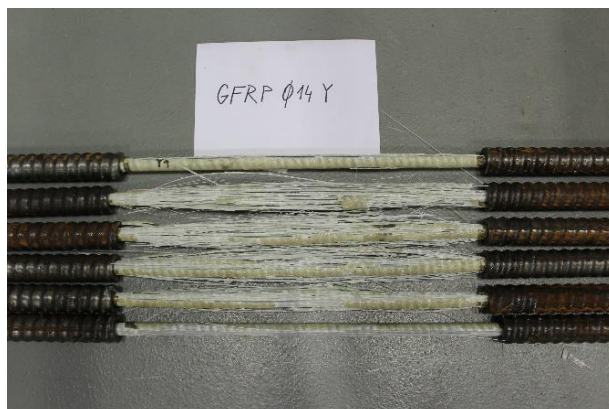
4.4.1.1 Pevnost v tahu přímých prutů

Tabulka 10 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů –
I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C)

Typ vzorku	I. sada: referenční (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C)					
Označení vzorku	GFRP_1 4_Y1	GFRP_1 4_Y2	GFRP_1 4_Y3	GFRP_1 4_Y4	GFRP_1 4_Y5	GFRP_1 4_Y6
Průměr [mm]	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
Teoretická plocha [mm ²]	153,94	153,94	153,94	153,94	153,94	153,94
Maximální dosažená síla [kN]	144,48	131,84	148,96	147,08	149,27	146,61
Rychlost zatěžování [mm/min]	3,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Doba trvání zkoušky [min]	06:37	04:30	04:54	04:37	04:52	04:53
Maximální tahová pevnost [MPa]	938,56	856,45	967,66	955,45	969,68	-
Střední tahová pevnost [MPa]	938					
Směrodatná odchylka [MPa]	47,00					
Variační koeficient [-]	0,05					
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	-	48,02	48,45	47,05	46,08	45,78
Střední hodnota modulu pružnosti [GPa]	47,1					
Směrodatná odchylka [MPa]	1,17					
Variační koeficient [-]	0,02					

Pozn. - hodnoty lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty celé skupiny testovaných vzorků vyřazeny z vyhodnocení

- překročena limitní hodnota (v případě doby trvání zatěžovací zkoušky je limit 5:00 minut)



Obrázek 49 Vzorky po zkoušce pevnosti přímých prutů v tahu – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C),

4.4.1.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí

Tabulka 11 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace

Typ vzorku	I. sada – referenční (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace				
Označení vzorku	U_FRP-1	U_FRP-2	U_FRP-3	U_FRP-4	U_FRP-5
Průměr [mm]	10 + 10	10 + 10	10 + 10	10 + 10	10 + 10
Teoretická plocha [mm ²]	157,08	157,08	157,08	157,08	157,08
Maximální dosažená síla [kN]	57,52	60,71	38,22	77,92	45,37
Doba trvání zkoušky [min]	01:41	02:47	01:38	02:10	01:05
Rychlost zatěžování [kN/min]	20,40	16,33	15,51	20,03	21,44
Rychlost zatěžování [mm/min]	4,00	3,94	4,09	3,99	3,85
Posun levého prutu [mm]	0,69	0,66	0,70	2,37	0,62
Posun pravého prutu [mm]	3,15	4,62	2,41	0,91	0,86
Rozdíl posunů prutů [mm]	2,46	3,95	1,71	1,46	0,24
Průměrný posun [mm]	1,92	2,64	1,55	1,64	0,74
Maximální tahová pevnost [MPa]	366,18	386,49	243,32	496,05	288,83
Střední tahová pevnost [MPa]	356				
Směrodatná odchylka [MPa]	97,28				
Variační koeficient [-]	0,27				
5% kvantil (bez vlivu počtu vzorků) [MPa]	196,15				
5% kvantil (dle EN 1990) [MPa]	129,50				
Střední tahová pevnost přímých prutů [MPa]	938				
Podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	39,06	41,22	25,95	52,91	30,81
Průměrný podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	40				
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	26,12	18,84	22,76	47,07	75,57
Střední hodnota modulu pružnosti [GPa]	38,1				
Směrodatná odchylka [MPa]	23,63				
Variační koeficient [-]	0,62				
5% kvantil (bez vlivu počtu vzorků) [MPa]	-0,80				
5% kvantil (dle EN 1990) [MPa]	-16,99				
Střední hodnota modulu pružnosti přímých prutů [GPa]	47,1				
Podíl modulu pružnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	55,50	40,02	48,36	100,01	160,54
Průměrný podíl modulu pružnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	100				

Pozn.: hodnoty lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty celé skupiny testovaných vzorků

nelze vyhodnotit – nedostatečný počet prvků vyhovujících kritériu pro vyhodnocení skupiny vzorků (pouze orientační hodnoty)



Obrázek 50 Vzorky po zkoušce pevnosti v tahu ohýbaných částí – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace

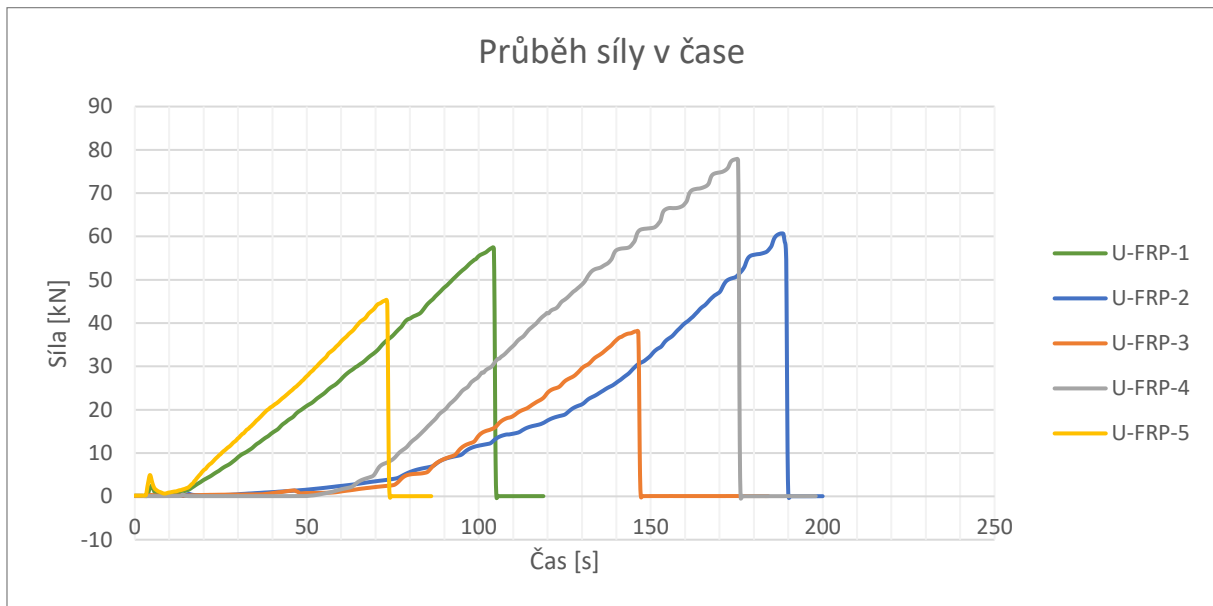
Tabulka 12 Popis porušení zkoušených vzorků – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace

Označení vzorku	Porušený prut	Popis porušení
U_FRP-1	pravý	porušení na začátku ohybu
U_FRP-2	pravý	porušení na začátku ohybu
U_FRP-3	pravý	porušení na začátku ohybu
U_FRP-4	levý	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části
U_FRP-5	pravý	porušení na začátku ohybu

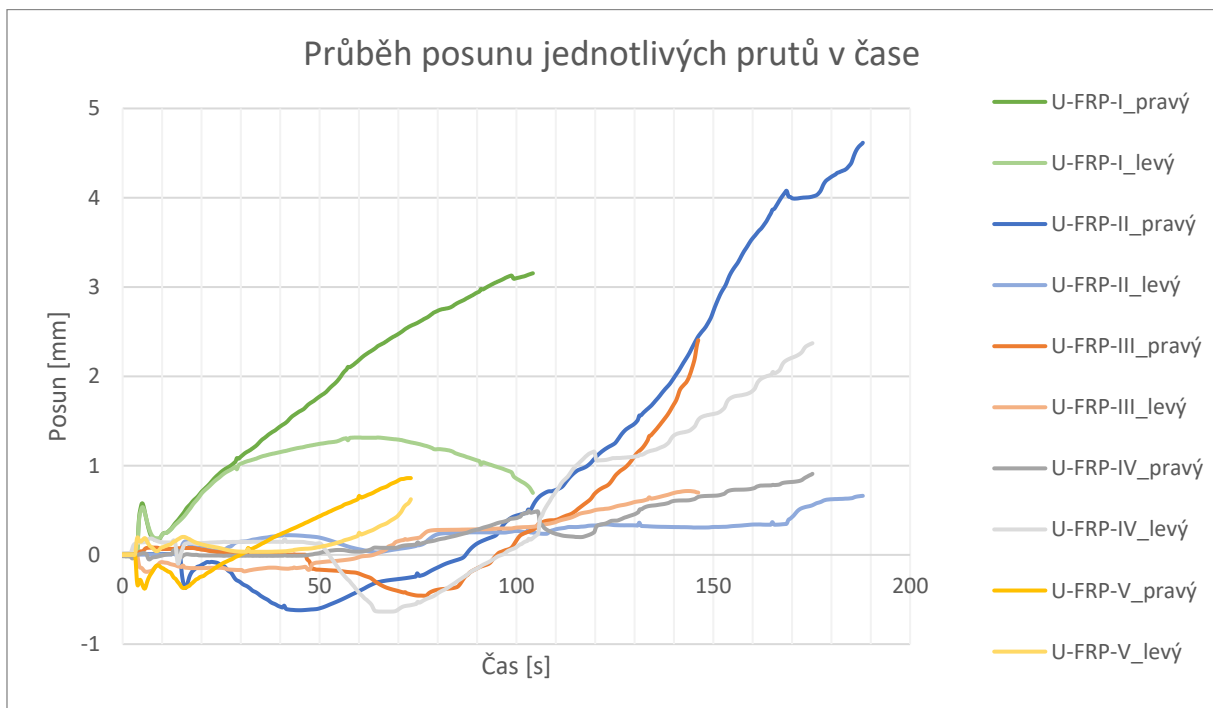


Obrázek 51 Typické porušení na začátku ohybu (vlevo), delaminace přímé části prutu u vzorku U_FRP-4 (vpravo)

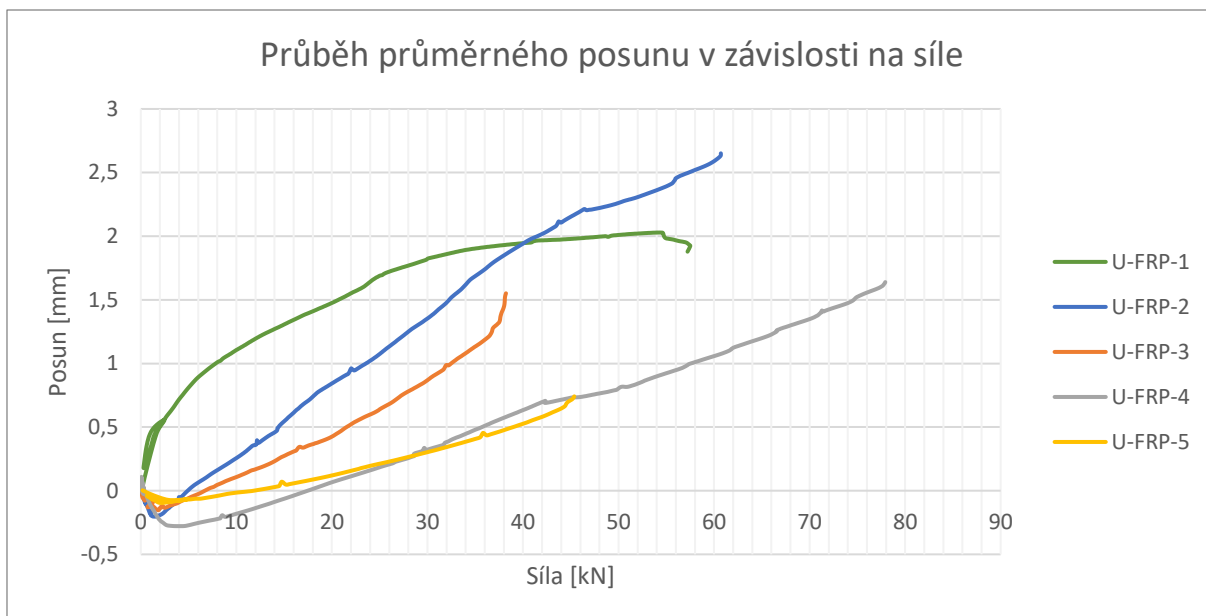
4.4.1.3 Grafy průběhu zatěžování I. experimentu



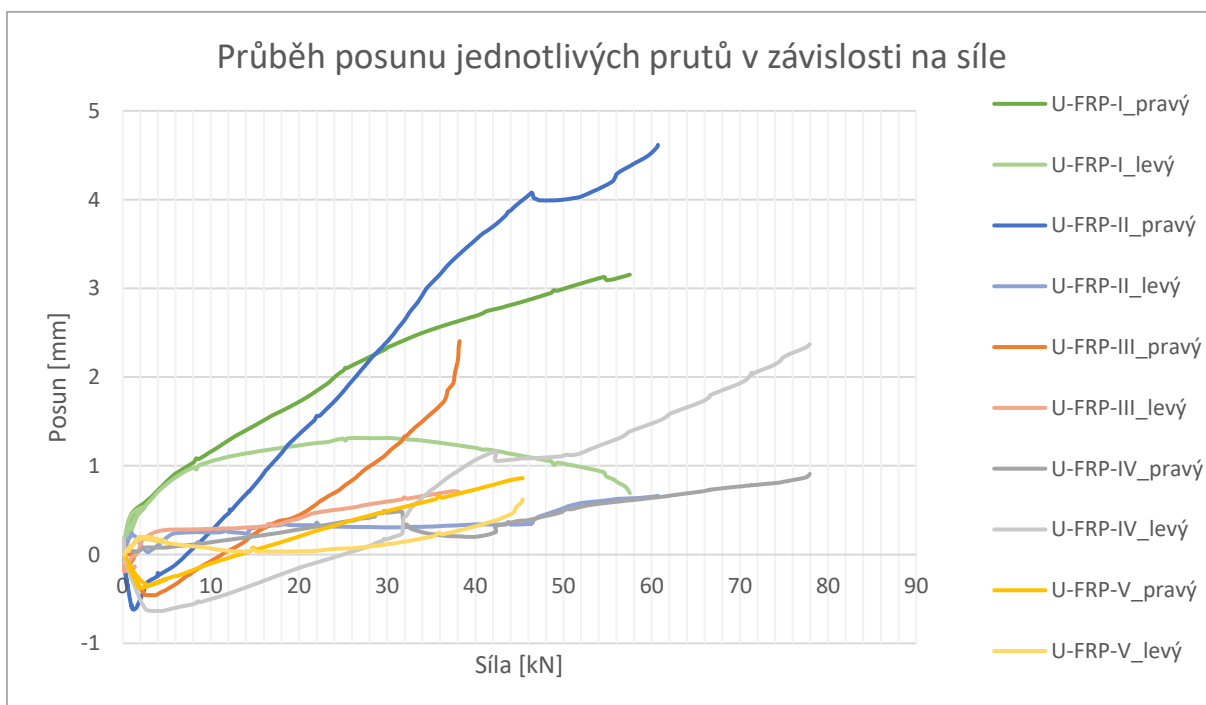
Graf 2 Průběh síly v závislosti na čase – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace



Graf 3 Průběh posunu jednotlivých prutů v závislosti na čase – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace



Graf 4 Průběh průměrného posunu v závislosti na síle – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace



Graf 5 Průběh posunu jednotlivých prutů v závislosti na síle – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace

4.4.2 II. sada – referenční (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), L + U – konfigurace, neúspěšné zkoušení

Po prvotním ověření proveditelnosti navržené zkoušky byla U-konfigurace mírně upravena a ve II. sadě zkoušených vzorků byla přidána též L-konfigurace. Bylo testováno 5 vzorků s využitím U-konfigurace a 5 vzorků pomocí L-konfigurace.

Při zkoušení II. sady referenčních vzorků došlo u některých vzorků k selhání v upínací koncovce, kde nastal prokluz výztuže. Důvodem bylo dodání nových zkušebních vzorků, které byly vyrobeny v jiné sérii než zkušební vzorky použité pro I. sadu referenčního testování. Nová série vykazovala vyšší pevnosti v tahu než vzorky použité při zkouškách I. sady vzorků a byla použita pro další testování.



Obrázek 52 Selhání vzorků prokluzem výztuže v upínací koncovce

Naměřené hodnoty, které nemají vypovídací hodnotu, zde nebudou uvedeny. Zkouška byla opakována se III. sadou referenčních vzorků s prodlouženou kotevní délkou upínacích koncovek, aby se předešlo selhání prokluzem. Vzorky ze II. sady, které se porušily v ohybu, budou vyhodnoceny společně se III. sadou.

4.4.3 III. sada – referenční (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C),
L + U – konfigurace

Jednalo se o opakování předchozí zkoušky (II. sady) pro doplnění platných výsledků zkoušky.
Byly testovány 2 vzorky U-konfigurace a 3 vzorky L-konfigurace.

4.4.3.1 Pevnost v tahu přímých prutů

*Tabulka 13 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů –
II. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C)*

Typ vzorku	II. sada: referenční (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C)					
Označení vzorku	1. GFRP 10	2. GFRP 10	3. GFRP 10	4. GFRP 10	5. GFRP 10	6. GFRP 10
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	110,16	107,83	105,35	108,05	102,40	105,72
Rychlost zatěžování [mm/min]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Doba trvání zkoušky [min]	04:28	04:53	04:48	04:17	03:44	04:25
Maximální tahová pevnost [MPa]	1402,60	1372,93	1341,36	1375,74	Porušení v koncevce	1346,07
Střední tahová pevnost [MPa]	1368					
Směrodatná odchylka [MPa]	24,86					
Variační koeficient [-]	0,02					
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	52,68	52,70	52,80	53,06	52,36	52,05
Střední hodnota modulu pružnosti [GPa]	52,6					
Směrodatná odchylka [MPa]	0,39					
Variační koeficient [-]	0,01					

Pozn.: - hodnoty lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty celé skupiny testovaných vzorků vyřazeny z vyhodnocení

4.4.3.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí

Tabulka 14 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí – II. a III. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U + L-konfigurace

Typ vzorku	II. a III. sada – referenční (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U+L-konfigurace						
Označení vzorku	U_FRP-1 (III.exp.)	U_FRP-2 (III.exp.)	U_FRP-2 (II.exp.)	U_FRP-3 (II.exp.)	L_FRP-1 (III.exp.)	L_FRP-2 (III.exp.)	L_FRP-3 (III.exp.)
Průměr [mm]	10+10	10+10	10+10	10+10	10	10	10
Teoretická plocha [mm ²]	157,08	157,08	157,08	157,08	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	96,02	94,12	85,42	94,86	57,95	64,44	52,77
Doba trvání zkoušky [min]	02:33	02:33	03:54	02:40	-		
Rychlost zatěžování [kN/min]	47,88	50,08	29,57	36,76	-		
Rychlost zatěžování [mm/min]	3,98	3,99	0,94	2,96	4,00	4,00	4,00
Posun levého prutu [mm]	0,21	1,35	0,67	3,13	-		
Posun pravého prutu [mm]	2,70	4,30	3,56	2,45	-		
Rozdíl posunů prutů [mm]	2,49	2,96	2,90	0,68	-		
Průměrný posun [mm]	1,45	2,82	2,12	2,79	-		
Porušený prut	pravý	pravý	pravý	levý	-		
Maximální tahová pevnost [MPa]	611,28	599,19	543,80	603,90	737,84	820,48	671,89
Střední tahová pevnost [MPa]	590				705		
Směrodatná odchylka [MPa]	30,90				46,64		
Variační koeficient [-]	0,05				0,07		
5% kvantil (bez vlivu počtu vzorků) [MPa]	589,54				628,15		
5% kvantil (dle EN 1990) [MPa]	508,28				-		
Střední tahová pevnost přímých prutů [MPa]	1368				1368		
Podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	44,69	43,81	39,76	44,15	53,95	59,99	49,12
Průměrný podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	43				52		

Pozn.: hodnoty lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty celé skupiny testovaných vzorků vyřazeny z vyhodnocení

nelze vyhodnotit – nedostatečný počet prvků vyhovujících kritériu pro vyhodnocení skupiny vzorků (pouze orientační hodnoty)

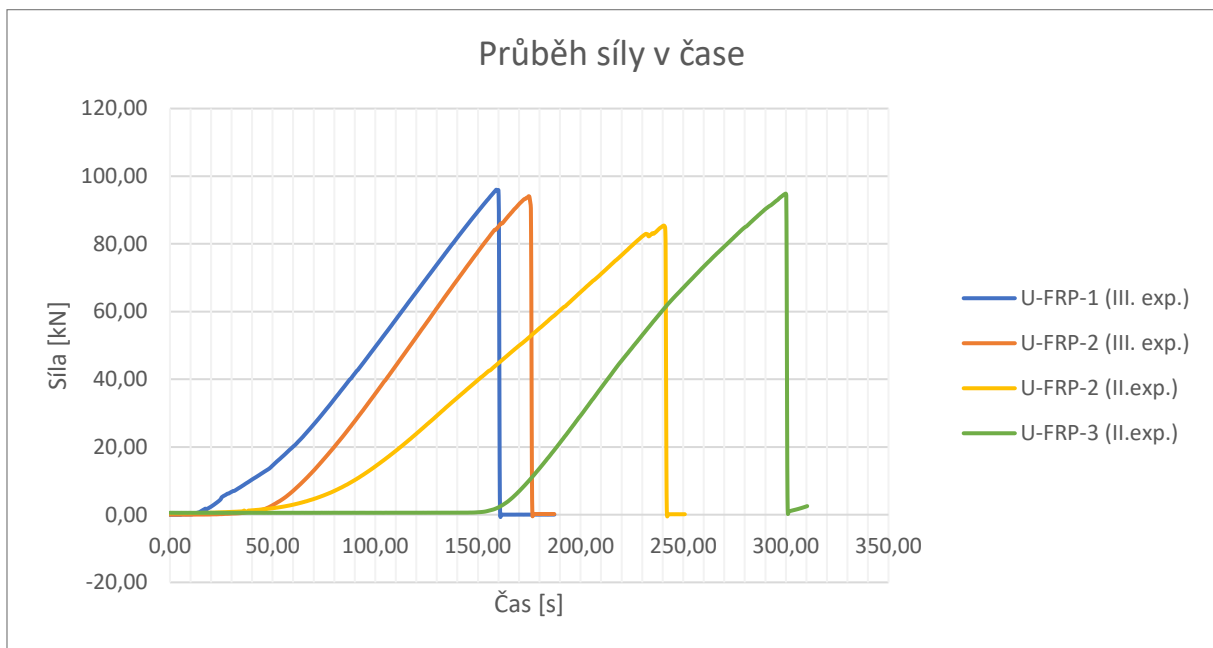
Tabulka 15 Popis porušení zkoušených vzorků – II. a III. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U + L-konfigurace

Označení vzorku	Porušený prut	Popis porušení
U_FRP-1 (III. exp.)	pravý	porušení na začátku ohybu + částečná delaminace v přímé části
U_FRP-2 (III. exp.)	pravý	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části (částečné porušení pravého prutu již při 90 % maximální síly, což se v grafu projevilo na posuvu levého prutu – viz Graf 9)
U_FRP-2 (II. exp.)	pravý	porušení na začátku ohybu + částečná delaminace v přímé části
U_FRP-3 (II. exp.)	levý	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části
L_FRP-1 (III. exp.)	-	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části
L_FRP-2 (III. exp.)	-	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části
L_FRP-3 (III. exp.)	-	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části, došlo k prokluzu v koncovce

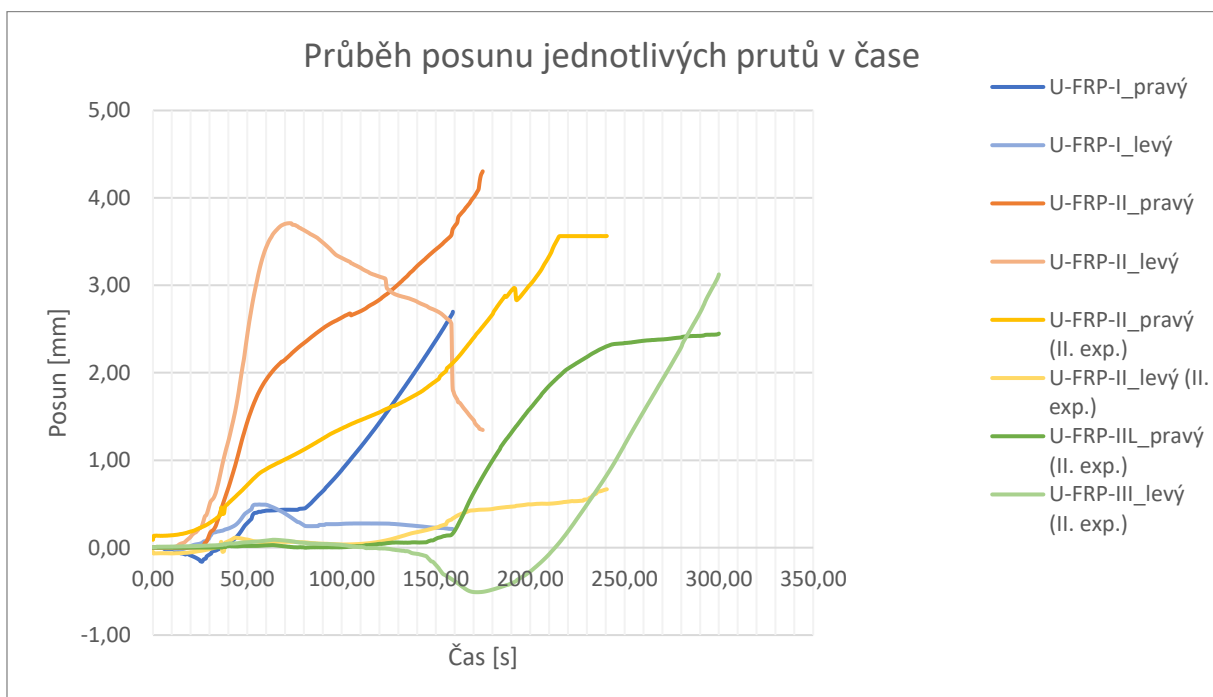


Obrázek 53 Typické porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části u vzorku U-konfigurace (vlevo) a L-konfigurace (vpravo)

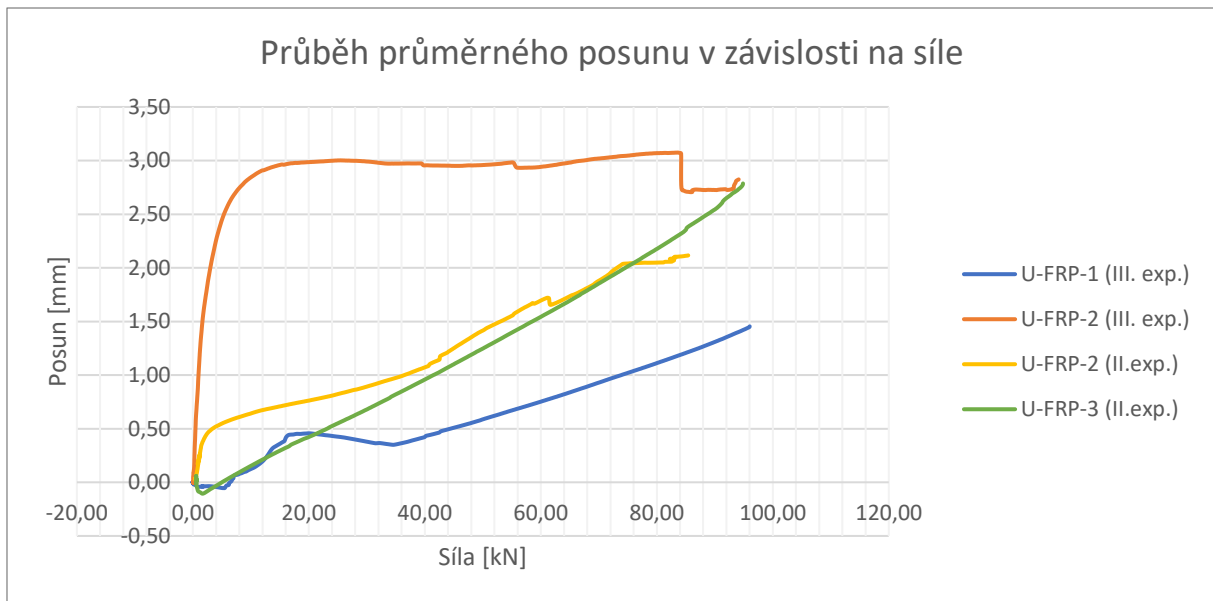
4.4.3.3 Grafy průběhu zatěžování II. + III. experimentu



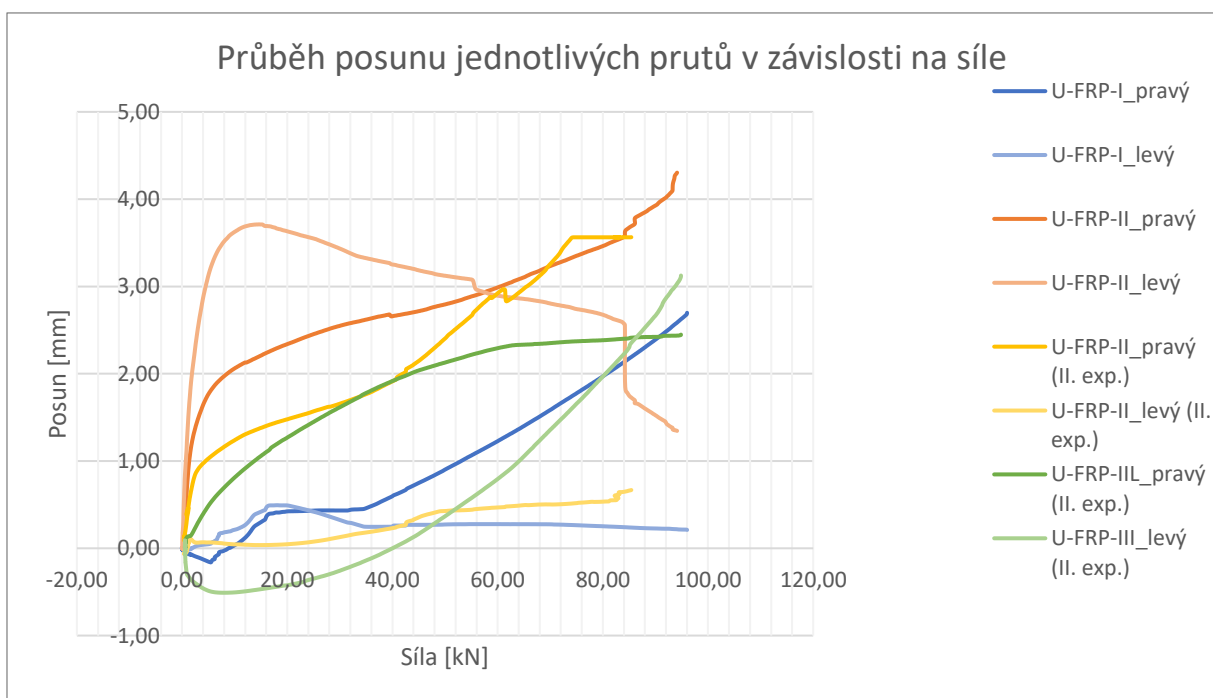
Graf 6 Průběh síly v závislosti na čase – II. a III. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace



Graf 7 Průběh posunu jednotlivých prutů v závislosti na čase – II. a III. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace



Graf 8 Průběh průměrného posunu v závislosti na síle – II. a III. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace



Graf 9 Průběh posunu jednotlivých prutů v závislosti na síle – II. a III. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace

4.4.4 Shrnutí poznatků II. etapy

V I. sadě byly vyrobeny vzorky U-konfigurace a byla testována proveditelnost navržené zkoušky. Ta byly úspěšně prokázána, nicméně mezi jednotlivými hodnotami byl velký rozptyl a nebylo možné je statisticky vyhodnotit.

V II. sadě byla pro porovnání připojena L-konfigurace, nicméně kvůli změně vlastností nově dodané výztuže došlo v několika případech k porušení vzorků v upínacích koncovkách. Tyto naměřené hodnoty nebyly použitelné, a proto se pro doplnění testovala III. sada.

Ve III. sadě byly opět testovány vzorky U a L-konfigurace a byly vyhodnoceny společně s použitelnými daty ze II. sady.

Grafy průběhů zatěžování vzorků U-konfigurací zobrazují nerovnoměrnost zatěžování jednotlivých prutů. U některých prutů dokonce docházelo k namáhání tlakem. Drobné vlnky a skoky na křivkách zobrazují postupné selhávání vláken FRP výztuže.

Pro U-konfiguraci byla vyhodnocena referenční pevnost v tahu ohýbané části 590 ± 31 MPa. U L-konfigurace byla vyhodnocena tato pevnost 705 ± 47 MPa (zde se jedna z hodnot lišila o 10,4 % od průměrné hodnoty a její vyřazení uměle snížilo střední hodnotu pevnosti). Rozdíl výsledných pevností je dán právě testovací konfigurací. Testované třmínky neměly dokonale rovnoběžné pruty a při U-konfiguraci se to projevilo nerovnoměrným zatěžováním prutů. Tento jev se odráží v grafech průběhu zatěžování, kdy u každého z prutů dochází k různému posuvu v čase. Jeden z prutů vždy selhal dříve, a proto se výsledná pevnost po rozpočítání na plochu obou prutů jeví nižší než u L-konfigurace. Právě z důvodu různého zatěžování, a tedy i různého posuvu jednotlivých prutů není u U-konfigurace relevantní výsledek modulu pružnosti. Modul pružnosti by mohl být stanoven u L-konfigurace, ale použitá konfigurace neumožňovala osazení výztuže indukčním snímačem dráhy posuvu použitého u U-konfigurace. Je zde tedy prostor pro inovaci, například použitím tenzometrů, které se připevňují přímo na tělo výztuže a dochází tak k zatížení menší chybou. Pro jednoznačnější vyhodnocování a jednodušší přípravu vzorků byla pro další testování zvolena L-konfigurace.

Pro porovnání poklesu tahové pevnosti ohybem byla stanovena pevnost v tahu přímých prutů 1368 ± 25 MPa. Střední tahová pevnost ohýbaného prvku testovaného při L-konfiguraci tedy poklesla na 52 % střední tahové pevnosti přímých prutů.

5 ETAPA III: Sledování trvanlivosti ohýbaných FRP výztuží

5.1 Návrh a příprava agresivních prostředí

Pro sledování trvanlivosti ohýbaných GFRP výztuží byly připraveny 3 typy agresivních prostředí:

- H₂O při laboratorní teplotě 20 °C
- Alkalický roztok dle ACI 440.3R při laboratorní teplotě 20 °C
- Alkalický roztok dle ACI 440.3R při laboratorní teplotě 40 °C

Alkalický roztok dle ACI 440.3R část B.6 svým složením představoval pórovou vodu uvnitř betonu z portlandského cementu. Pro naložení vzorků byly použity velkokapacitní boxy (délka 100 cm x šířka 65 cm) s uvažovanou výškou hladiny alkalického roztoku 30 cm. Objem, na který bylo vypočteno množství jednotlivých surovin, tedy činil 195 l. Navrhované složení alkalického roztoku sestávalo ze:

Tabulka 16 Výpočet složení alkalického roztoku dle ACI 440.3R

Složka	Množství na 1 l [g]	Množství na 195 l [kg]
Ca(OH) ₂	118,5	23,108
NaOH	0,9	0,178
KOH	4,2	0,819

V průběhu expozice bylo několikrát měřeno pH alkalických roztoků. Hodnoty se pohybovaly dle požadavků ACI 440.3R část B.6 v rozmezí 12,6 – 13. Boxy s agresivními prostředími byly během testování zakryty, aby se zabránilo odpařování a interakci s atmosférickým CO₂.

Vzorky byly ponořeny do vody a alkalického roztoku při laboratorní teplotě 20 °C a zvýšené teplotě 40 ± 1 °C po dobu expozice 30 dnů a 1000 hodin. Po stanovených časech byly vzorky z alkalického roztoku vyjmuty, důkladně omyty vodou, osušeny a použity pro další testování.



Obrázek 54 Vyjmuté a opláchnuté vzorky po 30 dnech v agresivním prostředí

5.2 Testování mechanických vlastností

Vzorky FRP výztuží byly po expozici 30 dní a 1000 hodin vyjmuty z agresivních prostředí a mechanicky testovány. Na přímých prutech byla pro srovnání stanovena pevnost v tahu dle ASTM D7205. Na ohýbaných vzorcích byla stanovena pevnost ohybu v tahu navrženou metodou, konkrétně její L-konfigurací.



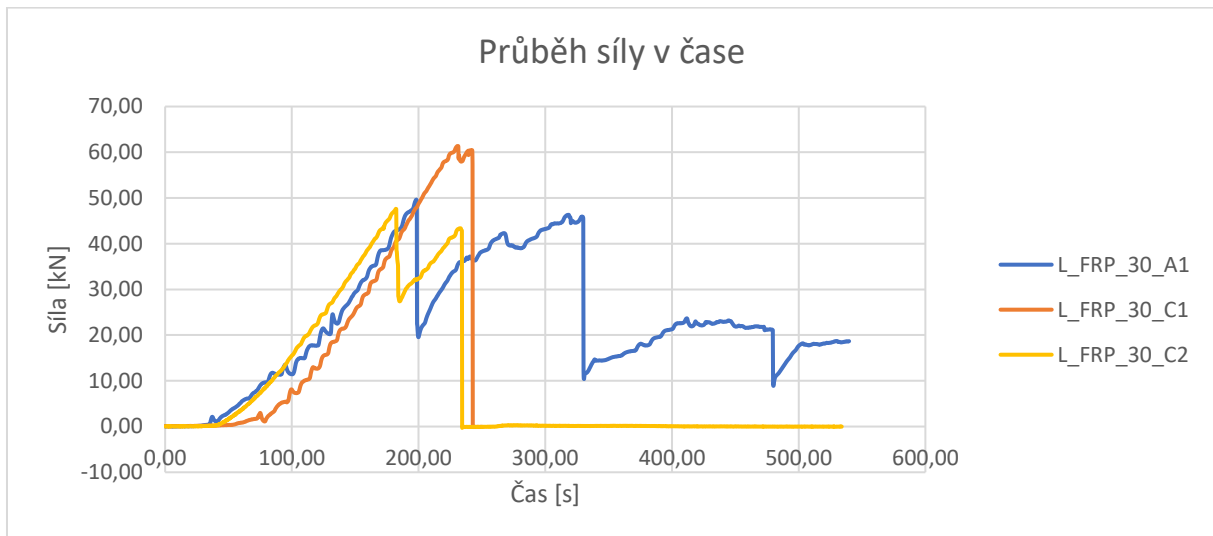
Obrázek 55 Porušení vzorku vyčerpáním tahové únosnosti betonu

Při prvních testech vzorků po 30denní expozici docházelo při zatěžování FRP výztuží k předčasnému vyčerpání tahové únosnosti betonu a vzorky se porušovaly nesprávně (Obrázek 55). Tento jev byl způsoben nižší výškou zkušebních betonových vzorků (Obrázek 56).



Obrázek 56 Porovnání výšky vzorku po 30denní expozici (vlevo) se vzorkem z předešlé sady (vpravo)

Testování bylo pozastaveno a na základě záznamu průběhu zatěžování chybně porušených vzorků byl proveden přepočet a úprava zkušebních těles.



Graf 10 Průběh zatěžování těles porušených vyčerpáním tahové únosnosti betonu

Na základě statického výpočtu bylo do betonových bloků vneseno tlakové předpětí pomocí závitových tyčí. Následně byl otestován zbytek vzorků IV.-VI. sady s požadovaným selháním FRP výztuží.



Obrázek 57 Vnesení předpětí do betonového bloku pomocí profilů a závitových tyčí

5.2.1 IV. sada – 30denní expozice (uložení ve vodě při 20 °C), L – konfigurace

5.2.1.1 Pevnost v tahu přímých prutů

Tabulka 17 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů – IV. sada: 30denní expozice (uložení ve vodě při 20 °C)

Typ vzorku	IV. sada – 30denní expozice (uložení ve vodě při 20 °C)			
Označení vzorku	GFRP A_30-1	GFRP A_30-2	GFRP A_30-3	GFRP A_30-4
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	103,56	102,72	101,89	100,96
Rychlost zatěžování [mm/min]	5,00	5,00	5,00	5,00
Doba trvání zkoušky [min]	04:17	04:59	04:17	03:18
Maximální tahová pevnost [MPa]	1318,57	1307,87	1297,30	1285,46
Střední tahová pevnost [MPa]	1302			
Směrodatná odchylka [MPa]	14,19			
Variační koeficient [-]	0,01			
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	52,58	52,74	52,48	51,56
Střední hodnota modulu pružnosti [GPa]	52,3			
Směrodatná odchylka [MPa]	0,62			
Variační koeficient [-]	0,01			

5.2.1.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí

Tabulka 18 Popis porušení zkoušených vzorků – IV. sada: 30denní expozice (uložení ve vodě při 20 °C), L-konfigurace

Označení vzorku	Popis porušení	Zařazení do vyhodnocení
L_FRP_30_A1	porušení betonu při zatěžovací síle 52,8 kN	ne
L_FRP_30_A2	přítlačen při osazování (porušen)	ne
L_FRP_30_A3	vzorek zatížen na 30kN v rychlém intervalu -> odtížen -> znovu zatížen 4 mm/min, selhání proběhlo v pořádku (porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části)	ano
L_FRP_30_A4	při spouštění zkušební oceli poškozen výztuž ohnuta (vnesen tlak)	ne
L_FRP_30_A5	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části	ano



Obrázek 58 Příkladů porušení vzorků IV. sady: vzorek A1 – porušení betonu (vlevo), vzorek A5 – porušení FRP výztuže v ohybu + delaminace (vpravo)

Tabulka 19 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí – IV. sada: 30denní expozice (uložení ve vodě při 20 °C), L-konfigurace

Typ vzorku	IV. sada – 30denní expozice (uložení ve vodě při 20 °C), L-konfigurace				
Označení vzorku	L_FRP_30_A1	L_FRP_30_A2	L_FRP_30_A3	L_FRP_30_A4	L_FRP_30_A5
Průměr [mm]	10	10	10	10	10
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	52,80	33,90	60,6	38,5	69,18
Rychlost zatěžování [mm/min]	4,00	1.int.: 5 mm/30 s 2. int.: 4 mm/min	1.int.: 5 mm/30 s 2. int.: 4 mm/min	1.int.: ručně 2. int.: 4 mm/min	1.int.: ručně 2. int.: 4 mm/min
Maximální tahová pevnost [MPa]	672,27	431,63	771,58	490,20	880,83
Střední tahová pevnost [MPa]	826				
Směrodatná odchylka [MPa]	77,25				
Variační koeficient [-]	0,09				
5% kvantil (bez vlivu počtu vzorků) [MPa]	699,14				
5% kvantil (dle EN 1990) [MPa]	-				
Střední tahová pevnost přímých prutů [MPa]	1302				
Podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	51,62	33,14	59,25	37,64	67,64
Průměrný podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	63				

Pozn.: chybné porušení testovaného vzorku – hodnota vyřazena z vyhodnocení

 nelze vyhodnotit – nedostatečný počet prvků vyhovujících kritériu pro vyhodnocení skupiny vzorků (pouze orientační hodnoty)

5.2.2 V. sada – 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C),
L – konfigurace

5.2.2.1 Pevnost v tahu přímých prutů

Tabulka 20 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů –
V. sada: 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C)

Typ vzorku	V. sada – 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C)			
Označení vzorku	GFRP B_30-1	GFRP B_30-2	GFRP B_30-3	GFRP B_30-4
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	101,54	104,28	102,09	99,46
Rychlost zatěžování [mm/min]	5,00	5,00	5,00	5,00
Doba trvání zkoušky [min]	04:01	04:22	04:40	03:40
Maximální tahová pevnost [MPa]	1292,85	1327,73	1299,85	1266,36
Střední tahová pevnost [MPa]	1297			
Směrodatná odchylka [MPa]	25,22			
Variační koeficient [-]	0,02			
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	51,52	52,61	52,27	52,14
Střední hodnota modulu pružnosti [GPa]	52,1			
Směrodatná odchylka [MPa]	0,24			
Variační koeficient [-]	0,00			

5.2.2.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí

Tabulka 21 Popis porušení zkoušených vzorků – V. sada: 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C), L-konfigurace

Označení vzorku	Popis porušení	Zařazení do vyhodnocení
L_FRP_30_B1	porušení na začátku ohybu + částečná delaminace v přímé části	ano
L_FRP_30_B2	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části	ano
L_FRP_30_B3	brzké selhání (křivě zabetonovaná výztuž v podélném směru)	ne
L_FRP_30_B4	porušení na začátku ohybu + částečná delaminace v přímé části	ano
L_FRP_30_B5	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části	ano



Obrázek 59 Vzorek B3 před zatěžováním – vychýlení výztuže v podélném směru



Obrázek 60 Porušení vzorků V. sady – selhání v ohýbané části + delaminace

Tabulka 22 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí – V. sada: 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C), L-konfigurace

Typ vzorku	V. sada – 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C), L-konfigurace				
Označení vzorku	L_FRP_30_B1	L_FRP_30_B2	L_FRP_30_B3	L_FRP_30_B4	L_FRP_30_B5
Průměr [mm]	10	10	10	10	10
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	62,50	54,10	40,4	60,17	62,23
Rychlost zatěžování [mm/min]	1.int.: ručně 2. int.: 4 mm/min	1.int.: ručně 2. int.: 4 mm/min	1.int.: ručně 2. int.: 4 mm/min	1.int.: ručně 2. int.: 4 mm/min	1.int.: ručně 2. int.: 4 mm/min
Maximální tahová pevnost [MPa]	795,77	688,82	514,39	766,11	792,34
Střední tahová pevnost [MPa]	761				
Směrodatná odchylka [MPa]	49,76				
Variační koeficient [-]	0,07				
5% kvantil (bez vlivu počtu vzorků) [MPa]	678,92				
5% kvantil (dle EN 1990) [MPa]	629,90				
Střední tahová pevnost přímých prutů [MPa]	1297				
Podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	61,11	52,89	39,50	58,83	60,84
Průměrný podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	58				

Pozn.: hodnoty lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty celé skupiny testovaných vzorků vyřazený z vyhodnocení

5.2.3 VI. sada – 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C),
L – konfigurace

5.2.3.1 Pevnost v tahu přímých prutů

Tabulka 23 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů –
VI. sada: 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C)

Typ vzorku	VI. sada – 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C)			
Označení vzorku	GFRP C_30-1	GFRP C_30-2	GFRP C_30-3	GFRP C_30-4
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	98,29	99,98	103,14	100,30
Rychlost zatěžování [mm/min]	5,00	5,00	5,00	5,00
Doba trvání zkoušky [min]	03:55	04:42	04:36	04:39
Maximální tahová pevnost [MPa]	1251,47	1272,98	1313,22	1277,06
Střední tahová pevnost [MPa]	1279			
Směrodatná odchylka [MPa]	25,62			
Variační koeficient [-]	0,02			
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	52,02	51,99	52,53	52,00
Střední hodnota modulu pružnosti [GPa]	52,1			
Směrodatná odchylka [MPa]	0,31			
Variační koeficient [-]	0,01			

5.2.3.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí

Tabulka 24 Popis porušení zkoušených vzorků – VI. sada: 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C), L-konfigurace

Označení vzorku	Popis porušení	Zařazení do vyhodnocení
L_FRP_30_C1	porušení na začátku ohybu	ano
L_FRP_30_C2	porušení betonu při zatěžovací síle 47,67 kN	ne
L_FRP_30_C3	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části	ano
L_FRP_30_C4	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části	ano
L_FRP_30_C5	porušení na začátku ohybu	ano



Obrázek 61 Správné porušení vzorků VI. sady – selhání v ohýbané části + delaminace



Obrázek 62 Nesprávné porušení vzorku C3 – selhání v betonu

Tabulka 25 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí – VI. sada: 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C), L-konfigurace

Typ vzorku	VI. sada – 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C), L-konfigurace				
Označení vzorku	L_FRP_30_C1	L_FRP_30_C2	L_FRP_30_C3	L_FRP_30_C4	L_FRP_30_C5
Průměr [mm]	10	10	10	10	10
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	61,43	47,67	58,17	57,42	58,33
Rychlost zatěžování [mm/min]	4,00	4,00	1.int.: ručně 2. int.: 4 mm/min	1.int.: ručně 2. int.: 4 mm/min	1.int.: ručně 2. int.: 4 mm/min
Maximální tahová pevnost [MPa]	782,15	606,95	740,64	731,09	742,68
Střední tahová pevnost [MPa]	749				
Směrodatná odchylka [MPa]	22,58				
Variační koeficient [-]	0,03				
5% kvantil (bez vlivu počtu vzorků) [MPa]	712,00				
5% kvantil (dle EN 1990) [MPa]	689,76				
Střední tahová pevnost přímých prutů [MPa]	1279				
Podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	60,06	46,61	56,87	56,14	57,03
Průměrný podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	58				

Pozn.: chybné porušení testovaného vzorku – hodnota vyřazena z vyhodnocení

5.2.4 VII. sada – 1000 h expozice (uložení ve vodě při 20 °C), L – konfigurace

5.2.4.1 Pevnost v tahu přímých prutů

Tabulka 26 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů – VII. sada: 1000 h expozice (uložení ve vodě při 20 °C)

Typ vzorku	VII. sada – 1000 h expozice = cca 42 dní (uložení ve vodě při 20 °C)			
Označení vzorku	GFRP A_42-1	GFRP A_42-2	GFRP A_42-3	GFRP A_42-4
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	100,59	100,86	100,48	96,23
Rychlost zatěžování [mm/min]	5,00	5,00	5,00	5,00
Doba trvání zkoušky [min]	04:01	04:18	04:03	03:14
Maximální tahová pevnost [MPa]	1280,75	1284,19	1279,35	1225,24
Střední tahová pevnost [MPa]	1267			
Směrodatná odchylka [MPa]	28,17			
Variační koeficient [-]	0,02			
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	51,48	52,39	50,50	51,87
Střední hodnota modulu pružnosti [GPa]	51,6			
Směrodatná odchylka [MPa]	0,98			
Variační koeficient [-]	0,02			

5.2.4.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí

Tabulka 27 Popis porušení zkoušených vzorků – VII. sada: 1000 h expozice (uložení ve vodě při 20 °C)

Označení vzorku	Popis porušení	Zařazení do vyhodnocení
L_FRP_42_A1	výztuž při zatěžování mírně opřena o kotvící U profil, selhání proběhlo v pořádku (porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části)	ano
L_FRP_42_A2	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části	ano
L_FRP_42_A3	porušení na začátku ohybu + částečná delaminace v přímé části	ano
L_FRP_42_A4	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části	ano
L_FRP_42_A5	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části, pevnost lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty	ne



Obrázek 63 Porušení vzorků VII. sady

Tabulka 28 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí – VII. sada: 1000 h expozice (uložení ve vodě při 20 °C)

Typ vzorku	VII. sada - 1000 h expozice = cca 42 dní (uložení ve vodě při 20 °C), L-konfigurace				
Označení vzorku	L_FRP_4 2_A1	L_FRP_4 2_A2	L_FRP_4 2_A3	L_FRP_4 2_A4	L_FRP_4 2_A5
Průměr [mm]	10	10	10	10	10
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	62,03	58,60	53,93	62,55	51,43
Rychlost zatěžování [mm/min]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Maximální tahová pevnost [MPa]	789,79	746,12	686,66	796,41	654,83
Střední tahová pevnost [MPa]	755				
Směrodatná odchylka [MPa]	50,58				
Variační koeficient [-]	0,04				
5% kvantil (bez vlivu počtu vzorků) [MPa]	671,55				
5% kvantil (dle EN 1990) [MPa]	621,72				
Střední tahová pevnost přímých prutů [MPa]	1267				
Podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	62,32	58,87	54,18	62,84	51,67
Průměrný podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	60				

Pozn.: hodnoty lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty celé skupiny testovaných vzorků vyřazeny z vyhodnocení

5.2.5 VIII. sada – 1000 h expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C),
L – konfigurace

5.2.5.1 Pevnost v tahu přímých prutů

Tabulka 29 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů – VIII. sada: 1000 h expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C)

Typ vzorku	VIII. sada – 1000 h expozice = cca 42 dní (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C)			
Označení vzorku	GFRP B_42-1	GFRP B_42-2	GFRP B_42-3	GFRP B_42-4
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	99,80	100,18	103,39	100,53
Rychlost zatěžování [mm/min]	5,00	5,00	5,00	5,00
Doba trvání zkoušky [min]	04:26	04:18	04:20	03:33
Maximální tahová pevnost [MPa]	1270,69	1275,53	1316,40	1279,99
Střední tahová pevnost [MPa]	1286			
Směrodatná odchylka [MPa]	20,85			
Variační koeficient [-]	0,02			
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	52,06	51,32	51,99	52,98
Střední hodnota modulu pružnosti [GPa]	52,1			
Směrodatná odchylka [MPa]	0,84			
Variační koeficient [-]	0,02			

5.2.5.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí

Tabulka 30 Popis porušení zkoušených vzorků – VIII. sada: 1000 h expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C)

Označení vzorku	Popis porušení	Zařazení do vyhodnocení
L_FRP_42_B1	porušení na začátku ohybu	ano
L_FRP_42_B2	nejprve porušení betonu - 51.01 kN, poté porušení výztuže - 52.94 kN	ne
L_FRP_42_B3	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části, pevnost lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty	ne
L_FRP_42_B4	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části	ano
L_FRP_42_B5	porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části	ano



Obrázek 64 Porušení vzorků VIII. sady

Tabulka 31 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí – VIII. sada: 1000 h expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C)

Typ vzorku	VIII. sada - 1000 h expozice = cca 42 dní (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C), L-konfigurace				
Označení vzorku	L_FRP_4 2_B1	L_FRP_4 2_B2	L_FRP_4 2_B3	L_FRP_4 2_B4	L_FRP_4 2_B5
Průměr [mm]	10	10	10	10	10
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	52,51	51,01	62,62	57,19	54,47
Rychlost zatěžování [mm/min]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Maximální tahová pevnost [MPa]	668,58	649,48	797,30	728,17	693,53
Střední tahová pevnost [MPa]	697				
Směrodatná odchylka [MPa]	29,92				
Variační koeficient [-]	0,04				
5% kvantil (bez vlivu počtu vzorků) [MPa]	647,54				
5% kvantil (dle EN 1990) [MPa]	595,91				
Střední tahová pevnost přímých prutů [MPa]	1286				
Podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	52,75	51,25	62,91	57,45	54,72
Průměrný podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	55				

Pozn.: chybné porušení testovaného vzorku – hodnota vyřazena z vyhodnocení

 hodnoty lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty celé skupiny testovaných vzorků vyřazeny z vyhodnocení

5.2.6 IX. sada – 1000 h expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C),
L – konfigurace

5.2.6.1 Pevnost v tahu přímých prutů

Tabulka 32 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů – IX. sada: 1000 h expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C)

Typ vzorku	IX. sada – 1000 h expozice = cca 42 dní (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C)			
Označení vzorku	GFRP C_42-1	GFRP C_42-2	GFRP C_42-3	GFRP C_42-4
Průměr [mm]	10,0	10,0	10,0	10,0
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	100,58	94,17	96,35	99,28
Rychlost zatěžování [mm/min]	5,00	5,00	5,00	5,00
Doba trvání zkoušky [min]	03:42	04:05	03:41	03:29
Maximální tahová pevnost [MPa]	1280,62	1199,01	1226,77	1264,07
Střední tahová pevnost [MPa]	1243			
Směrodatná odchylka [MPa]	36,78			
Variační koeficient [-]	0,03			
Modul pružnosti (sečný) [GPa]	51,76	52,84	52,53	52,07
Střední hodnota modulu pružnosti [GPa]	52,3			
Směrodatná odchylka [MPa]	0,39			
Variační koeficient [-]	0,01			

5.2.6.2 Pevnost v tahu ohýbaných částí

Tabulka 33 Popis porušení zkoušených vzorků – IX. sada: 1000 h expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C)

Označení vzorku	Popis porušení	Zařazení do vyhodnocení
L_FRP_42_C1	porušení na začátku ohybu, pevnost lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty	ne
L_FRP_42_C2	porušení na začátku ohybu + částečná delaminace v přímé části	ano
L_FRP_42_C3	porušení na začátku ohybu + částečná delaminace v přímé části	ano
L_FRP_42_C4	porušení na začátku ohybu + částečná delaminace v přímé části	ano
L_FRP_42_C5	nejprve porušení betonu - 30.64 kN, poté porušení výztuže - 44.13 kN	ne



Obrázek 65 Porušení vzorků IX. sady

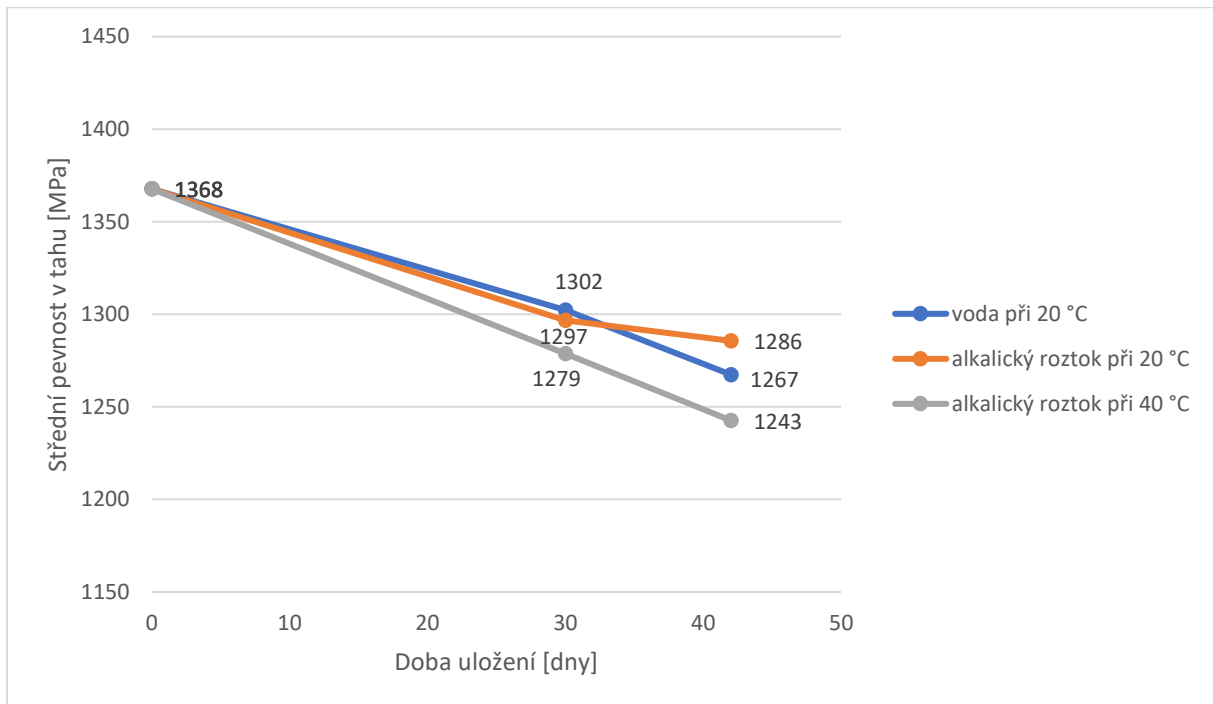
Tabulka 34 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí – IX. sada: 1000 h expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C)

Typ vzorku	IX. sada - 1000 h expozice = cca 42 dní (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C), L-konfigurace				
Označení vzorku	L_FRP_4 2_C1	L_FRP_4 2_C2	L_FRP_4 2_C3	L_FRP_4 2_C4	L_FRP_4 2_C5
Průměr [mm]	10	10	10	10	10
Teoretická plocha [mm ²]	78,54	78,54	78,54	78,54	78,54
Maximální dosažená síla [kN]	37,48	48,78	54,41	54,98	30,64
Rychlost zatěžování [mm/min]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Maximální tahová pevnost [MPa]	477,21	621,09	692,77	700,03	390,12
Střední tahová pevnost [MPa]	671				
Směrodatná odchylka [MPa]	43,63				
Variační koeficient [-]	0,06				
5% kvantil (bez vlivu počtu vzorků) [MPa]	599,52				
5% kvantil (dle EN 1990) [MPa]	524,25				
Střední tahová pevnost přímých prutů [MPa]	1243				
Podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	37,65	49,01	54,66	55,23	30,78
Průměrný podíl tahové pevnosti ohýbaných vs. přímých prutů [%]	53				

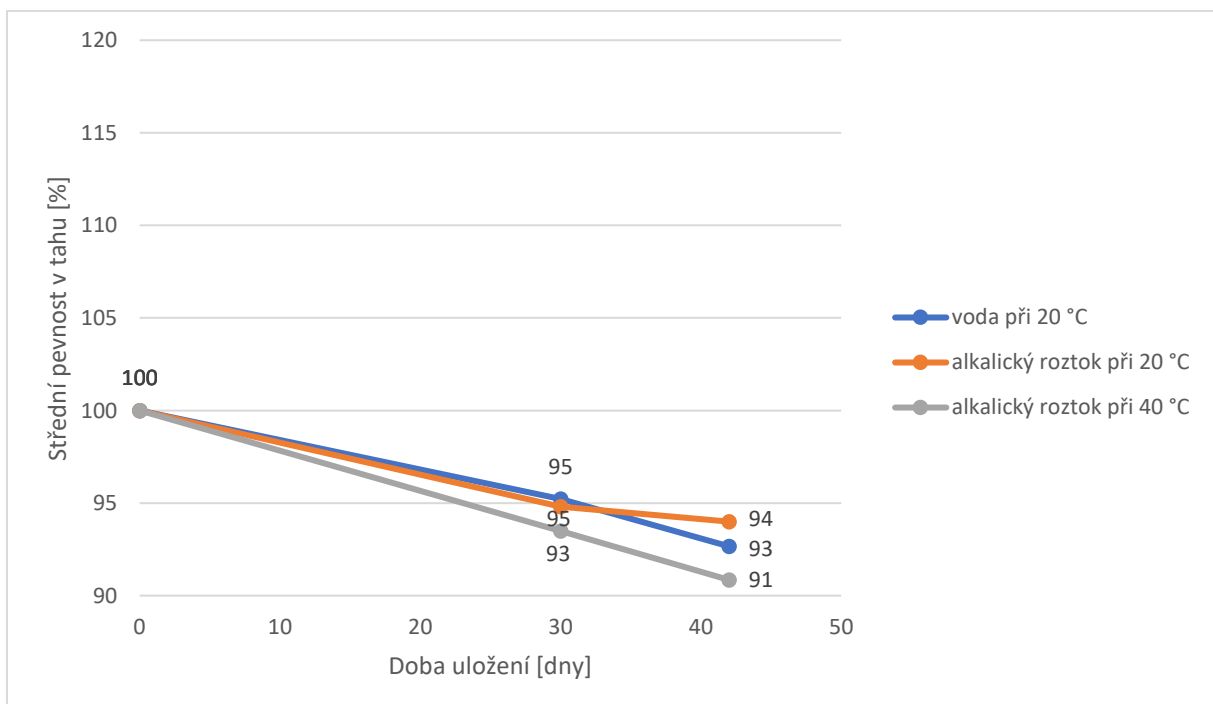
Pozn.: chybné porušení testovaného vzorku – hodnota vyřazena z vyhodnocení

 hodnoty lišící se o více než 10 % od průměrné hodnoty celé skupiny testovaných vzorků vyřazeny z vyhodnocení

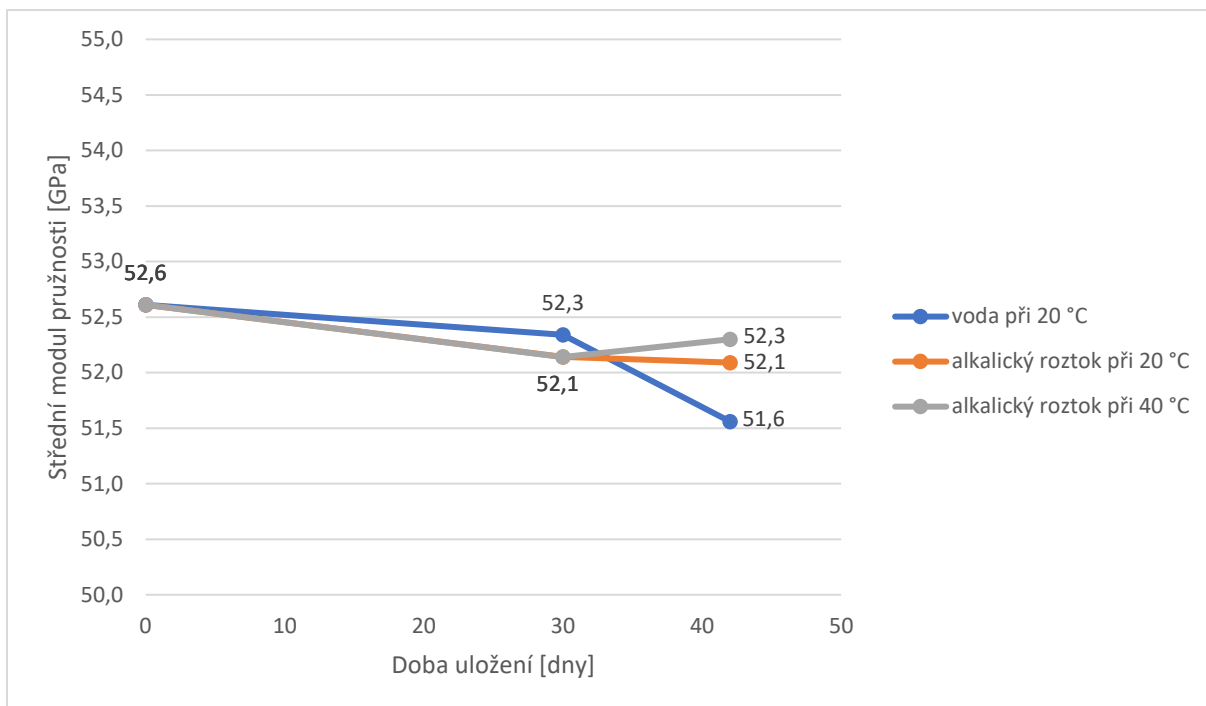
5.2.7 Grafické vyhodnocení mechanických vlastností



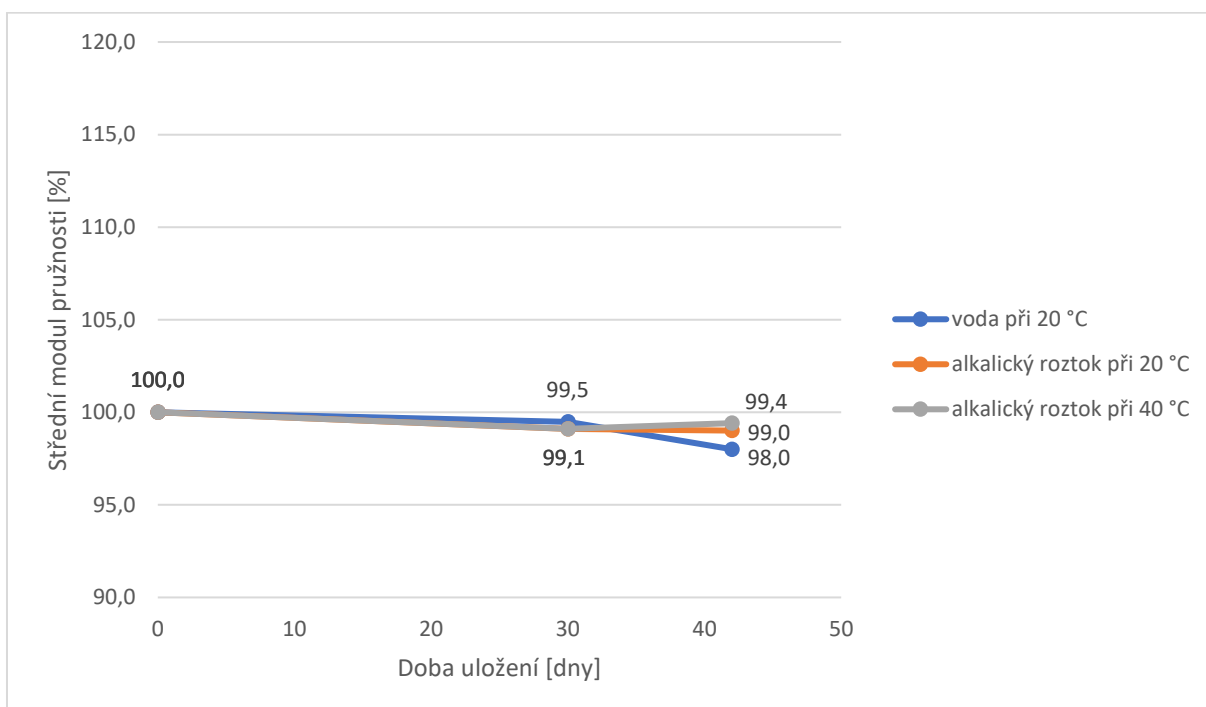
Graf 11 Vývoj střední tahové pevnosti přímých výztuží v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 a 40 °C)



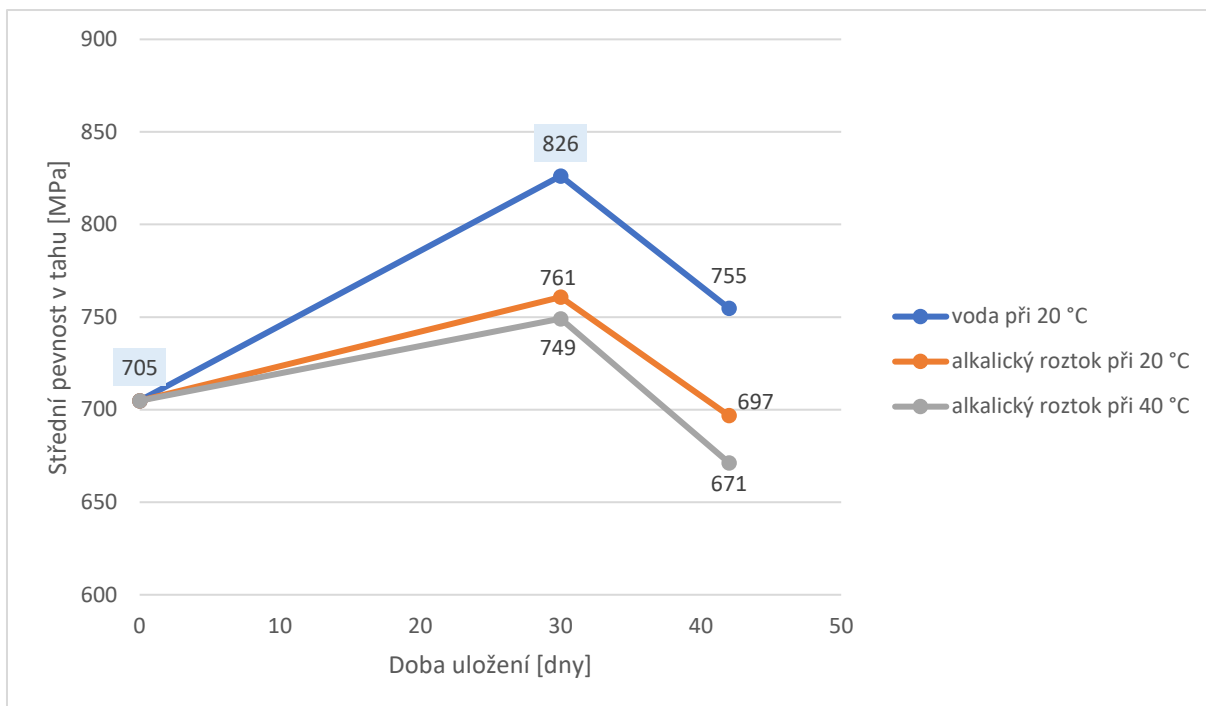
Graf 12 Procentuální změna střední tahové pevnosti přímých výztuží v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 a 40 °C)



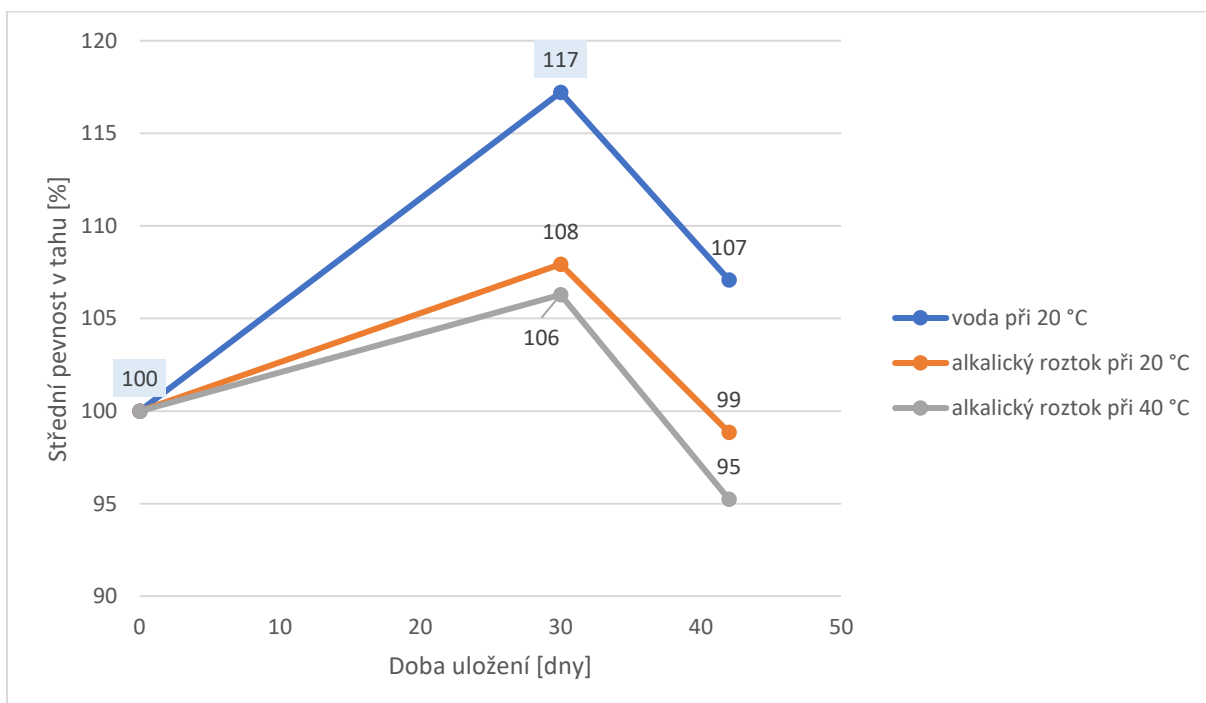
Graf 13 Vývoj středního modulu pružnosti přímých výztuží v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 °C a 40 °C)



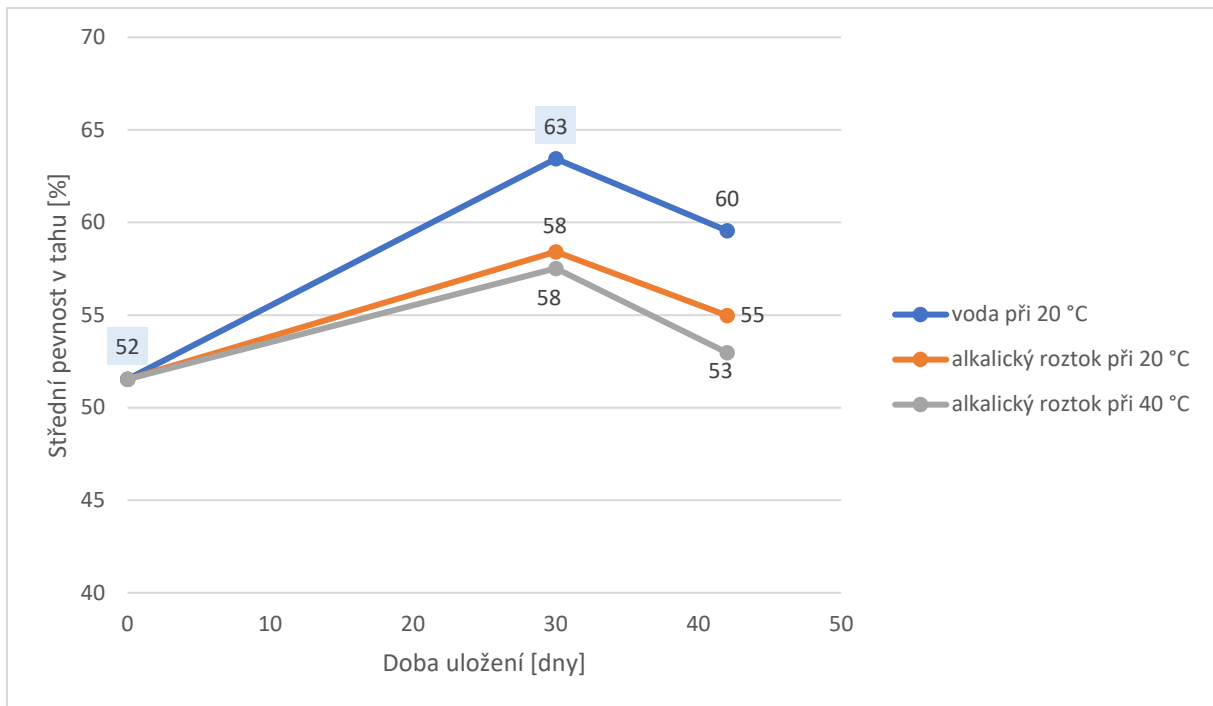
Graf 14 Procentuální změna středního modulu pružnosti přímých výztuží v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 °C a 40 °C)



Graf 15 Vývoj střední tahové pevnosti ohýbaných výztuží v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 °C a 40 °C), pozn. modře podbarvené hodnoty jsou pouze orientační



Graf 16 Procentuální změna střední tahové pevnosti ohýbaných výztuží v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 °C a 40 °C), pozn. modře podbarvené hodnoty jsou pouze orientační



Graf 17 Procentuální poměr hodnot střední tahové pevnosti ohýbané výztuže a střední tahové pevnosti přímé výztuže při vystavení stejným podmínkám v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 °C a 40 °C), pozn. modře podbarvené hodnoty jsou pouze orientační

5.2.8 Shrnutí pozorování mechanických vlastností

Na základě vyhodnocení II. etapy byla pro testování mechanických vlastností ohýbaných FRP výztuží ve IV. – IX. sadě zvolena L-konfigurace. U přímých výztuží byla vyhodnocována pevnost v tahu a modul pružnosti. U ohýbaných výztuží bohužel konfigurace nedovolovala vyhodnotit modul pružnosti, proto je sledována pouze pevnost v tahu v místě ohybu. Jednotlivé sady se lišily agresivním prostředím a dobou, po kterou v něm byly uloženy. Ve IV. sadě byly vzorky naloženy ve vodě při 20 °C po 30 dnů, v V. sadě byly vzorky naloženy v alkalickém roztoku při 20 °C po 30 dnů, v VI. sadě byly vzorky naloženy v alkalickém roztoku při 40 °C po 30 dnů, v VII. sadě byly vzorky naloženy ve vodě při 20 °C po 1000 hodin, v VIII. sadě byly vzorky naloženy v alkalickém roztoku při 20 °C po 1000 hodin a v IX. sadě byly vzorky naloženy v alkalickém roztoku při 40 °C po 1000 hodin.

Nejprve byla vyhodnocována pevnost v tahu přímých FRP výztuží po expozici v jednotlivých prostředích, která později zároveň slouží jako reference při posuzování snížení pevnosti v tahu vlivem ohybu. Z grafického vyhodnocení (Graf 12) je patrné, že u všech sad přímých FRP výztuží došlo k poklesu pevností v tahu vlivem agresivních prostředí. U vzorků naložených ve vodě při 20 °C došlo po 30 dnech k 5% poklesu a po 1000 hodinách k 7% poklesu oproti referenčnímu vzorku přímé výztuže, který nebyl agresivnímu prostředí vystaven. U vzorků

naložených v alkalickém roztoku při 20 °C došlo po 30 dnech taktéž k 5% poklesu a po 1000 hodinách k 6% poklesu oproti referenčnímu vzorku přímé výztuže. U vzorků naložených v alkalickém roztoku při 40 °C došlo po 30 dnech k poklesu o 7 % a po 1000 hodinách k poklesu o 9 % oproti referenčnímu vzorku přímé výztuže. Z těchto dat lze vyčíst trend snižování pevnosti v tahu přímých FRP výztuží s rostoucí dobou expozice agresivnímu prostředí a zvyšující se teplotou agresivního prostředí.

Následně byl vyhodnocován modul pružnosti přímých FRP výztuží po expozici v jednotlivých prostředích. Zde již v grafickém vyhodnocení (Graf 14) není výsledek tak jednoznačný. U vzorků přímých výztuží naložených ve vodě při 20 °C došlo po 30 dnech k poklesu o 0,5 % a po 1000 hodinách k poklesu o 2 % oproti referenčnímu vzorku přímé výztuže, který nebyl agresivnímu prostředí vystaven. U vzorků naložených v alkalickém roztoku při 20 °C došlo po 30 dnech k poklesu o 0,9 % a po 1000 hodinách k poklesu 1 % oproti referenčnímu vzorku. U vzorků naložených v alkalickém roztoku při 40 °C došlo po 30 dnech taktéž k poklesu o 0,9 %, avšak po 1000 hodinách modul pružnosti poklesl pouze o 0,6 % oproti referenčnímu vzorku. Vidíme zde, že u všech exponovaných vzorků přímých výztuží došlo k poklesu modulu pružnosti, nicméně tento pokles je řádově nižší oproti procentuálnímu poklesu pevností v tahu. Z naměřených dat není jednoznačně možno určit trend změn modulu pružnosti přímých výztuží a pro jeho vykreslení lze doporučit další sledování hodnot modulů pružnosti po delších dobách expozice v agresivních prostředích.

Po otestování přímých FRP výztuží bylo možno otestovat ohýbané FRP výztuže a stanovit pokles pevností v tahu vlivem ohybu napříč různými expozičními prostředími. Referenční hodnota pevnosti v tahu ohýbané části je bohužel pouze orientační, protože při testování proveditelnosti zkoušení navrhovanou konfigurací ve II. etapě nebyl získán dostatek správně porušených vzorků pro statistické vyhodnocení. Při dalším testování by proto bylo vhodné otestovat další sadu referenčních vzorků ohýbaných výztuží pro získání relevantních hodnot. Pomineme-li tuto referenční hodnotu, můžeme v grafu pevností v tahu ohýbaných výztuží (Graf 15) stejně jako u přímých výztuží pozorovat pokles hodnot vlivem agresivních prostředí.

Při porovnání pevností v tahu ohýbaných FRP výztuží s pevnostmi v tahu přímých FRP výztuží vystavených stejnému agresivnímu prostředí po stejnou dobu (Graf 16) můžeme vyhodnotit následující poklesy hodnot. U vzorků ohýbaných výztuží naložených ve vodě při 20 °C došlo po 30 dnech k poklesu na 63 % (pouze orientační hodnota) a po 1000 hodinách k poklesu na 60 % pevností v tahu přímých výztuží vystavených témuž prostředí. U vzorků ohýbaných výztuží naložených v alkalickém roztoku při 20 °C došlo po 30 dnech k poklesu na 58 % a po 1000 hodinách k poklesu na 55 % pevností v tahu přímých výztuží vystavených témuž prostředí. U vzorků ohýbaných výztuží naložených v alkalickém roztoku při 40 °C došlo

po 30 dnech k poklesu na 58 % a po 1000 hodinách k poklesu na 53 % oproti referenčnímu vzorku. V případě ohýbaných výztuží se potvrdil trend poklesu pevností v tahu s rostoucí dobou expozice agresivnímu prostředí a zvyšující se teplotou agresivního prostředí.

5.3 Pozorování vlivu agresivního prostředí

Mezi vzorky exponovanými 30 dní a 1000 h (cca 42 dní) nebyl na první pohled zřetelný rozdíl, stejně tak nebyly pozorovány významné rozdíly mezi vzorky uloženými v alkalickém roztoku dle ACI 440 při teplotě 20 °C a 40 °C. Pozorování vlivu agresivního prostředí proto bylo provedeno pouze na vzorcích referenčních a vzorcích vystavených vodě a agresivnímu roztoku dle ACI 440 s teplotou 40 °C po expozici 1000 h, tedy vzorky s největšími rozdíly.

Pro pozorování příčných a podélných řezů pod mikroskopem bylo nutno vzorky nařezat pomocí mikrobrusky.



Obrázek 66 Příprava vzorků pro optický a elektronový mikroskop

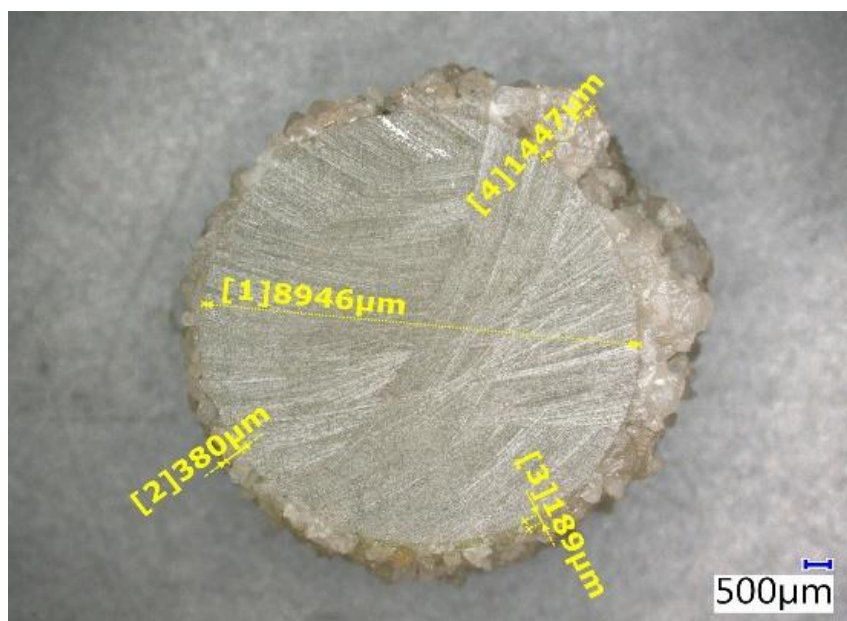
5.3.1 Optická mikroskopie

Pro pozorování povrchů, příčných a podélných řezů vybraných vzorků FRP výztuže byl použit digitální optický mikroskop KEYENCE VHX – 6000. Tento optický mikroskop disponuje velkou hloubkou ostrosti při možnostech zvětšení 20x až 200x a umožňuje snímat, ukládat a měřit přímo v pořízených snímcích. [47]



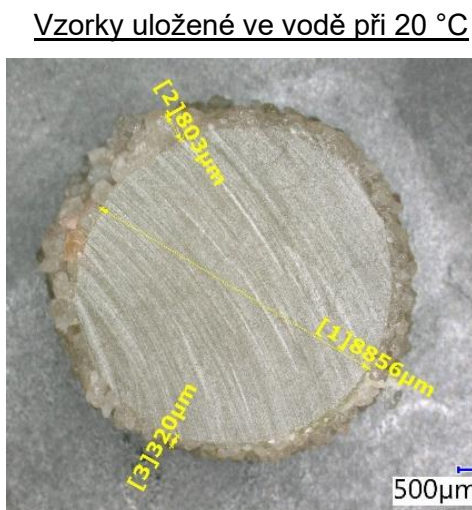
Obrázek 67 Digitální optický mikroskop KEYENCE VHX – 6000 [47]

Nejprve byly pořízeny snímky příčných řezů vybraných vzorků. Přímou v softwaru digitálního optického mikroskopu byl změřen průměr a tloušťky vrstev povrchových úprav jednotlivých vzorků.

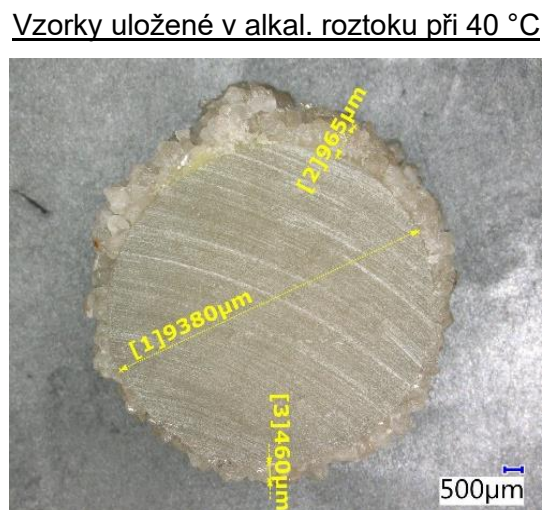


Obrázek 68 Příčný řez referenční přímou výztuží uloženou na vzduchu, 20x zvětšeno

Přímá výztuž



Obrázek 69 Příčný řez přímou výztuží uloženu 1000 h ve vodě při 20 °C, 20x zvětšeno

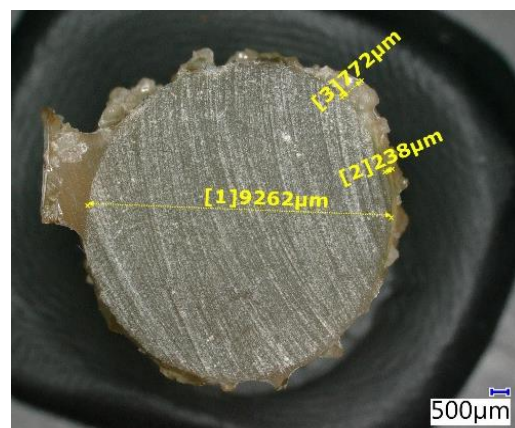


Obrázek 70 Příčný řez přímou výztuží uloženu 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C, 20x zvětšeno

Přímá část třmínku



Obrázek 71 Příčný řez třmínkem uložným 1000 h ve vodě při 20 °C – přímá část, 20x zvětšeno

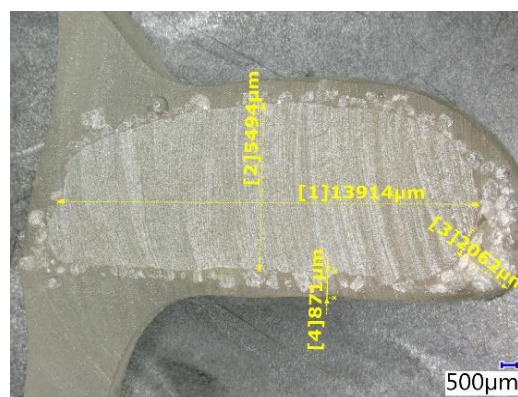


Obrázek 72 Příčný řez třmínkem uložným 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C – přímá část, 20x zvětšeno

Ohyb třmínku



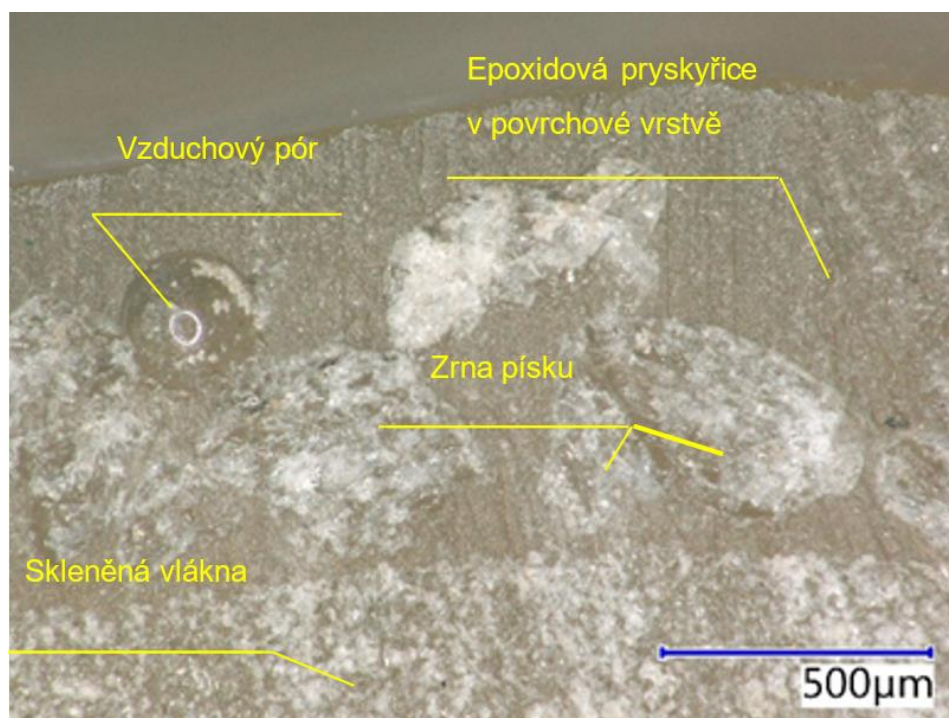
Obrázek 73 Příčný řez třmínkem uložným 1000 h ve vodě při 20 °C – ohyb, 20x zvětšeno



Obrázek 74 Příčný řez třmínkem uložným 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C – ohyb, 20x zvětšeno

Příčné řezy přímých výztuží se po 1000 hodinách uložení ve vodě při 20 °C (Obrázek 69) ani alkalickém roztoku při 40 °C (Obrázek 70) neliší od referenční přímé výztuže uložené na vzduchu (Obrázek 68). Příčný řez přímou částí třmínku uloženého ve vodě (Obrázek 71) se také výrazně neliší od přímé výztuže uložené ve vodě. Nicméně na příčném řezu přímou částí třmínku uloženého v alkalickém roztoku je oproti přímé výztuži uložené ve stejném prostředí znatelné ztenčení povrchové vrstvy a místy chybějící opískování. Také je na snímku (Obrázek 72) v levé části viditelná shromážděná pryskyřice, která vlivem porušení vazeb a gravitace skla do tohoto místa.

Na snímcích třmínků je na první pohled viditelná změna tvaru průřezu výztuže v místě ohybu, která je dána technologií vytváření ohybu. Dále je zde patrná silnější vrstva epoxidové pryskyřice v povrchové vrstvě. Tato pryskyřice obaluje zrna písku a výztuž v těchto místech ztrácí drsnost původní povrchové úpravy, tedy zlepšení soudržnosti FRP výztuže s betonem. Třmínek uložený ve vodě (Obrázek 73) vykazuje tenčí vrstvu pryskyřice a písek z ní místy vystupuje na povrch. Oproti tomu u třmínku uloženého v alkalickém prostředí (Obrázek 74) je písek v místě ohybu plně zalit a velké množství pryskyřice je stečeno.



Obrázek 75 Detail příčného řezu třmínkem uloženým 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C – ohyb, 200x zvětšeno

Tělo FRP výztuže tvořené z 80 % skleněnými vlákny a z 20 % epoxidovou pryskyřicí u žádného z pozorovaných vzorků nejevilo známky porušení a prostupu degradace směrem do průřezu. Degradace epoxidové pryskyřice na povrchu vzorků byla nejvýraznější v ohybech třmínků,

a to na straně, kde byly při výrobě řezány (viz Obrázek 76). Tyto řezy nebyly při výrobě ošetřeny a umožnily tak vstup agresivních médií do vzorků. Při ohýbání částečně vytvrzených prutů mohlo dojít k mikrotrhlám v pryskyřici, která v kombinaci s nedokonalým vytvrzením, a tedy nedokonalému zesíťování umožnila prostup agresivních médií a degradaci pryskyřice na povrchu vzorků.



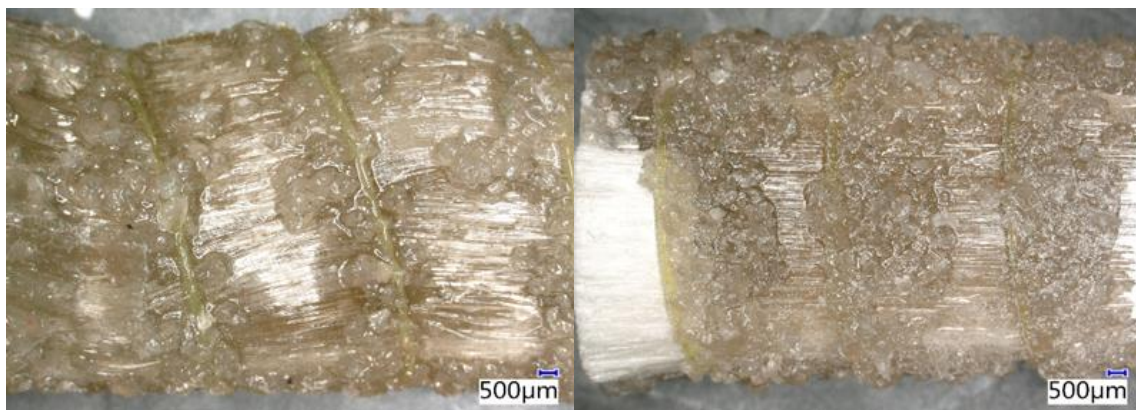
Obrázek 76 Ohyby třmínek po vystavení po dobu 1000 h vodě při 20 °C (vlevo) a v alkalickém roztoku při 40 °C (vpravo)

Povrch jednotlivých vzorků se značně lišil nejen v závislosti na expozici a agresivních prostředích, ale také v závislosti na druhu a konkrétní části výztuže. Přímé výztuže se po působení agresivních prostředí lišily od referenční výztuže nejméně, pouze v některých místech došlo k mírnému rozpuštění pryskyřice a zesklivatění povrchu (Obrázek 77).

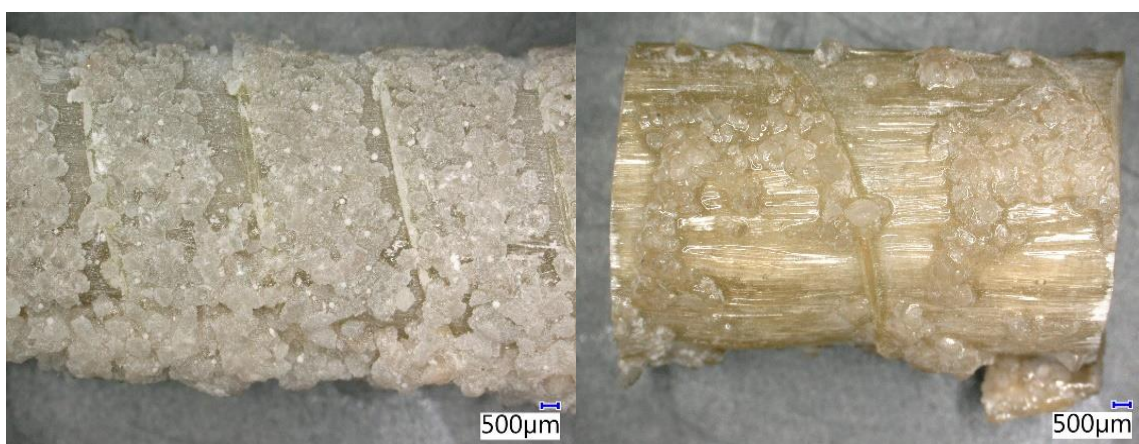


Obrázek 77 Snímky povrchu přímých prutů po 1000 h, zleva: referenční (na vzduchu), ve vodě při 20 °C a v alkalickém roztoku při 40 °C, 20x zvětšeno

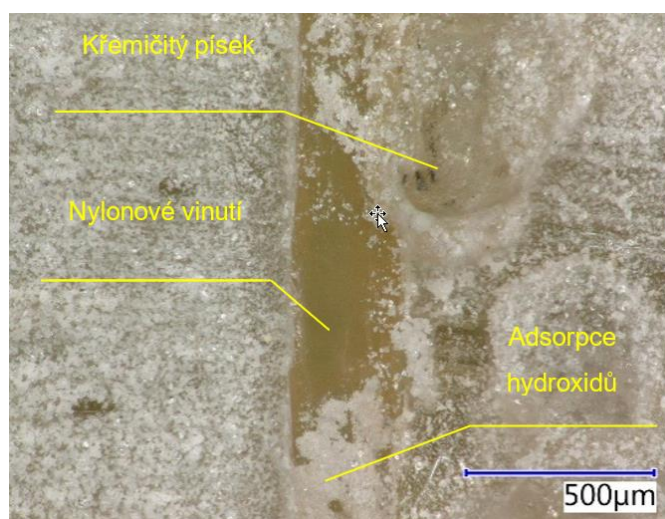
Třmínky měly po celém svém povrchu horší kvalitu povrchové úpravy, opískování bylo částečně opadáno již z výroby. Lze si všimnout, že se křemičitý písek udržel podél nylonového vinutí a tam kde již byla podpora vinutím nedostatečná, vlivem gravitace opadal. V přímých částech třmínek došlo k mírnému zesklivatění povrchové pryskyřice (Obrázek 78, Obrázek 79) a u některých vzorků uložených v alkalickém prostředí došlo k adsorpci hydroxidů na povrch (Obrázek 80).



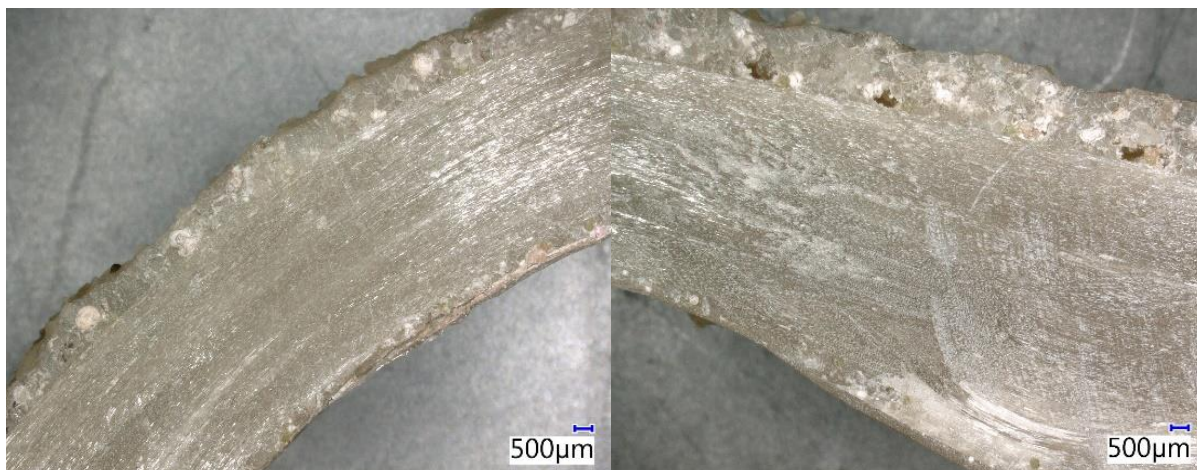
Obrázek 78 Snímky povrchu přímých částí třmínků uložených 1000 h ve vodě při 20 °C, 20x zvětšeno



Obrázek 79 Snímky povrchu přímých částí třmínků uložených 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C, 20x zvětšeno

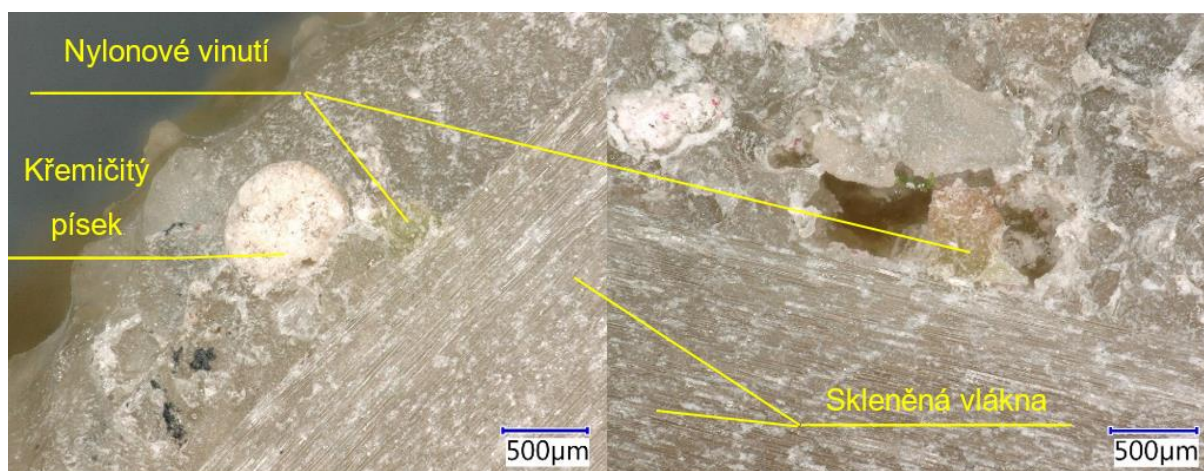


Obrázek 80 Detail povrchu přímé části třmínku uloženého 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C, 200x zvětšeno



Obrázek 81 Podélný řez ohybem (vlevo) a rozšířením (vpravo) třmínku uloženým 1000 h ve vodě při 20 °C, 20x zvětšeno

Na podélném řezu byl sledován průběh vláken v ohýbané části třmínku (Obrázek 81). Na snímku jsou znatelné stopy po řezání mikrobruskou, které narušují viditelnost probíhajících vláken. Při pohledu na podélný řez se zdá, že v samotném ohybu probíhají jednotlivá vlákna rovnoměrně. V rozšíření, kdy ohyb přechází v přímou část třmínku, je pozorováno stlačení vláken při vnitřní straně ohybu. Také je zde viditelná různá tloušťka povrchové úpravy. Na vnitřním povrchu ohybu má povrchová vrstva tenkou tloušťku a obsahuje minimum křemičitého písku. Na vnější straně ohybu je povrchová vrstva zhruba dvojnásobně tlustá oproti referenčnímu přímému prutu a na rozhraní skelných vláken a povrchové úpravy se místy vyskytují dutiny.



Obrázek 82 Detaily podélného řezu vnější strany ohybu třmínku uloženého 1000 h ve vodě při 20 °C, 100x zvětšeno

Na detailním snímku vnitřní strany ohybu třmínku je stejně jako u vnější strany ohybu viditelná dutina v blízkosti nylonového ovinu (Obrázek 83). Ke vzniku dutin pravděpodobně došlo při výrobě ohýbáním přímých prutů.



Obrázek 83 Detail podélného řezu vnitřní strany ohybu třmínku uloženého 1000 h ve vodě při 20 °C, 200x zvětšeno

Přestože na podélném řezu působí průběh vláken rovnoměrně, při pohledu na vnitřní stranu ohybu některých vzorků se objevuje zvlnění vláken (Obrázek 84).



Obrázek 84 Zvlnění vláken na vnitřní straně ohybu třmínků uložených 1000 h v alkalickém roztoku při 20 °C (vpravo, 20x zvětšeno) a 40 °C (vlevo)

Shrnutí pozorování optickou mikroskopií

Závěrem lze říct, že mikroskopické pozorování neprokázalo vliv uložení v agresivním prostředí po dobu 1000 hodin na samotné tělo výztuže, ale je výrazně ovlivněna vrstva povrchové úpravy. Technologii výroby třmínků je patrně způsobeno nerovnoměrné opískování a nedokonalé zesíťování epoxidové pryskyřice. Pryskyřice na povrchu třmínků byla po vystavení agresivním prostředím v místech ohybu zdegradována a došlo k roztékání. Tento problém byl nejčastěji zaznamenán v ohybech, které byly v blízkosti neošetřených řezů, jimiž

mohlo agresivní médium snáze pronikat. Dále byly v některých ohybech na rozhraní skleněných vláken a povrchové úpravy pozorovány dutiny, které pravděpodobně taktéž vznikly při ohýbání výztuží. Vlivem ohýbání původně přímé výztuže došlo na vnitřní straně ohybu ke zvlněnému průběhu vláken, čímž je omezen přenos tahového namáhání v této oblasti průřezu.

5.3.2 Elektronová mikroskopie

Pro pozorování struktury příčných řezů vybraných vzorků FRP výztuží byl použit skenovací elektronový mikroskop (SEM) Tescan Mira 3.



Obrázek 85 Skenovací elektronový mikroskop Tescan Mira 3 [48]

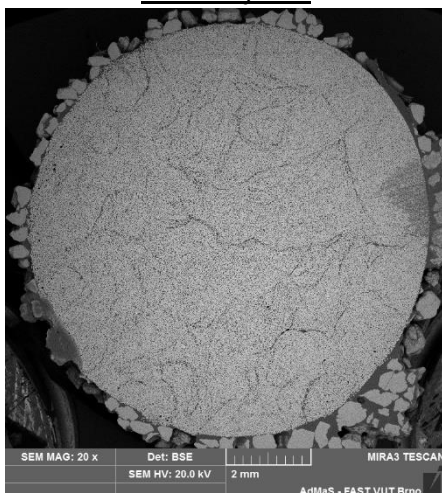
Stejně jako u optického mikroskopu byly nasnímány referenční vzorky, vzorky uložené 1000 h ve vodě při 20 °C a vzorky uložené v alkalickém roztoku při 40 °C. Byly srovnány vzorky přímých výztuží vyrobené běžným procesem na pultruzní lince a vzorky třmínků, které byly částečně vyráběny ručně (ohýbání).

Na následujících snímcích (viz Obrázek 86 až Obrázek 91) je zřetelný rozdíl mezi přímými výztužemi a třmínky. Na všech snímcích jsou viditelné svazky vláken a pryskyřice vytlačená mezi nimi. U přímé části třmínků (Obrázek 89) a nedaleko ohybu třmínku (Obrázek 87) jsou patrné větší mezery mezi svazky vláken vyplněné pryskyřicí. Přímě v ohybu třmínku (Obrázek 91) jsou svazky naopak přitlačeny k sobě a mezery vyplněné pryskyřicí jsou menší.

Při porovnání vzorků přímých výztuží vystavených různým prostředím (Obrázek 86, Obrázek 88 a Obrázek 90) není pozorována výrazná změna struktury.

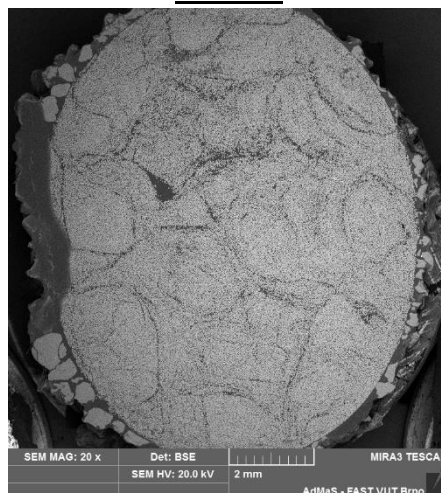
Referenční vzorky

Přímá výztuž



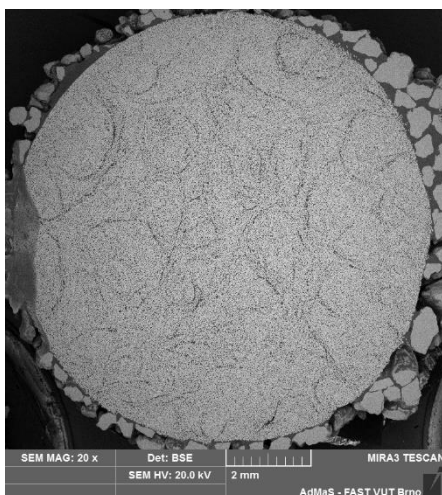
Obrázek 86 Příčný řez referenční přímou výztuží, 20x zvětšeno

Trámek

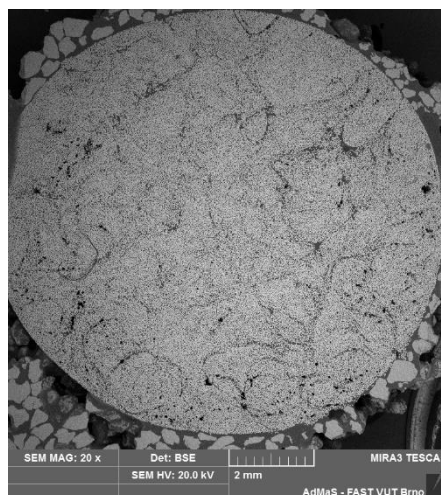


Obrázek 87 Příčný řez referenčním trámkem, 20x zvětšeno

Vzorky uložené ve vodě při 20 °C

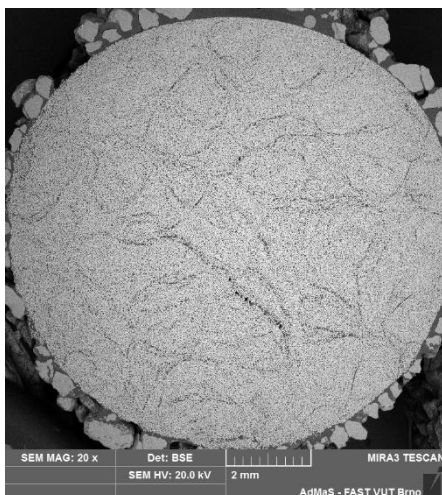


Obrázek 88 Příčný řez přímou výztuží uloženou 1000 h ve vodě při 20 °C, 20x zvětšeno

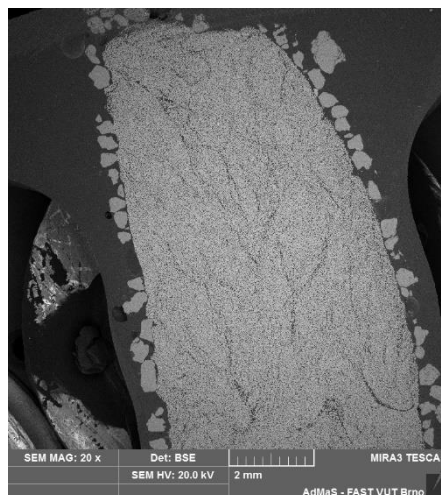


Obrázek 89 Příčný řez trámkem uloženým 1000 h ve vodě při 20 °C – přímá část, 20x zvětšeno

Vzorky uložené v alkal. roztoku při 40 °C

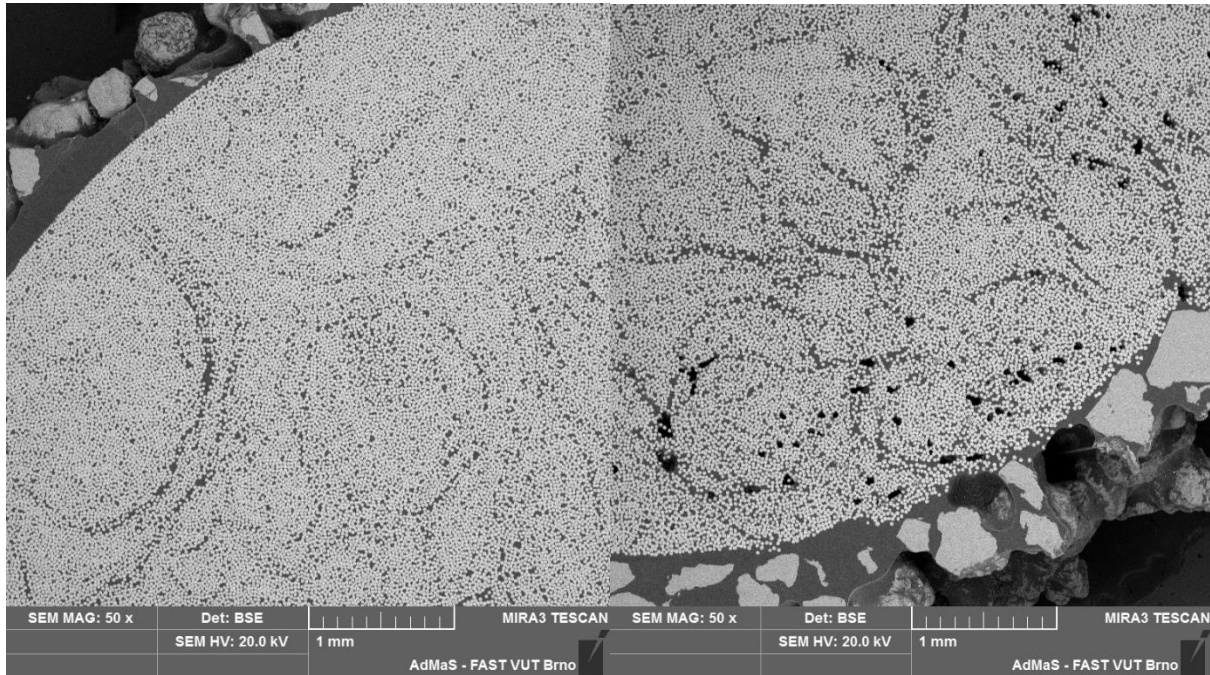


Obrázek 90 Příčný řez přímou výztuží uloženou 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C, 20x zvětšeno



Obrázek 91 Příčný řez trámkem uloženým 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C – ohyb, 20x zvětšeno

Na jednom ze vzorků třmínku (Obrázek 92 vpravo) je také zaznamenán zvýšený výskyt dutin při okraji průřezu výztuže.



Obrázek 92 Příčný řez vzorky uloženými ve vodě při 20 °C po dobu 1000 h – vlevo: přímá výztuž, vpravo: třmínek, zvětšeno 50x

Shrnutí pozorování elektronovou mikroskopií

Stejně jako u optického pozorování nebyl pozorován vliv uložení v agresivním prostředí po dobu 1000 hodin na samotné tělo výztuže. Je zde však pozorován vliv výroby třmínků pomocí ohýbání přímých prutů. U třmínků je patrné zvětšení mezer mezi svazky vláken vyplněných pryskyřicí. Na jednom vzorku byl sledován zvýšený výskyt dutin při okraji průřezu. Tyto nehomogenity mohou být jedním ze zdrojů zhoršení mechanických vlastností ohýbaných výztuží.

IV ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá studií vlastností ohýbaných FRP výztuží. V teoretickém úvodu práce popisuje způsoby výroby ohýbaných FRP prvků. Je zde zmíněna technologie pultruze a speciální technologie pro výrobu ohýbaných FRP výztuží s termoplastickou nebo termosetovou maticí. Dále jsou uvedeny konkrétní příklady použití ohýbaných FRP výztuží v konstrukcích přístávacích drah, železnice, mostu, pobřežních staveb a portálových stěn tunelů. Závěr teoretické části je zaměřen na různé vlivy, které mohou ovlivňovat vlastnosti výztuže, jako jsou např. teplota, UV záření, alkálie, chloridy, vlhkost a mechanické namáhání.

Praktická část diplomové práce sestává ze tří etap. V první etapě je provedena rešerše možností testování mechanických vlastností a trvanlivosti ohýbaných FRP výztuží. V této etapě jsou popsány dostupné normy pro testování pevnosti v tahu ohýbaných výztuží, norma pro testování účinku poloměru ohybu na pevnost v tahu výztuže a pozornost je zde zaměřena také na normy upravující pevnost v tahu přímých výztuží pro stanovení referenčních hodnot. Dále je zde popsána zrychlená zkušební metoda pro testování odolnosti FRP materiálů proti alkáliím a na závěr jsou stručně zmíněny normy upravující testování dlouhodobých mechanických vlastností FRP výztuží.

Na základě předchozích poznatků z první etapy proběhl ve druhé etapě návrh experimentu pro sledování trvanlivosti ohýbaných FRP výztuží včetně charakteristiky FRP výztuží a použitého betonu. Proveditelnost tohoto návrhu byla ověřována pomocí I. experimentu s U-konfigurací vzorků. Ve II. a III. experimentu se testovala jak U-konfigurace, tak L-konfigurace a zjistilo se, že U-konfigurace se jeví jako méně vhodná kvůli vysokému rozptylu hodnot a nerovnoměrně vyvozanému napětí na jednotlivých prutech třmínků. Z tohoto důvodu se pro experimenty ve třetí etapě zvolila L-konfigurace, kde se navíc i příprava vzorků ukázala jako jednodušší. Nevýhodou této konfigurace zkoušky je nemožnost připevnění indukčnostních snímačů dráhy a chybí tedy záznam posunů pro výpočet modulu pružnosti. V závěru druhé etapy je vyhodnocení dat získaných z dílčích experimentů. Cílem bylo použít vyhodnocená data jako referenční pro srovnání se vzorky vystavenými agresivním prostředím ve třetí etapě. K požadovanému porušení však došlo pouze u zlomku vzorků, který byl nedostatečný pro statistické vyhodnocení. Proto lze získané hodnoty bohužel považovat pouze za orientační.

Ve třetí etapě již probíhalo sledování trvanlivosti přímých a ohýbaných FRP výztuží pomocí navržené metody. Na úvod je popsán návrh a příprava agresivních prostředí, ve kterých byly vzorky naloženy po dobu 30 dní a 1000 hodin. Jednalo se o prostředí vody o teplotě 20 °C a alkalického roztoku při různých teplotách, a to 20 °C a 40 °C. Alkalický roztok, který má reprezentovat roztok v pórech betonu nasyceného vodou, vycházel z receptury normy

ACI 440.3R, kdy na 1 litr vody bylo použito 118,5 g $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 0,9 g NaOH a 4,2 g KOH. Průměrné hodnoty pH, kterých alkalické roztoky v nádržích dosahovaly byly 12,94 a 12,84, čímž došlo ke splnění požadované podmínky výsledného pH v rozmezí 12,6 – 13.

Po předepsané době uložení přímých a ohýbaných FRP vzorků v agresivních prostředích byly vzorky vyjmuty, opláchnuty, pozorovány a podrobeny destruktivním zkouškám pro stanovení trvanlivosti FRP výztuží a poklesu pevnosti v tahu ohýbaných výztuží v porovnání se vzorky přímých výztuží vystavených témuž agresivnímu prostředí. Získaná data ze zkoušek mechanických vlastností byla graficky vyhodnocena a můžeme z nich vyvodit následující závěry.

Pevnost v tahu přímých FRP výztuží klesá s rostoucí dobou expozice agresivnímu prostředí a zvyšující se teplotou agresivního prostředí. Tento pokles činil 5-9 % v závislosti na druhu a době vystavení agresivním prostředím. Nejvyšší poklesy vykazovaly vzorky vystavené alkalickému roztoku při 40 °C, kdy zvýšenou teplotou docházelo k urychlení degradace FRP výztuže.

Modul pružnosti přímých FRP výztuží v době expozice 30 dní a 1000 h agresivním prostředím nevykazuje zjevný trend. U všech exponovaných vzorků došlo k poklesu modulu pružnosti, nicméně tento pokles se pohyboval 0,5-2 % a je tedy řádově nižší oproti procentuálnímu poklesu pevností v tahu přímých FRP výztuží. Pro možnost vyhodnocení trendu změn lze doporučit další sledování hodnot modulů pružnosti po delších dobách expozice v agresivních prostředích.

Pevnost v tahu ohýbaných FRP výztuží exponovaných v agresivních prostředích vykazuje podobný trend jako pevnost v tahu přímých výztuží, je zde však zřetelnější dopad různých druhů agresivních prostředí. Vzorky umístěné ve vodě při 20 °C utrpěly v porovnání se vzorky umístěnými v alkalickém roztoku nejméně. U vzorků umístěných v alkalickém roztoku opět hrála roli teplota. Vzorky vystavené 40 °C dosahovaly nižších pevností než vzorky vystavené 20 °C.

Po otestování přímých a ohýbaných FRP výztuží bylo možné srovnat poměr pevností v tahu ohýbaných výztuží ku pevnosti v tahu přímých výztuží vystavených stejným podmínkám prostředí. Procentuální poměr hodnot střední tahové pevnosti ohýbané výztuže a střední tahové pevnosti přímé výztuže se pohyboval v rozmezí 53-63 % pevností přímých výztuží v závislosti na druzích a době expozice v souladu s předešlými výsledky.

Vzorky FRP výztuží byly po expozici agresivním prostředím podrobeny mikroskopickému pozorování pod optickým a elektronovým rastrovacím mikroskopem. Žádné z pozorování neprokázalo vliv uložení v agresivním prostředí po dobu 1000 hodin na samotnou vnitřní

strukturu výztuže, ale byla výrazně ovlivněna vrstva povrchové úpravy, a to zejména u ohýbaných výztuží. Pryskařice na povrchu třmíneků byla po vystavení agresivním prostředím v místech ohybu zdegradovaná a docházelo k jejímu roztékání. Tento problém byl nejčastěji zaznamenán v ohybech, které byly v blízkosti neošetřených řezů, jimiž mohlo agresivní médium snáze pronikat. Na snímcích ohýbaných vzorků byly dále zaznamenány póry v těle výztuže, zvlnění vláken při vnitřním okraji ohybu a dutiny na rozhraní povrchové úpravy a těla výztuže. Tyto všechny jevy přispívají ke snížení pevnosti v tahu ohýbaných FRP výztuží.

Pro další výzkum lze doporučit pokračování v testech trvanlivosti přímých a ohýbaných FRP výztuží v delším časovém horizontu – v intervalech do 18 měsíců expozice v agresivním prostředí. Dále doporučuji opakování testů mechanických vlastností ohýbaných FRP referenčních výztuží s větším počtem vzorků pro získání relevantních výsledků. Zároveň je zde prostor pro další optimalizaci této navržené zkušební metody, aby bylo možno měřit také přetvoření pro stanovení modulu pružnosti.

V ZKRATKY

- FRP – fiber reinforced polymer (polymer vyztužený vlákny)
- AFRP – aramid fiber reinforced polymer (FRP se aramidovými vlákny)
- BFRP – basalt fiber reinforced polymer (FRP se čedičovými vlákny)
- CFRP – carbon fiber reinforced polymer (FRP s uhlíkovými vlákny)
- GFRP – glass fiber reinforced polymer (FRP se skleněnými vlákny)
- E-CR sklo – speciální sklo s vysokou chemickou odolností, zejména v prostředí anorganických kyselin
- UP – unsaturated polyesters (nenasycené polyesterové pryskyřice)
- EP – epoxidové pryskyřice
- UV – ultra violet (ultrafialové záření)
- TBM – Tunnel Boring Machines (stroje pro ražbu tunelů)
- EDX – energiově disperzní analýza
- SEM – skenovací elektronový mikroskop

IV SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BODNÁROVÁ, Lenka. *Kompozitní materiály: Modul M01*. Studijní opory VUT FAST Brno. Brno, 2007.
- [2] RYJÁČEK, Pavel. *APLIKACE FRP POLYMERŮ PRO VYBAVENÍ ŽELEZNIČNÍCH MOSTŮ* [online]. Praha: Správa železniční dopravní cesty, 2016 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/107898367-Mostni-vzorovy-list-mvl-725-aplikace-frp-polymeru-pro-vybaveni-zeleznicnich-mostu.html>
- [3] Epoxy Pultrusion. *YouTube* [online]. Uživatel kanálu: Gavin Duo [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=se4qJNLbbI0>
- [4] IMJAI, Thanongsak, Reyes GARCIA, Maurizio GUADAGNINI a Kypros PILAKOUTAS. Strength Degradation in Curved Fiber-reinforced Polymer (FRP) Bars Used as Concrete Reinforcement. *Polymers*. 2020, **12**(8). ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym12081653
- [5] *FiReP®Rebar - FiReP -Durability for the future* [online]. [cit. 2020-11-04]. Dostupné z: <http://en.firepworld.com/products/firep-rebar>
- [6] *MST-BAR®: Maximum strength GFRP* [online]. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.bandbfrp.com/>
- [7] *TUF-BAR | Fiberglass Products: Wide Range of Applications* [online]. [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: <https://www.tuf-bar.com/application/>
- [8] WEBER, André. *Bewehrungsstab für den Betonbau und Verfahren zur Herstellung von Bewehrungsstäben*. Německo. EP1347114A2. Uděleno 24. 9. 2003.
- [9] LINDNER, Marco, Konrad VANSELOW, Sandra GELBRICH a Lothar KROLL. Fibre-reinforced polymer stirrup for reinforcing concrete structures. *Technologies for Lightweight Structures (TLS)*. 2020, **3**(1), 17-24. ISSN 2512-4587. Dostupné z: doi:10.21935/tls.v3i1.117
- [10] SPADEA, Saverio, John ORR a Kristin IVANOVA. Bend-strength of novel filament wound shear reinforcement. *Composite Structures*. 2017, **176**. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2017.05.032
- [11] FRKETIC, Jolie, Tarik DICKENS a Subramanian RAMAKRISHNAN. Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites. *Additive Manufacturing*. 2017, **14**, 69-86. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2017.01.003
- [12] ROUSSEAU, J., D. PERREUX a N. VERDIÈRE. The influence of winding patterns on the damage behaviour of filament-wound pipes. *Composites Science and Technology*. 1999, **59**(9), 1439-1449. ISSN 02663538. Dostupné z: doi:10.1016/S0266-3538(98)00184-5

- [13] Bendable thermoplastic composite reinforcements for concrete. *JEC Group* [online]. 2019 [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <http://www.jecomposites.com/knowledge/international-composites-news/bendable-thermoplastic-composite-reinforcements-concrete?fbclid=IwAR3juNjfyLkJYZeE6DG2LkIB4MPmDN-YkQMAjF5Su9bjEI3VNhmWLMps6Hw>
- [14] BECKER, David, Gilles FRANCOIS, Virginia BOZSAK a Peter MITSCHANG. Combining the Best of Two Polymer Worlds. *Kunststoffe*. Munich, 2016, **2016**(12).
- [15] EL-TAHAN, Mossab, Khaled GALAL a Van Suong HOA. New thermoplastic CFRP bendable rebars for reinforcing structural concrete elements. *Composites Part B: Engineering*. 2013, **45**(1), 1207-1215. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2012.09.025
- [16] JANÍČEK, Adam a Ondřej ŠILHAN. Technologie Soft-Eye-GFRP (Glass Fibre Reinforced Plastic) pro rozrážky tunelů metodou TBM. *Zakládání*. 2015, **XXVII**(2), 13. ISSN 1212 – 1711.
- [17] ŠILHAN, Ondřej. *KOMPOZITNÍ SYNTETICKÁ FRP VÝZTUŽ V POZEMNÍM STAVITELSTVÍ*. Dostupné také z: <http://fast10.vsb.cz/science/seminar2010/pics/16.pdf>
- [18] *CompositesWorld: A hidden revolution: composite rebar gains strength* [online]. [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/a-hidden-revolution-frp-rebar-gains-strength>
- [19] AHMED, Ehab, Brahim BENMOKRANE a Louis CRÉPEAU. *Field Testing of Hybrid-Reinforced Concrete Bridge Decks in Quebec*. The 2nd conference on Smart Monitoring Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, 2013.
- [20] BUSEL, John P. Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites Rebar. In: *ACMA* [online]. 2016 [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: <https://www.fdot.gov/docs/default-source/structures/gfrprebarworkshop/GFRPworkshop-2016-ACMA.pdf>
- [21] CERONI, Francesca, Edoardo COSENZA, Manfredi GAETANO a Marisa PECCE. Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members. *Cement and Concrete Composites*. 2006, **28**(10), 857-868. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.07.004
- [22] Fib Technical Report. *FRP reinforcement for RC structures – technical report on the design and use of fibre reinforced polymer reinforcement (FRP) for reinforced concrete structures*, Task Group 9.3 FRP (fibre reinforced polymer) reinforcement for concrete structures, July 2005 [draft].

- [23] ODAGIRI T., MATSUMOTO K., NAKAI H. Fatigue and relaxation characteristics of continuous aramid fibre reinforced plastic rods. In: *Proceedings of the third international symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures (FRPRCS-3)* Sapporo, Japan, vol. 2, 1997. p. 227–34.
- [24] TOMOSAWA, Fuminori, et al. Evaluation of ACM reinforcement durability by exposure test. In: *American Society of Mechanical Engineers, 17 th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering(USA)*,. 1998. p. 9.
- [25] KATO, Y., et al. Computational model for deterioration of aramid fibre by ultraviolet rays. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. 1997. p. 163-170.
- [26] SASAKI, Iwao, et al. Durability evaluation of FRP cables by exposure tests. In: *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Proceedings of the Third International Symposium*. 1997. p. 131-137.
- [27] UOMOTO, Taketo; NISHIMURA, Tsugio. Deterioration of aramid, glass, and carbon fibers due to alkali, acid, and water in different temperatures. *Special Publication*, 1999, 188: 515-522.
- [28] MICELLI, Francesco a Antonio NANNI. Durability of FRP rods for concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2004, **18**(7), 491-503. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.04.012
- [29] MACHIDA, A. State-of-the-art report on continuous fiber reinforcing materials. *Second Research Committee on CFRM, Japan Society of Civil Engineers: Concrete Engineering Series*, 1993, 3.
- [30] MUFTI, Aftab, et al. Studies of concrete reinforced with GFRP specimens from field demonstration projects. *ISIS Canada Research Network Technical Report*, 2005.
- [31] SAADATMANESH, H.; TANNOUS, Fares. Durability of FRP rebars and tendons. In: *Proc of 3rd int symposium, FRPRCS-3, JCI*. 1997. p. 147-54.
- [32] BANK, Lawrence C.; GENTRY, T. Russell; BARKATT, Aaron. Accelerated test methods to determine the long-term behavior of FRP composite structures: environmental effects. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1995, 14.6: 559-587.
- [33] HAYES, M. D., et al. The effects of moisture on the fatigue behavior of a glass/vinyl ester composite. In: *Second International Conference on Composites in Infrastructure National Science Foundation*. 1998.
- [34] WOLFF, R.; MIESSELER, H. J. Alternative materials for the reinforcement and prestressing of concrete. CHAPTER 6. Glass fiber prestressing system. *Publication of: BLACKIE ACADEMIC & PROFESSIONAL*, 1993.

- [35] PIGGOTT, Michael. *Load bearing fibre composites*. Springer Science & Business Media, 2002.
- [36] GERRITSE, A. Aramid-based prestressing tendons. *Alternative Materials for the reinforcement and prestressing of concrete*, 1993, 172-201.
- [37] SEN, Rajan, et al. Durability of aramid pretensioned elements in a marine environment. *Structural Journal*, 1998, 95.5: 578-587.
- [38] BUDELMANN, H.; ROSTASY, F. S. Creep Rupture Behavior of FRP Elements for Prestressed Concrete--Phenomenon, Results and Forecast Models. *Special Publication*, 1993, 138: 87-100.
- [39] *D7205/D7205M - 06 (Reapproved 2016) Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars*. ASTM International. 2016.
- [40] *ACI 440.3R-12 Guide Test Methods for Fiber- Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete and Masonry Structures*. ACI Committee 440. 2012.
- [41] *S806-02 Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers (Reaffirmed 2007)*. Canadian Standards Association. 2009.
- [42] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu: Část 2: Zkouška sednutím*. 05/2020.
- [43] ČSN EN 12350-6 *Zkoušení čerstvého betonu Část 6: Objemová hmotnost*. 05/2020.
- [44] ČSN EN 12350-7 *Zkoušení ztvrdlého betonu Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. 05/2020.
- [45] ČSN EN 12390-3 *Zkoušení ztvrdlého betonu Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 05/2020.
- [46] ČSN EN 12390-6 *Zkoušení ztvrdlého betonu Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. 05/2020.
- [47] *KEYENCE International: Digitální mikroskop Řada VHX-6000* [online]. [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/microscope/digital-microscope/vhx-6000/>
- [48] *SCANNING ELECTRON MICROSCOPE MIRA3. Kompass* [online]. [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://us.kompass.com/p/scanning-electron-microscope-mira3/4e847e5f-dc79-4b44-a29d-79617c8c6d92/>

IIV SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma výroby technologií pultruze (1 – zásoby rovingů, 2 – pryskyřičná lázeň, 3 – naváděcí lišta, 4 – destička odstraňující přebytečnou pryskyřici z vláken, 5 – nádobka s přebytečnou pryskyřicí, 6 – vyhřívaná vytvrzovací hlava, 7,8 – tažné zařízení, 9 – pila) [1]	14
Obrázek 2 Zásobník rovingů a navádění vláken [3]	15
Obrázek 3 Impregnace v otevřené lázni [3]	15
Obrázek 4 Tvarování a vytvrzování [3]	16
Obrázek 5 Hydraulické posuvníky [3]	16
Obrázek 6 Tvary komerčně dostupných prvků FRP výztuží [4].....	17
Obrázek 7 Vzorek FRP třmínku s plastovým bedněním [9].....	17
Obrázek 8 Schéma výrobního procesu (1 – odvíjení bednění z bubnového zásobníku, 2 – rozevření bednění pro umožnění plnění, 3 – plnění svazkem vláken prosycených pryskyřicí, 4 – návrat rozšířených konců bednění, 5 – trvale uzavřené bednění, 6 – vytvrzování v peci při teplotě 80-90 °C, 7 – tažení profilů, 8 – pila, 9 – dopravník pro další zpracování) [8]	18
Obrázek 9 Výroba strukturovaně uspořádané výztuže (vlevo – princip, uprostřed – spřádání vláken, vpravo – formování) [9]	19
Obrázek 10 Vzorek BFRP výztuže s porovnáním průměrů ohybu [9]	19
Obrázek 11 Armokoš vyrobený vinutím třmínků kolem přímých prutů [10].....	20
Obrázek 12 Porozita v laminovaných vrstvách a – uvnitř vrstvy, b – mezi vrstvami [12]	20
Obrázek 13 Pultruze prutu ze skleněných vláken a pryskyřice Elium [13].....	22
Obrázek 14 Předpínací FRP kabely s pryskyřicí Elium [13]	22
Obrázek 15 Vlevo: a) forma na tvarování výztuže, b) vytvořená výztuž; vpravo: schématický náčrt výroby výztuže delší než 380 mm [15]	23
Obrázek 16 Mikroskopický průřez CFRP výztuže ukazující dutinu způsobenou vzduchovými bublinami. [15].....	24
Obrázek 17 Mikroskopický podélný řez ukazující vzorky: a) nesprávné konsolidace v oblasti žebra výztuže a b) zlepšené konsolidace v oblasti žebra výztuže [15].....	24
Obrázek 18 Vyvazování FRP výztuže při rekonstrukci přistávací dráhy letiště ve Vídni [5]...	25
Obrázek 19 Aplikace FRP výztuže při rekonstrukci runwaye na letišti v Curychu [5]	26
Obrázek 20 Výstavba železničních pražců Miami-Dade MetroRail [18]	26
Obrázek 21 Geometrie mostu o pěti nosnících a) půdorys, b) příčný řez se znázorněnými typy výztuže (GFRP – žlutě, ocel – modře) [19]	27
Obrázek 22 Instalace výztuže mostovky Twin Bridges [19].....	27
Obrázek 23 Most Keys Bridge v Old Florida [20]	28

Obrázek 24 Sanovaný spodní líc mostovky s dovyztužením CFRP a GFRP [20]	28
Obrázek 25 Výstavba vlnolamů na Floridě [20].....	29
Obrázek 26 Průchod řezné hlavice portálem tunelu v Kuala Lumpur vyztuženým FRP výztuží [5].....	30
Obrázek 27 Armokoš hloubené stěny při výstavbě linky metra Circle Line v Singapuru [5]...30	
Obrázek 28 Armokoše pilotové stěny při výstavbě linky metra Downtown Line v Singapuru [5]	31
Obrázek 29 Vliv teploty na modul pružnosti (vlevo) a pevnost v tahu (vpravo) aramidových (AFBR) a uhlíkových (CFBR a CFST) výztuží [21].....	33
Obrázek 30 Degradace GFRP prutů vystavených různým typům alkalického prostředí a simulaci povětrnostních podmínek (G1 – výztuž s termoplastickou pryskyřicí a G2 – výztuž s polyesterovou pryskyřicí) [28]	34
Obrázek 31 Absorpční kapacita (G1 – výztuž s termoplastickou pryskyřicí a G2 – výztuž s polyesterovou pryskyřicí) [28]	35
Obrázek 32 Schéma metodiky práce.....	38
Obrázek 33 Geometrické uspořádání vzorku [39].....	39
Obrázek 34 Schéma vzorku pro zkoušku pevnosti v tahu [15].....	40
Obrázek 35 Konfigurace zkušebního vzorku [40].....	41
Obrázek 36 Schéma zkoušky tahu ohýbaného třmínku [40]	43
Obrázek 37 Konfigurace zkoušky pevnosti v tahu ohýbané části dle CSA S806 [41].....	44
Obrázek 38 Geometrie testovaných CFRP třmínků [15]	45
Obrázek 39 Uspořádání vzorků pro zkoušení ohýbaných výztuží dle CSA S806: a) schématický náčrt, b) reálné uspořádání [15]	46
Obrázek 40 Konfigurace testování účinku poloměru ohybu na pevnost v tahu výztuže [40] .47	
Obrázek 41 Schéma konfigurace I. experimentu	50
Obrázek 42 Schéma U-konfigurace II. a III. experimentu.....	51
Obrázek 43 Vzorek U-konfigurace před zkouškou	52
Obrázek 44 Schéma L-konfigurace II. a III. experimentu	53
Obrázek 45 Vzorek L-konfigurace před zkouškou	53
Obrázek 46 Vzorky kameniva frakce 8-16, 4-8 a 0-4 mm	54
Obrázek 47 Zkouška sednutí kužele.....	55
Obrázek 48 Vzorky GFRP před uložením do agresivních prostředí.....	57
Obrázek 49 Vzorky po zkoušce pevnosti přímých prutů v tahu – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C),.....	59
Obrázek 50 Vzorky po zkoušce pevnosti v tahu ohýbaných částí – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace.....	61

Obrázek 51 Typické porušení na začátku ohybu (vlevo), delaminace přímé části prutu u vzorku U_FRP-4 (vpravo)	61
Obrázek 52 Selhání vzorků prokluzem výztuže v upínací koncovce	64
Obrázek 53 Typické porušení na začátku ohybu + delaminace v přímé části u vzorku U-konfigurace (vlevo) a L-konfigurace (vpravo)	67
Obrázek 54 Vyjmuté a opláchnuté vzorky po 30 dnech v agresivním prostředí	71
Obrázek 55 Porušení vzorku vyčerpáním tahové únosnosti betonu.....	72
Obrázek 56 Porovnání výšky vzorku po 30denní expozici (vlevo) se vzorkem z předešlé sady (vpravo).....	72
Obrázek 57 Vnesení předpětí do betonového bloku pomocí profilů a závitových tyčí	73
Obrázek 58 Příklady porušení vzorků IV. sady: vzorek A1 – porušení betonu (vlevo), vzorek A5 – porušení FRP výztuže v ohybu + delaminace (vpravo).....	75
Obrázek 59 Vzorek B3 před zatěžováním – vychýlení výztuže v podélném směru.....	77
Obrázek 60 Porušení vzorků V. sady – selhání v ohýbané části + delaminace.....	77
Obrázek 61 Správné porušení vzorků VI. sady – selhání v ohýbané části + delaminace	79
Obrázek 62 Nesprávné porušení vzorku C3 – selhání v betonu	79
Obrázek 63 Porušení vzorků VII. sady	81
Obrázek 64 Porušení vzorků VIII. sady	83
Obrázek 65 Porušení vzorků IX. sady	85
Obrázek 66 Příprava vzorků pro optický a elektronový mikroskop	91
Obrázek 67 Digitální optický mikroskop KEYENCE VHX – 6000 [47]	92
Obrázek 68 Příčný řez referenční přímou výztuží uloženou na vzduchu, 20x zvětšeno	92
Obrázek 69 Příčný řez přímou výztuží uloženou 1000 h ve vodě při 20 °C, 20x zvětšeno	93
Obrázek 70 Příčný řez přímou výztuží uloženou 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C, 20x zvětšeno.....	93
Obrázek 71 Příčný řez třmínkem uloženým 1000 h ve vodě při 20 °C – přímá část, 20x zvětšeno	93
Obrázek 72 Příčný řez třmínkem uloženým 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C – přímá část, 20x zvětšeno	93
Obrázek 73 Příčný řez třmínkem uloženým 1000 h ve vodě při 20 °C – ohyb, 20x zvětšeno	93
Obrázek 74 Příčný řez třmínkem uloženým 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C – ohyb, 20x zvětšeno.....	93
Obrázek 75 Detail příčného řezu třmínkem uloženým 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C – ohyb, 200x zvětšeno	94
Obrázek 76 Ohyby třmínků po vystavení po dobu 1000 h vodě při 20 °C (vlevo) a v alkalickém roztoku při 40 °C (vpravo).....	95

Obrázek 77 Snímky povrchu přímých prutů po 1000 h, zleva: referenční (na vzduchu), ve vodě při 20 °C a v alkalickém roztoku při 40 °C, 20x zvětšeno	95
Obrázek 78 Snímky povrchu přímých částí třmínek uložených 1000 h ve vodě při 20 °C, 20x zvětšeno	96
Obrázek 79 Snímky povrchu přímých částí třmínek uložených 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C, 20x zvětšeno	96
Obrázek 80 Detail povrchu přímé části třmínku uloženého 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C, 200x zvětšeno	96
Obrázek 81 Podélný řez ohybem (vlevo) a rozšířením (vpravo) třmínku uloženým 1000 h ve vodě při 20 °C, 20x zvětšeno	97
Obrázek 82 Detaily podélného řezu vnější strany ohybu třmínku uloženého 1000 h ve vodě při 20 °C, 100x zvětšeno	97
Obrázek 83 Detail podélného řezu vnitřní strany ohybu třmínku uloženého 1000 h ve vodě při 20 °C, 200x zvětšeno	98
Obrázek 84 Zvlnění vláken na vnitřní straně ohybu třmínek uložených 1000 h v alkalickém roztoku při 20 °C (vpravo, 20x zvětšeno) a 40 °C (vlevo).....	98
Obrázek 85 Skenovací elektronový mikroskop Tescan Mira 3 [48]	99
Obrázek 86 Příčný řez referenční přímou výztuží, 20x zvětšeno	100
Obrázek 87 Příčný řez referenčním třmínkem, 20x zvětšeno.....	100
Obrázek 88 Příčný řez přímou výztuží uloženou 1000 h ve vodě při 20 °C, 20x zvětšeno ..	100
Obrázek 89 Příčný řez třmínkem uloženým 1000 h ve vodě při 20 °C – přímá část, 20x zvětšeno.....	100
Obrázek 90 Příčný řez přímou výztuží uloženou 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C, 20x zvětšeno	100
Obrázek 91 Příčný řez třmínkem uloženým 1000 h v alkalickém roztoku při 40 °C – ohyb, 20x zvětšeno.....	100
Obrázek 92 Příčný řez vzorky uloženými ve vodě při 20 °C po dobu 1000 h – vlevo: přímá výztuž, vpravo: třmínek, zvětšeno 50x.....	101

IIX SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Porovnání mechanických vlastností epoxidové pryskyřice a pryskyřice Elium [14]	21
Tabulka 2 Souhrn trvanlivosti FRP výztuží v betonu vystavenému agresivním prostředí [21]	36
Tabulka 3 Výsledky testování pevnosti ohybu třmínků CFRP výztuže z termoplastické pryskyřice [15]	46
Tabulka 4 Klasifikace podle sednutí kužele [42]	55
Tabulka 5 Naměřené a vypočítané hodnoty pro stanovení objemové hmotnosti čerstvého betonu	56
Tabulka 6 Naměřené a vypočítané hodnoty pro stanovení objemové hmotnosti zatvrdlého betonu	56
Tabulka 7 Naměřené a vypočítané hodnoty pro stanovení pevnosti v tlaku po 6 dnech	56
Tabulka 8 Naměřené a vypočítané hodnoty pro stanovení pevnosti v příčném tahu po 6 dnech	57
Tabulka 9 Koeficient 5% kvantilu charakteristické hodnoty pro normální rozdělení	58
Tabulka 10 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C)	59
Tabulka 11 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C)	60
Tabulka 12 Popis porušení zkoušených vzorků – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace	61
Tabulka 13 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů – II. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C)	65
Tabulka 14 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí – II. a III. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U + L-konfigurace	66
Tabulka 15 Popis porušení zkoušených vzorků – II. a III. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U + L-konfigurace	67
Tabulka 16 Výpočet složení alkalického roztoku dle ACI 440.3R	71
Tabulka 17 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů – IV. sada: 30denní expozice (uložení ve vodě při 20 °C)	74
Tabulka 18 Popis porušení zkoušených vzorků – IV. sada: 30denní expozice (uložení ve vodě při 20 °C), L-konfigurace	74
Tabulka 19 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí – IV. sada: 30denní expozice (uložení ve vodě při 20 °C), L-konfigurace	75

Tabulka 20 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů –.....	76
Tabulka 21 Popis porušení zkoušených vzorků – V. sada: 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C), L-konfigurace.....	76
Tabulka 22 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí –.....	77
Tabulka 23 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů –.....	78
Tabulka 24 Popis porušení zkoušených vzorků – VI. sada: 30denní expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C), L-konfigurace.....	78
Tabulka 25 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí –.....	79
Tabulka 26 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů –.....	80
Tabulka 27 Popis porušení zkoušených vzorků – VII. sada: 1000 h expozice (uložení ve vodě při 20 °C).....	80
Tabulka 28 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí – VII. sada: 1000 h expozice (uložení ve vodě při 20 °C)	81
Tabulka 29 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů –.....	82
Tabulka 30 Popis porušení zkoušených vzorků – VIII. sada: 1000 h expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C).....	82
Tabulka 31 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí – VIII. sada: 1000 h expozice (uložení v alkalickém roztoku při 20 °C).....	83
Tabulka 32 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu přímých prutů –.....	84
Tabulka 33 Popis porušení zkoušených vzorků – IX. sada: 1000 h expozice (uložení v alkalickém roztoku při 40 °C)	84
Tabulka 34 Naměřené a vypočítané hodnoty zkoušky pevnosti v tahu ohýbaných částí –.....	85

IX SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Lineární závislost napětí a deformace v průběhu testování pevnosti v ohybu CFRP třmínku [15]	47
Graf 2 Průběh síly v závislosti na čase – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace	62
Graf 3 Průběh posunu jednotlivých prutů v závislosti na čase – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace	62
Graf 4 Průběh průměrného posunu v závislosti na síle – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace	63
Graf 5 Průběh posunu jednotlivých prutů v závislosti na síle – I. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace	63
Graf 6 Průběh síly v závislosti na čase – II. a III. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace	68
<i>Graf 7 Průběh posunu jednotlivých prutů v závislosti na čase – II. a III. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace</i>	<i>68</i>
<i>Graf 8 Průběh průměrného posunu v závislosti na síle – II. a III. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace</i>	<i>69</i>
<i>Graf 9 Průběh posunu jednotlivých prutů v závislosti na síle – II. a III. sada: referenční vzorky (uložení na vzduchu v laboratorním prostředí 20 °C), U-konfigurace</i>	<i>69</i>
Graf 10 Průběh zatěžování těles porušených vyčerpáním tahové únosnosti betonu	73
Graf 11 Vývoj střední tahové pevnosti přímých výztuží v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 a 40 °C)	86
Graf 12 Procentuální změna střední tahové pevnosti přímých výztuží v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 a 40 °C)	86
Graf 13 Vývoj středního modulu pružnosti přímých výztuží v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 °C a 40 °C)	87
Graf 14 Procentuální změna středního modulu pružnosti přímých výztuží v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 °C a 40 °C)	87
Graf 15 Vývoj střední tahové pevnosti ohýbaných výztuží v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 °C a 40 °C), pozn. modře podbarvené hodnoty jsou pouze orientační	88

Graf 16 Procentuální změna střední tahové pevnosti ohýbaných výztuží v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 °C a 40 °C), pozn. modře podbarvené hodnoty jsou pouze orientační	88
Graf 17 Procentuální poměr hodnot střední tahové pevnosti ohýbané výztuže a střední tahové pevnosti přímé výztuže při vystavení stejným podmínkám v závislosti na čase uložení (30 dní a 1000 h) v agresivním prostředí (voda při 20 °C, alkalický roztok dle ACI 440.3R při 20 °C a 40 °C), pozn. modře podbarvené hodnoty jsou pouze orientační.....	89

X SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Technický list CEM I 42,5 R Mokrá

Příloha č. 2: Technický list Mapei Dynamon SF Advanced 36