



**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 FRP KOMPOZITNÍCH  
MATERIÁLŮ PRO VYZTUŽOVÁNÍ BETONU**

STUDY OF FRP FOR CONCRETE REINFORCEMENT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Aneta Blahová

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2022



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Aneta Blahová
Název	Studium vlastností FRP kompozitních materiálů pro vyztužování betonu
Vedoucí práce	doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

---

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

---

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

## PODKLADY A LITERATURA

- 440.3R-12 Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, 2012.
- ACI PRC-440-07 Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, , ACI Committee 440, 2007.
- Yan, F., Lin, Z., Yang, M. Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review, Composites Part B: Engineering, 98, pp. 56-69, 2016. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.04.068.
- Fava, G., Carvelli, V., Pisani, M.A. Remarks on bond of GFRP rebars and concrete, Composites Part B: Engineering, 93, pp. 210-220, 2016, ISSN 1359-8368. DOI:10.1016/j.compositesb.2016.03.012.
- ASTM D7205 / D7205M – 06 Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars, 2016.
- ČSN EN 13706-2 Vyztužené plasty (kompozity) - Specifikace pro tažené profily - Část 2: Metody zkoušení a obecné požadavky, 2009.
- Bodnárová, L. Kompozitní materiály, studijní opora, Vysoké učení technické v Brně, FAST.
- Sborníky z tuzemských a zahraničních konferencí (2018-2021).
- Další související české a zahraniční technické normy.
- Internetové zdroje (např. databáze Web of Science, Scopus).

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Kompozitní materiály s polymerní matricí a dlouhovláknovou výztuží (FRP) jsou využívány ve speciálních aplikacích, zejména v konstrukcích s vysokým stupněm zátěže vlivem působení agresivních prostředí. Nejčastěji jsou používány FRP přímě profily, ohýbané FRP profily jsou v současné době předmětem intenzivního výzkumu.

V diplomové práci se zaměřte na možnosti použití FRP kompozitních materiálů pro vyztužování betonů, především možnosti použití ohýbaných FRP výztuží. Uveďte konkrétní příklady jejich aplikace v konstrukcích. Proveďte rešerši možností testování vlastností ohýbaných FRP výztuží. Proveďte experimentální ověření sledování změn vlastností přímých a ohýbaných FRP výztuží při uložení v alkalickém prostředí a ve vodě při teplotě 20 °C a 40 °C. Sledujte vliv působení agresivních prostředí na trvanlivost FRP. Proveďte vyhodnocení změn mechanických vlastností FRP výztuží v čase. Dokumentujte stav výztuží pomocí optické a elektronové mikroskopie.

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

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem ohýbaných FRP výztuží. Popisuje způsob výroby ohýbaných FRP výztuží, příklady aplikace FRP výztuží v konstrukcích a zmiňuje agresivní vlivy ovlivňující trvanlivost FRP výztuží. Dále je navržen experiment pro sledování změn u přímých a ohýbaných FRP výztuží uložených ve vodním prostředí při 20 °C a alkalickém prostředí při 20 °C a 40 °C. Výstupem diplomové práce je vyhodnocení změn mechanických vlastností a trvanlivost. Stav FRP výztuží je dokumentován pomocí optické a elektronové mikroskopie.

## KLÍČOVÁ SLOVA

FRP kompozitní výztuž, ohýbaná FRP výztuž, třmínky, trvanlivost, alkalické prostředí, agresivní prostředí, pevnost v tahu, elektronová mikroskopie, optická mikroskopie, přímé FRP výztuže

## ABSTRACT

The diploma thesis aims to analyze bent FRP reinforcements. It describes the method of production of bent FRP reinforcement, examples of application of FRP reinforcement in structures and mentions aggressive influences influencing the durability of FRP reinforcement. Furthermore, an experiment is proposed to monitor changes in straight and bent FRP reinforcement stored in an aqueous environment at 20 °C and an alkaline environment at 20 °C and 40 °C. The output of the diploma thesis is the evaluation of changes in mechanical properties and durability. The condition of the FRP reinforcement is documented using optical and electron microscopy.

## KEYWORDS

FRP composite reinforcement, bent FRP reinforcement, stirrups, durability, alkaline environment, aggressive environment, tensile strength, electron microscopy, optical microscopy, straight FRP reinforcement

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Aneta Blahová *Studium vlastností FRP kompozitních materiálů pro vyztužování betonu*. Brno, 2022. 113 s., 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 PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Studium vlastností FRP kompozitních materiálů pro vyztužování betonu* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2022

---

Bc. Aneta Blahová

autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji své vedoucí diplomové práce doc. Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi velmi pomohly při vypracování této diplomové práce. Také děkuji panu Ing. Juraji Lagiňovi a panu Ing. Jiřímu Klímovi za spolupráci v praktické části.

# OBSAH

ÚVOD.....	10
CÍL PRÁCE.....	11
1 Teoretická část.....	12
1.1 Složky FRP kompozitních materiálů .....	12
1.1.1 Vlákna.....	12
1.1.1.1 Skleněná vlákna (GFRP) .....	13
1.1.1.2 Uhlíková vlákna (CFRP) .....	14
1.1.1.3 Aramidová (kevlarová) vlákna (AFRP).....	14
1.1.1.4 Čedičová vlákna (BFRP) .....	15
1.1.2 Matrice.....	16
1.1.2.1 Epoxidová pryskyřice .....	17
1.1.2.2 Vinylesterová pryskyřice .....	17
1.1.2.3 Polyesterová pryskyřice.....	17
1.2 Výroba FRP kompozitních materiálů .....	18
1.2.1 Pultruze.....	18
1.2.2 Výroba ohýbaných prvků .....	20
1.2.2.1 Ohýbané FRP výztuže ve ztraceném bednění („husí krk“) .....	20
1.2.2.2 Pletené FRP výztuže .....	22
1.2.2.3 Vinuté FRP výztuže .....	23
1.3 Aplikace FRP výztuží .....	23
1.3.1 Mostní konstrukce .....	24
1.3.2 Ostění tunelů z GFRP (Soft-eyes) .....	26
1.3.3 Parkovací domy .....	27
1.3.4 Vodní nádrže.....	28
1.4 Trvanlivost FRP výztuží, vlivy způsobující degradaci FRP výztuží .....	29

1.4.1	Vliv vodního prostředí.....	29
1.4.2	Vliv chloridů.....	30
1.4.3	Vliv alkálií.....	30
1.4.4	Vystavení alkalickému roztoku – vlákna.....	31
1.4.5	Vystavení alkalickému roztoku – pryskyřice.....	32
1.4.6	Expozice alkáliím při mechanickém namáhání.....	32
1.4.7	Působení alkálií při zvýšené teplotě.....	33
1.4.8	UV záření.....	34
1.4.9	Tepelné působení.....	34
1.4.10	Karbonatace.....	35
2	Praktická část.....	36
2.1	Metodika práce.....	36
2.2	Postupy zkoušek na FRP výztužích.....	37
2.2.1	Pevnost v tahu přímých výztuží.....	38
2.2.1.1	Pevnost v tahu přímých výztuží dle ASTM D7205.....	38
2.2.1.2	Pevnost v tahu přímých výztuží dle CSA S806.....	39
2.2.2	Pevnost v tahu ohýbaných výztuží.....	41
2.2.2.1	Pevnost v tahu ohýbaných výztuží dle ACI 440.3R.....	41
2.2.2.2	Pevnost v tahu ohýbaných výztuží dle CSA S806.....	46
2.2.3	Účinek poloměru ohybu dle ACI 440.3R.....	48
2.2.4	Možnosti testování trvanlivosti.....	51
2.2.4.1	Zrychlená zkušební metoda testování odolnosti FRP výztuží vůči alkáliím.....	51
2.2.4.2	Dlouhodobé mechanické vlastnosti FRP výztuží.....	55
2.3	Popis zkoušených výztuží.....	56
2.4	Popis agresivního prostředí.....	56
2.5	Pevnost v tahu – přímé vzorky.....	57



2.6 Pevnost v tahu – ohýbané vzorky .....	69
2.7 Porovnání pevností přímých a ohýbaných prvků .....	87
2.8 Vliv působení agresivního prostředí .....	89
2.8.1 Optická mikroskopie.....	90
2.8.2 Elektronová mikroskopie.....	96
Závěr.....	102
Seznam zkratk.....	104
Seznam použitých zdrojů.....	105
Seznam obrázků.....	107
Seznam tabulek.....	111
Seznam grafů .....	112

## ÚVOD

Kompozitní výztuže z polymerů vyztuženými vlákny (Fibre Reinforced Polymers, dále jen FRP) se začaly vyrábět v 60. a 70. letech 20. století. Jedná se o materiál, který ve srovnání s ocelovou výztuží nekoroduje, odolává chloridům, alkáliím, je netečný vůči působení elektromagnetického záření a je v mnoha agresivních prostředí trvanlivější. Novým prvkem na trhu jsou ohýbané FRP výztuže. Mezi jejich přednosti patří možnosti tvarování a využití v mnoha dalších sektorech (armokoše, tvarované třmínky atd.). Vzhledem k faktu, že se jedná o relativně novou technologii, nejsou vyřešeny problémy týkající se ohýbaných částí, které mohou snižovat mechanické vlastnosti, nebo trvanlivost.

## **CÍL PRÁCE**

Cílem této diplomové práce je sumarizace informací o problematice užití kompozitních materiálů s polymerní matricí a dlouhvláknovou výztuží (FRP – Fibre Reinforced Polymer). Práce se primárně zaměřuje na možnosti využívání ohýbaných FRP výztuží a jejich aplikace v konstrukcích. Dále se věnuje možnostem testování přímých a ohýbaných FRP výztuží. S tím úzce souvisí trvanlivost FRP výztuží. Následně se práce soustředí na experimentální ověření FRP výztuží uložených v alkalickém prostředí a ve vodě při teplotě 20 °C a 40 °C. Následuje vyhodnocení změn mechanických vlastností FRP výztuží v čase a výsledný stav FRP výztuží se dokumentuje pomocí optické a elektronové mikroskopie.

# 1 Teoretická část

FRP kompozitní výztuže jsou primárně vyvíjeny pro vyztužování betonů a předpjatých betonových konstrukcí. V USA se poprvé FRP výztuže objevily v 60. letech 20. století a v Evropě a Japonsku v 70. letech 20. století. Všeobecná úroveň výzkumu rostla a během 80. let 20. století FRP výztuže získaly vysokou pozornost v Japonsku, kde během 90. let 20. století byla vytvořena první nosná konstrukce pro vlaky fungující na magnetickou levitaci. Japonsko také představilo jako první v roce 1996 design pro FRP železobeton. Od té doby se využívání FRP výztuží znatelně rozšířilo a používá se po celém světě. Nejčastěji se FRP výztuž používá v betonových konstrukcích, jelikož odolávají lépe korozi a jsou netečné vůči elektromagnetickému působení. [1]

## 1.1 Složky FRP kompozitních materiálů

Kompozitní materiály jsou vyráběny ze dvou a více materiálů. Kombinací těchto materiálů se získá zcela nový materiál, tzv. kompozit, který disponuje novými a lepšími vlastnostmi, které materiály samy o sobě neměly. Kompozit se skládá primárně z vláken a pryskyřice. Doplnuje se plnivý, přísadami, nebo povrchovou úpravou. Vlákná ve výztuži přispívají mechanickým vlastnostem díky vysokému modulu pružnosti. Pryskyřice plní funkci roznášení napětí mezi vlákny a chrání před mechanickým působením a vnějšími vlivy (UV záření, agresivní prostředí a další). Mohou být přidány i přísady, které upravují a zlepšují mechanické a fyzikální vlastnosti kompozitu. [1]

Ve srovnání s ocelí má FRP výztuž nižší hmotnost a vyšší sílu. Nicméně jeho mechanické vlastnosti jsou oproti ocelové výztuži lineárně elastické bez významného stupně poddajnosti, což vede ke snížení rychlosti deformace a prodloužení při porušení. Dále modul pružnosti není tak vysoký jak u oceli (s výjimkou některých CFRP výztuží, které mají vysoký Youngův modul). [1]

### 1.1.1 Vlákná

Jednou ze dvou hlavních složek FRP výztuží jsou vlákna. Jak již bylo řečeno, hlavní funkcí vláken v FRP výztužích je zlepšit mechanické vlastnosti. Pro tyto účely se využívají čtyři druhy vláken, které jsou:

- GFRP – Skleněná vlákna
- CFRP – Uhlíková vlákna

- AFRP – Aramidová (kevlarová) vlákna
- BFRP – Čedičová vlákna

**Tabulka 1 Mechanické vlastnosti FRP výztuží a ocelové výztuže [1]**

Vlastnost	Druh materiálu				
	CFRP	GFRP	AFRP	BFRP	Ocel
Hustota (gm/cm <sup>3</sup> )	1.50-2.10	1.25-2.50	1.25-1.45	1.90-2.10	7.85
Pevnost v tahu (MPa)	600-3920	483-4580	1720-3620	600-1500	483-690
Youngův modul (GPa)	37-784	35-86	41-175	50-65	200
Prodloužení (%)	0.5-1.8	1.2-5.0	1.4-4.4	1.2-2.6	6.0-12.0
Koeficient lineární roztažnosti (10 <sup>-6</sup> /°C)	-9.0-0.0	6.0-10.0	-6.0-2.0	9.0-12.0	11.7

### 1.1.1.1 Skleněná vlákna (GFRP)

Skleněné vlákno je izotropní povahy a řadí se mezi nejpoužívanější materiál pro výrobu FRP výztuží. Nejčastěji se využívají následující druhy skleněných vláken: E-glass (electrical glass), S-glass (strength glass), C-glass (chemical glass) a AR-glass (alkali resistand glass). Vysoká pevnost, dobrá odolnost proti vodě a chemikáliím a nízká cena – to vše jsou hlavní přednosti skleněných vláken. Ve srovnání s ostatními typy FRP výztuží se skleněná vlákna využívají nejčastěji primárně kvůli nízké ceně. Nicméně, relativně nízký modul pružnosti, nízká odolnost vůči alkáliím s nízkou dlouhodobou pevností v důsledku přetržení napětím jsou hlavní nevýhody skleněných vláken. Případně pro lepší odolnost vůči alkáliím lze použít AR-glass. [1]



**Obrázek 1 GFRP výztuže [2]**

### 1.1.1.2 Uhlíková vlákna (CFRP)

Uhlíkové vlákno je v přírodě anizotropní materiál, který se vyrábí při 1300 °C. Mezi hlavní výhody patří nízká hustota, nízká vodivost, vysoká únavová pevnost, vysoký modul pružnosti, dobrá úroveň tečení, odolnost vůči chemickým vlivům a schopnost neabsorbovat vodu. Mezi negativa uhlíkových vláken patří nízká pevnost v tlaku a anizotropnost materiálu (snížená radiální pevnost). Dalšími nevýhodou je vysoká energetická náročnost na výrobu uhlíkových vláken, což vede ke zvýšení nákladů. [1]



Obrázek 2 CFRP výztuže [3]

### 1.1.1.3 Aramidová (kevlarová) vlákna (AFRP)

Aramidové vlákno je žluté barvy a v přírodě je anizotropní povahy. Jak již bylo zmíněno, synonymem pro aramidové vlákno je kevlarové vlákno. Aramidové vlákno je oproti skleněnému vláknu mnohem dražší, avšak dosahuje dostatečných pevností pro tahové aplikace, jako jsou lana a kabely. Dalšími vlastnostmi jsou nízká pevnost v tlaku, nízká hustota, vysoká pevnost v tahu, vysoký modul pružnosti a vhodná tuhost. [1]

Tyto vlákna se používají pro statické a nárazuvzdorné konstrukce. Jeho účinnost je však omezena z důvodu nízké dlouhodobé účinnosti pevnosti (roztrhne se napětím) a také nízkou radiální pevností. Další slabinou aramidových vláken je obtížnost při řezání a zpracování. Existuje několik typů kevlarových vláken s různými charakteristickými vlastnostmi jako je: Kevlar-29, Kevlar-49, Kevlar-149, Technora H, Twaron a Twaron HM. [1]



Obrázek 3 AFRP výztuže [4]

#### 1.1.1.4 Čedičová vlákna (BFRP)

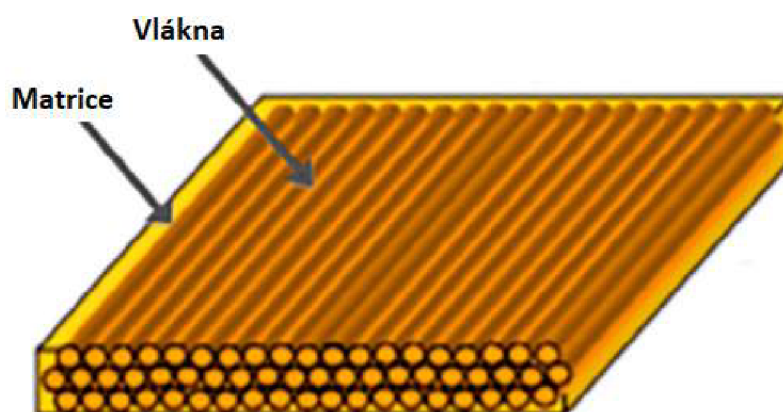
Čedičové vlákno je ve své podstatě vyvřelá hornina, která vzniká rychlým ochlazením lávy na zemském povrchu. Výroba čedičových vláken je obdobná jako u skleněných vláken, kdy drcené čedičové kameny jsou jedinými vstupními surovinami pro výrobu čedičového vlákna. Čedičová vlákna jsou na trhu nejkratší dobu. Jejich přednostmi je vysoká pevnost v tahu, perfektní rezistenci vůči vysokým teplotám a dobrá životnost. Dalšími klady je netečnost vůči elektromagnetickým vlivům, odolnost vůči korozi, kyselinám, UV záření a vibracím. Ve srovnání se skleněnými, uhlíkovými a aramidovými vlákny jsou čedičová vlákna využívaná v oblasti civilních staveb stále omezená. [1]



Obrázek 4 BFRP výztuž s ukázkou vláken [21]

### 1.1.2 Matrice

V závislosti na typu FRP výztuže se vlákna kombinují s matricí složenou z pryskyřice, plniv a přísad. Pryskyřice je hlavní složkou matrice. Rozlišují se dva druhy a to: termosetové a termoplastické polymerní materiály. Termosetové pryskyřice jsou běžnější pro výrobu FRP kompozitů. Oproti tomu termoplastické pryskyřice po vytvrzení již nelze znovu zahřát, nebo přetvořit. Termosety nabízí vysokou tuhost, rozměrovou a tepelnou stabilitu, vysokou odolnost vůči elektrickým, chemickým a rozpouštědlovým vlivům. [1]



Obrázek 5 Typická struktura FRP výztuží [1]

Primární funkcí matrice je držet vlákna pohromadě, přenášet mezi nimi napětí a chránit je před vnějšími vlivy. [1]

Tabulka 2 Charakteristické vlastnosti termosetových pryskyřic [1]

Vlastnosti	Pryskyřice		
	Polyesterová	Epoxydová	Vinylesterová
Hustota (gm/cm <sup>3</sup> )	1.1–1.4	1.2–1.4	1.15–1.35
Pevnost v tahu (MPa)	34.5–104	55–130	73–81
Youngův modul (GPa)	2.1–3.45	2.75–4.10	3.0–3.5
Poissonův poměr	0.35–0.39	0.38–0.40	0.36–0.39
Nasycení %	0.15–0.60	0.08–0.15	0.14–1.3
Koeficient tepelné roztažnosti (10 <sup>-6</sup> /°C)	55–100	45–65	50–75



### 1.1.2.1 Epoxidová pryskyřice

Jedná se o druh syntetické pryskyřice. Může být využita jako lepidlo, nátěry, tavidlo, odlévací plast a jako matricová pryskyřice pro FRP výztuže. Jedná se o pryskyřici spadající do termosetů. [1]

Nižší smrštění a jednoduchá výroba činí epoxidovou pryskyřici vhodnou pro různé aplikace. Ve srovnání s termosetovou polyesterovou pryskyřicí má epoxidová pryskyřice obecně dobré vlastnosti jako jsou výborná tepelná a chemická odolnost, zejména vůči alkáliím. Epoxidové pryskyřice jsou nejvíce využívanými pryskyřicemi pro dobré mechanické vlastnosti, odolnost proti korozi a životnost. [1]

### 1.1.2.2 Vinylesterová pryskyřice

Touto termosetovou pryskyřicí lze nahradit epoxidovou a polyesterovou pryskyřicí. Co se týče pevnosti, vlastností a celkových nákladů, je vinylesterová pryskyřice průměrem mezi epoxidovou a polyesterovou. Nejčastěji se tato pryskyřice používá pro námořní průmysl, díky antikorozním vlastnostem a schopnosti odolávat absorpci vody. Vzhledem ke zvyšování pevnosti je opět průměrem mezi epoxidovou a polyesterovou. Dosahuje vyšších pevností než polyesterová pryskyřice a nižších než epoxidová pryskyřice. Vinylová pryskyřice se často používá v laminovacích a opravárenských materiálech díky své hydroizolaci a spolehlivosti. [1]

### 1.1.2.3 Polyesterová pryskyřice

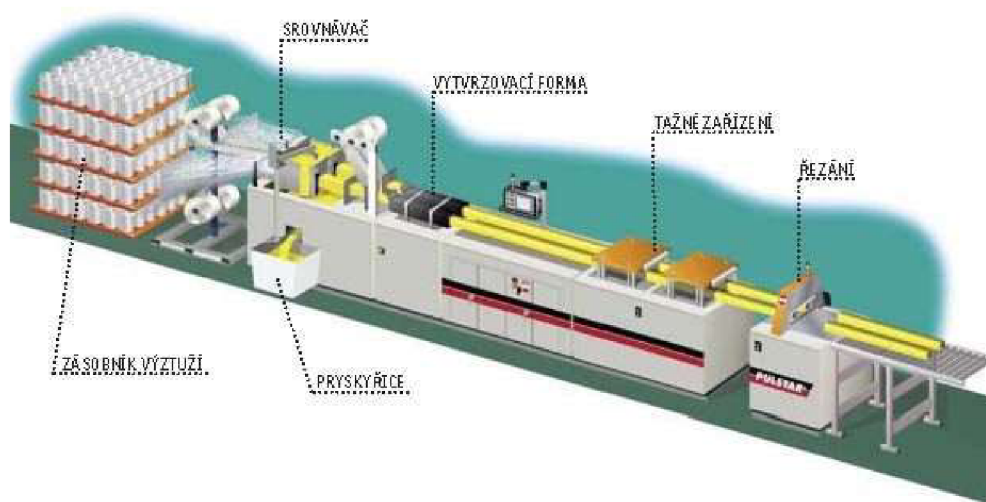
Polyesterová pryskyřice je velmi široce používána v FRP kompozitech díky nízké ceně, antikorozní ochraně, rychlému vytvrzování a toleranci teplot. Přesto má slabé vlastnosti, jako je nízký modul pružnosti a možnost způsobení tečení. Polyesterová pryskyřice se prodlouží o 1 až 2 %, zatímco například epoxidová pryskyřice se prodlouží o 3,5 až 4,5 % než dojde k přetrhnutí. [1]

## 1.2 Výroba FRP kompozitních materiálů

FRP kompozitní materiály se mohou vyrábět mnoha způsoby, jako jsou například: pultruze, ovíjení, lití do formy, ruční laminování, SMC (Sheet Moulding Compound), BMC (Bulk Moulding Compound), lisování a další. [6] Novým trendem jsou ohýbané FRP výztuže. Většina z nich je z termosetové pryskyřice.

### 1.2.1 Pultruze

Jedná se o výrobní proces kontinuální výroby, kdy výstupním produktem je výrobek o různých délkách a tvarech (například tyč, profil, laminát). Vstupními surovinami jsou vlákna a pryskyřice.



Obrázek 6 Schéma pultruzní linky pro výrobu FRP tyčí [6]

Vlákna ve formě rovingu vstupují do procesu přes srovnávací, který zajistí rovnoměrné rozložení vláken, aby nedošlo ke shlukům. Následuje namáčení vláken v pryskyřičné lázni (obsahem lázně mohou být i plniva, barviva, katalyzátory a další přísady zlepšující vlastnosti výsledného produktu). Před vstupem do vytvrzovací komory se vlákna spolu s pryskyřicí upraví na požadovaný průměr a tvar. Následuje zmíněná vytvrzovací komora, kde dojde k vytvrzení prutu. [6]



Obrázek 7 Začátek pultruzní linky pro výrobu FRP tyčí [7]

Z vytvrzovací komory vystupuje produkt ve formě např. nekonečné tyče, která je kontinuálně posouvána přes tažné zařízení a v poslední části řezaná na požadované délky. Jako možným přídavkem pro zlepšení vlastností FRP tyčí je povrchová úprava, kdy se povrch tyče ovíjí například nylonovou nití a následně se opískuje. [6]



Obrázek 8 Konečná část pultruzní linky pro výrobu FRP tyčí [7]

## 1.2.2 Výroba ohýbaných prvků

Ohýbané FRP výztuže se staly novým trendem a dostávají se do popředí teprve v posledních letech. Rozdělují se na tři významné skupiny:

- Ohýbané FRP výztuže na bázi termosetových pryskyřic
- Ohýbané FRP výztuže na bázi termoplastických pryskyřic
- Lisované FRP výztuže

Tato práce se primárně zaměřuje na ohýbané FRP výztuže na termosetové bázi. Ze zmíněných tří skupin se jedná o nejčastěji používané výztuže, které disponují oproti ostatním vyšší pevností. FRP výztuže na termosetové bázi se dělí na:

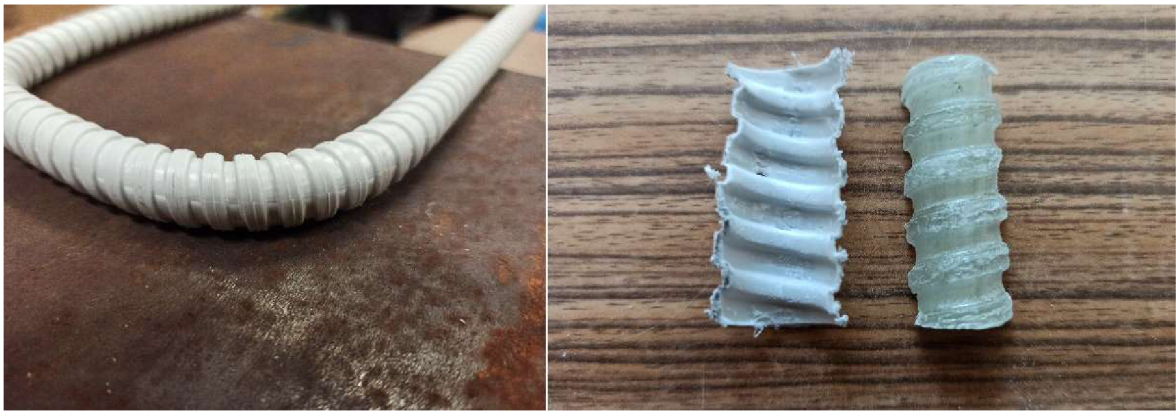
- Ohýbané FRP výztuže ve ztraceném bednění („husí krk“)
- Pletené FRP výztuže
- Tkané FRP výztuže



Obrázek 9 Příklady ohýbaných FRP třmínků [8]

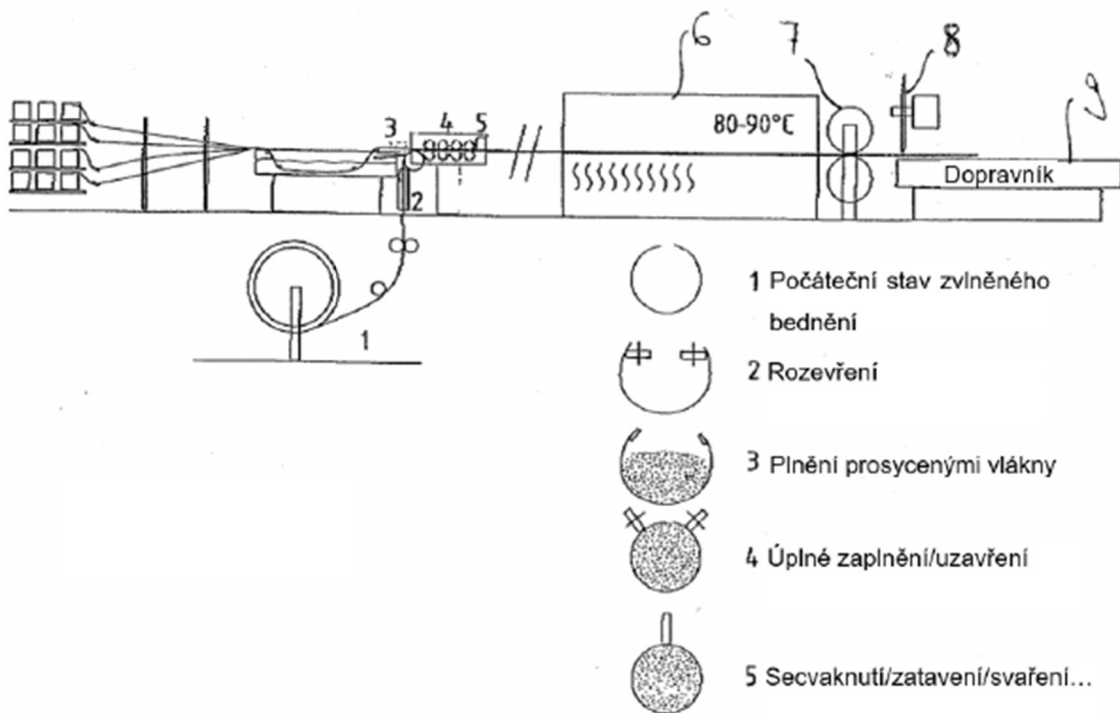
### 1.2.2.1 Ohýbané FRP výztuže ve ztraceném bednění („husí krk“)

Tento druh ohýbaných FRP výztuží je na bázi termosetové pryskyřice. Patent na tento výrobek získal SCHÖOCK BAUTEILE GmbH. Způsob výroby spočívá v protáhnutí impregnovaných vláken vlnitou trubkou, tzv. husím krkem, následně se trubka ohne do požadovaného poloměru a vytvrdí. Po vytvrzení je možné „husí krk“ odstranit, nebo jej ponechat jako ochranu výztuže. Výhoda ztraceného bednění spočívá ve variabilním profilování, vytvoření „žeber“ na povrchu struktury a možnosti až dodatečného vytvrzování. Jednotlivé poloměry zakřivení vzniklé při této technologii výroby jsou omezené na minimálně sedminásobek hodnoty průměru tyče. [9] [10]

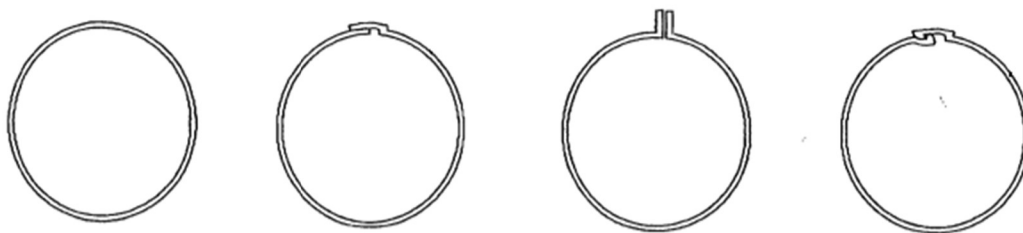


Obrázek 10 Vlevo-detail na ztracené bedněni a uzavření, vpravo-vzorek po odstranění ztraceného bedněni a ztracené bedněni [Aneta Blahová]

Na následujícím obrázku č. 11 lze vidět výrobní proces výztuží ve ztraceném bedněni. Z bubnového zásobníku je odvíjeno bedněni (1), které se rozevře (2) a je následně plněno naimpregnovanými vlákny (epoxidovou pryskyřicí) (3). Po zaplnění se konce bedněni uzavřou (4) a zataví se/secvaknou (5) proti případnému otevření. Poté vstupuje tento celek do vytvrzovací pece (6). Vytvrzování probíhá při teplotě 80 – 90 °C. Profil je z pece tažený (7) k pile (8), kde se řezou výztuže na potřebné délky. Poslední částí je pásový dopravník (9), přes který se výztuže přesouvají k dalšímu zpracování. [9]



Obrázek 11 Schéma výroby FRP výztuží ve ztraceném bedněni [9]



Obrázek 12 Možnosti uzavření ztraceného bednění [9]

### 1.2.2.2 Pletené FRP výztuže

Pro zlepšení vlastností v ohýbané části byl navrhnout design pro pletenou čedičovou výztuž, kde vnější vlákna leží rotačně v ohybu (viz. obr. č. 13 vlevo). Toto uspořádání vláken zajišťuje konstantní plošné napětí vláken v průřezu profilu, zabraňuje zvrásnění vrstev vláken ve vnitřní oblasti ohybu a umožňuje menší poloměr ohybu, než je sedminásobná hodnota průměru tyče. [10]

Tento vývoj je založen na komplexních zkouškách impregnace pryskyřicí a ovinování, ve kterých má být příze, která má dostatečně dobré kapilární působení pro impregnaci pryskyřicí a současně vysokou odolností proti mačkání a ohýbání příze proto, aby byla vhodná pro tvarování a splétání. V procesu splétání se motor umístí do definované polohy (viz. obr. č. 13 uprostřed). Mechanické vlastnosti čedičových vláken ve srovnání se skleněnými vlákny jsou vyšší Youngův modul a pevnost v tahu. Vrstvy vláken musí být přerovnány, aby se snížilo riziko fibrilace a aby vydržela větší namáhání během procesu práce s textilií. [10]



Obrázek 13 vlevo-schéma rotace přízí, uprostřed-motor na splétání přízí, vpravo-formování ohýbaných částí [10]

### 1.2.2.3 Vinuté FRP výztuže

Výroba vinutých FRP výztuží spočívá v ovíjení vláken impregnovaných pryskyřicí pod napětím okolo trnů, čímž se vytvoří uzavřené třmínky. Tato technologie je využívána pro výrobu armokošů, neboť výstupem jsou třmínky s obdélníkovým průřezem prutů a velkým poměrem šířky k tloušťce. Díky tomuto způsobu navíjení nedochází k mačkání vláken na vnitřní části ohybu, což vede k vyšším pevnostem v tahu. Tato technika výroby umožňuje menší poloměr ohybu než u předchozích dvou případů. [11]



Obrázek 14 Výroba armokoše vinutím okolo trnů [11]

## 1.3 Aplikace FRP výztuží

V posledních dekádách se FRP výztuže začaly prosazovat na trhu díky svým chemickým a mechanickým vlastnostem oproti ocelovým výztužím. Zejména se jedná o odolnost proti korozi, alkáliím, netečnosti vůči elektromagnetickému záření, bludným proudům, trvanlivosti, mechanickým vlastnostem a dalším přednostem. Oproti ocelovým výztužím jsou ale stále dražší položkou.

V poslední době přišla na trh nová technologie, která se zabývá výrobou ohýbaných výztuží. Tyto výztuže díky variabilním tvarům získaly nové postavení na trhu.

FRP výztuže se využívají díky své váze a snadnému demontování pro dočasné vyztužení konstrukcí, nebo jako trvalá výztuž, či jako kombinace spolu s ocelovou výztuží.

FRP výztuže se využívají pro mnoho typů stavebních konstrukcí. Nejčastěji se jedná o mosty, vozovky, železnice, přístávací dráhy, vlnolamy, vodní díla, tunelové ostění, ČOV

a mnoho dalších. V následujících podkapitolách byly vybrány zásadní stavební konstrukce, ale zároveň i méně všednější.

### 1.3.1 Mostní konstrukce

Koroze ocelových výztužných tyčí vystupuje jako významný faktor omezující životnost výztuže betonových mostů. V Severní Americe představuje koroze ocelové výztuže v betonových mostech vystavených rozmrazovacím solím a/nebo agresivnímu prostředí hlavní příčinu zhoršování stavu konstrukce, což vede k nákladným opravám, sanaci a rovněž k výraznému snížení životnosti. Podle zprávy ASCE z roku 2013, Report Card for America's Infrastructure, ASCE, byla téměř jedna desetina z 607 380 mostů v National Bridge Inventory klasifikována jako strukturálně nedostatečná. Z tohoto celkového počtu je více než 230 000 konvenční železobeton a 108 000 bylo postaveno z předpjatého betonu (NACE International). Zpráva dále uvádí, že na nedostatkové mosty po celých Spojených státech je zapotřebí 76 miliard dolarů na údržbu a kapitálové náklady na betonové mostovky a na jejich betonové spodní stavby. Problémy související s rozpínovou korozí lze vyřešit ochranou ocelových tyčí, nebo použitím nekorozivních FRP tyčí. [12]

Od konce 90. let 20. století se divize ministerstva dopravy (MT) v různých provinciích zajímala o stavbu odolnějších mostů s prodlouženou životností 75-150 let. Například ministerstvo dopravy Quebecu (MTQ, Kanada) provedlo ve spolupráci s Sherbrookskou univerzitou několik významných projektů využívajících rovné a ohýbané GFRP tyče v betonových palubních deskách a mostních svodidlech. Použití FRP tyčí jako výztuže pro betonový most poskytuje potenciál pro zvýšení životnosti a ekonomické i ekologické výhody. [12]

V posledních deseti letech byly tyče FRP použity na stovkách mostů po celé Kanadě a USA (viz. obr. č. 15). Tyto mosty byly navrženy s použitím kanadského předpisu pro navrhování dálničních mostů nebo specifikací AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications pro mostovky GFRP.RC (GFRP Reinforces Concrete) a dopravní zábradlí. Přímé a ohýbané GFRP pruty byly použity především jako vnitřní výztuž pro desku mostovky a/nebo pro betonová svodidla a nosníky těchto mostů. Mosty byly typu – deska na nosník, s hlavními nosníky buď z oceli, nebo z předpjatého betonu. Hlavní nosníky byly jednoduše podepřeny v rozpětích od 20,0 do 90,0 m. Mostovka byla 200 až 260 mm silná a betonová deska souvislá v rozpětích 2,3 až 4,0 m. Většina těchto mostů byla vyztužena



tyčemi GFRP v důsledku jejich relativně nízké ceny ve srovnání s jinými typy FRP výztuží (například uhlíkové, aramidové). [12]



**Obrázek 15** Vyztužování mostních konstrukcí (vlevo-Gateway Blvd/23<sup>rd</sup> Ave-Alberta (2009), vpravo-410 Overpass Bridge Quebec (2012) [12]

GFRP výztuž byla použita i ve formě kabelů na visutém mostě Nipigon v Kanadě. Tento most má kabelové rozpětí 112,8 m a 139 m. Paluba je široká 36,2 m a sestává z betonových panelů, které byly zcela vyztuženy GFRP pruty a neseny na příčných ocelových nosnících. GFRP výztuže byly použity k překonání problémů s expanzní korozi oceli a souvisejících problémů s poškozením a ke konstrukci odolného a bezúdržbového mostu. Deska mostovky byla navržena tak, aby vydržela významnou axiální tlakovou sílu způsobenou kabely a ohybovým momentem v důsledku živého a vlastního zatížení. [12]



**Obrázek 16** Visutý most Nipigon (On, Kanada) [12]

### 1.3.2 Ostění tunelů z GFRP (Soft-eyes)

GFRP tyče mohou být použity v tunelových aplikacích jako soft-eyes („ostění tunelu“), protože mají velmi vysokou pevnost v tahu, která může dosáhnout mnohem více než 1200 MPa. Kromě toho lze GFRP výztuže řezat pracovními nástroji, jako jsou pily, zařízení na pilování a vrtání a Tunnel Boring Machines (TBM). Tím se zabrání poškození nožových hlav a nezdrží se postup práce, protože hromadění nebo řezání GFRP-tyčí je bezproblémové. Výztuže jsou rozřezány na malé kousky, které nepoškozují kalové potrubí. [12]

Během výstavby tunelu si proražení ocelových výztužných stěn ražní jámy pomocí TBM vyžádalo rozsáhlé měření a přípravné práce. Anizotropie GFRP tyče je docela výhodné ve výkopových jámách pro počáteční a dokončovací procesy při automatizovaných ražbách, jako je TBM a protlačování trubek (viz. obr. č. 17 a). Použití GFRP tyčí ve vyztužených stěnách a pilotách jámy proto šetří čas a náklady na místě. Soft eyes se obvykle skládají z vrtaných pilot nebo membránových stěn, které jsou lokálně vyztuženy GFRP tyčemi a třmínky (viz. obr. č. 17 b, c). Úseky pod a nad ražbou tunelu jsou vyztuženy ocelovými pruty. V závislosti na preferencích projektanta a dodavatele jsou z GFRP tyčí vyrobeny plné obdélníkové sekce nebo vláknová výztuž těsněji navazuje na tunelovou sekci, což má za následek kruhové uspořádání GFRP článků a podobné úpravy pro vertikální tyče. Stavba odpovídajících armovacích klecí z GFRP tyčí na místě vyžaduje stejné pracovní postupy jako u totožné ocelové klece (viz. obr. č. 17 b). V poslední době byly tyče GFRP použity v různých tunelových projektech v Kanadě (South Tunnels, Keele Station, Hwy 407 Station - TTC Subway North Tunnels a Englington Crosstown LRT: Toronto, ON). Byly použity výztužné klece z GFRP tyčí o průměrech od 600 do 1100 mm. Třída III (60 GPa, CSA S807 – 10) 32,0 m svislé tyče byly použity s kontinuálními spirálami třída II (50 GPa, CSA S807 – 10) velikost č. 5 (16,0 mm) s roztečí 150 mm (viz. obr. 17 b, c). [12]



(a) TBM se prosekává skrz FRP-RC stěnu



(b) GFRP armované klece pro soft-eye



(c) Manipulace a zvedání GFRP soft-eye



(d) Soft-eye výztuže pro membránovou stěnu

Obrázek 17 (a) TBM, (b) armované koše z GFRP pro soft eye, (c) Manipulace s GFRP soft eye, (d) soft-eye pro membránovou stěnu [12]

### 1.3.3 Parkovací domy

Potřeba udržitelných struktur motivovala Public Works and Government Services Canada (PWGSC) k použití FRP tyčí jako vnitřní výztuže v aplikacích betonové infrastruktury. Jednou z nejdůležitějších úspěšných aplikací je použití GFRP tyčí při vyztužení parkovací garáže. Bylo dosaženo dohody mezi PWGSC a Sgerbrookskou univerzitou o rekonstrukci vnitřních konstrukčních desek parkovacího domu Laurier-Tach (Hull, Quebec) pomocí tyčí GFRP (obr. č. 18 vlevo). Konstrukce byla provedena dle kanadských norem CAN/CSA S806-02. Tento projekt umožnil přímé hodnocení v terénu a dlouhodobé sledování FRP kompozitních tyčí ve struktuře vystavené drsným podmínkám prostředí a zatížení. V roce 2010 byla navržena a postavena nová velká parkovací garáž (La Chancelière parking garage) o ploše 3000 m<sup>2</sup> v Quebec City s použitím GFRP tyčí jako hlavní výztuže. Tento návrh byl vyroben podle CAN/CSA-S413-07 pro parkovací konstrukce CAN/CSA S806-02 pro navrhování a konstrukci stavebních dílů s polymery vyztuženými vlákny. Obousměrné ploché desky La Chancelière měly maximální rozpětí asi 9,0 m. Tloušťka desek byla 250 mm a zvětšila se na 355 mm přes sloupy skrz padací panely (viz. obr. č. 18 vpravo). Zvětšená tloušťka přes sloupy byla věnována uspokojení děrovacích napětí kolem oblasti sloupů. Pevnost pro děrování obousměrných desek byla ověřena

pomocí nových rovnic pro děrování CAN/CSA S806-12, která byla kalibrována pomocí experimentálního zkoušení plného testování prováděného na Sherbrookské univerzitě. [12]



Obrázek 18 Vlevo-parkovací garáž Laurier-Taché, vpravo-parkovací garáž La Chanceliere [12]

#### 1.3.4 Vodní nádrže

Vyztužené betonové (RC) vodní nádrže se používají pro skladování a čištění odpadních vod již desítky let. Konstrukce těchto nádrží vyžaduje pozornost nejen na pevnostní požadavky, ale také na kontrolu trhlin a trvanlivost. RC konstrukce jako úpravny vody jsou vystaveny silně korozivnímu prostředí v důsledku používání chlóru k čištění odpadních vod před jejich vypuštěním. Proto se tyto konstrukce primárně navrhují z nekorozivních FRP tyčí. První celosvětová betonová chlorační nádrž na úpravu vody zcela vyztužená FRP tyčemi byla navržena v roce 2010 a stavba byla zahájena a dokončena v roce 2012. Projekt se nachází ve městě Thetford Mines (Quebec, Kanada) a je považován za jednu součást úpravní vody pro obec. Objem nádrže je 4500 m<sup>3</sup> a má rozměry 30,0 m šířka, 30,0 m délka a 5,0 m výška stěny. Konstrukčním systémem nádrže je obdélníková podzemní nádrž podepřená na vodorovném základu, který nese svíslé stěny a horní desku. Konstrukce nádrže byla provedena podle CAN/CSA S806 02, Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers. To zahrnovalo použití tyčí z GFRP s vysokým modulem pružnosti (třída III, CSA S807-10), jako hlavní výztuže pro základy, stěny a horní desku. Obrázek č. 19 ukazuje FRP tyče ve svíslých stěnách a pohled hotové FRP vyztužené vodní nádrže. Výsledky polních testů za skutečných provozních podmínek pro chování deformace FRP tyčí na různých místech v nádrži jsou označeny jako významná hodnota mínus 1,0 % konečné deformace. Závěrem lze konstatovat, že postup výstavby, provozuschopnost v reálných provozních podmínkách (tlak vody a zeminy) a výsledky

monitorování stěn a desek nádrže vyztužených FRP tyčemi z hlediska namáhání, praskání a průhybů byly velmi konzervativní a ve srovnání s nimi uspokojivé s požadavky na provozuschopnost a potřebnou pevnost. [12]



Obrázek 19 Vlevo-FRP vyztužování zdí, vpravo-vnější pohled na nádrž [12]

#### 1.4 Trvanlivost FRP výztuží, vlivy způsobující degradaci FRP výztuží

Termín trvanlivosti se používá k označení doby, po kterou daný materiál vydrží plnit svůj daný a požadovaný úkol v daném prostředí. Důležité faktory pro trvanlivost FRP výztuží se liší od faktorů u oceli. FRP materiály nejsou ovlivňovány chloridy a karbonatami, což snižuje alkalitu betonu. Ve skutečnosti mohou prodloužit jejich životnost, stejně jako použití pucolánů, které redukuje v betonu zásaditost. Následující kapitoly se zaměřují zejména na krátkodobé testování vzorků v různých expozičních prostředích. [13] [14]

##### 1.4.1 Vliv vodního prostředí

Trvanlivost FRP výztuží se studuje v různých podmínkách expozice. Nejčastěji se jedná o uložení na vzduchu při různých relativních vlhkostech a ponořením do agresivního prostředí při variabilních teplotách a napětí. Z těchto zkoušek se vyhodnocují změny v pevnosti a modulu pružnosti. [14]

Studie ukázaly, že může dojít k poškození polymerních pryskyřic vodou, která se chová jako změkčovadlo a narušuje van der Waalsovy síly v polymerním řetězci. To vedlo ke změně pevnosti, napětí, modulu pružnosti, selhání a houževnatosti. Přes to, že jsou pryskyřice potenciálně reversibilní, mohou způsobit bobtnavé napětí vedoucí k popraskání polymerní matrice, hydrolýze až rozpojování vláken a matrice. Dle studií může soudržnost

výztuže ovlivnit i druh vláken, neboť byly zaznamenány odlišné výsledky při užití různých typů vláken, ačkoli žádné studie výslovně nezkoumaly účinky vody na vlákna. [14]

#### 1.4.2 Vliv chloridů

Potenciál použití FRP výztuží je ve slaném prostředí, kde je pravděpodobné, že ocel bez dodatečné ochrany bude korodovat. Vědci zkoumali výrobky z polymerů vyztužených sklem, aramidem a uhlíkovými vlákny (GFRP, AFRP a CFRP) s různými systémy povrchové ochrany v různých koncentracích chlórů do 4 %. Používaly se namáhané a nenamáhané tyče vystavené při teplotě 70 °C s různou relativní vlhkostí. V některých případech byly uváděny efektivní doby zvětrávání větší než 50 let. [14]

Výsledky se značně liší a nejsou navrženy studie, které by rozlišovaly mezi působením chloridů a průvodní degradací v důsledku difúze vlhkosti a/nebo alkalického napadení vláken. Obecně lze říci, že CFRP tyče vykazují velmi malou degradaci s časem, expozicí nebo teplotou. Výztuže AFRP a GFRP mohou vykazovat snížení pevnosti a tuhosti až o 50 %, uvolnění předpětí až o 30 % a snížení momentu pružnosti u vyztužených nosníků až o 20 %. [14]

Je třeba zdůraznit, že zhoršení nelze primárně přičítat chloridům, nýbrž alkalickému napadení nebo plastifikace pryskyřice díky absorpci vody. Nicméně jsou důkazy o tom, že solný roztok působí agresivněji na FRP výztuže než sladká voda. [14]

#### 1.4.3 Vliv alkálií

Přestože je beton tradičně považován za ochranu ocelové výztuže, vysoká alkalita může ovlivnit skleněná vlákna v GFRP výztužích, pokud nejsou chráněná vhodnou polymerní pryskyřicí. Aramidová vlákna jsou považována za méně náchylná k napadení alkáliemi než sklo. Uhlíková vlákna mají vynikající odolnost vůči alkáliím. [14]

Alkalický vliv je nejrozšířenějším problémem odolnosti FRP výztuží, ale je třeba poznamenat, že neexistuje pouze jedna zkušební metoda a pouze jedna směs, což vede k odchylkám ve výsledcích a jejich důsledcích. V některých výzkumech byly FRP výztuže zabudovány do betonu ke studiu změny ve vlastnostech vazby, ale většina výzkumů používá

simulované betonové pórové roztoky obsahující NaOH<sub>2</sub>, KOH a nasycené Ca(OH)<sub>2</sub> o pH 12-13,5 a teplotě 20 - 80 °C. [14]

Mezi faktory ovlivňující rychlost degradace FRP výztuží alkáliemi patří:

- Náchylnost hladkých vláken k degradaci alkáliemi
- Alkalická difuzivita pryskyřice a tudíž úroveň ochrany poskytované vláknu
- Kvalita vazby vlákno-pryskyřice, kterou může alkálie pronikat a napadat vlákna
- Teplota, která ovlivňuje reakční rychlost a rychlost difúze
- Koncentrace alkálií (ovlivněná typem cementu)
- Mobilita alkalických iontů (ovlivněná stupněm nasycení)

#### 1.4.4 Vystavení alkalickému roztoku – vlákna

Studie Banks a kol., ponořili tyče z E-skla do roztoku hydroxidu (NH<sub>4</sub>OH) 30% při 23 °C, vlákna vykazala 12% ztrátu pevnosti v tahu. Analýza TGA ukázala zhoršení rozhraní matrice-vlákno. Steckel a kol. ponořili vzorky CFRP a GFRP do roztoku CaCO<sub>3</sub> o pH 9,5 při 23 °C na 125 dní. Vzorky nebyly ovlivněny kromě 10% snížení Youngova modulu pro jeden GFRP systém a 30% snížení pevnosti ve smyku krátkého nosníku pro jiný. [14]

Tannous a Saadatmanesh testovali jeden AFRP a dva CFRP vzorky ponořením do nasyceného roztoku Ca(OH)<sub>2</sub> při pH 12 a teplotách 25 a 60 °C. Vzorky AFRP vykazovaly snížení pevnosti v tahu o 4,3 a 6,4 % po 12 měsících, ale CFRP vzorky nebyly zasaženy. V dalším šetření byly GFRP a CFRP vystaveny zrychlenému zkoušení, kdy 50 let působení urychlily na skutečnou expozici tří měsíců při pH 12,5 až 13 při 60 °C. Tři systémy GFRP vykazaly snížení o 55-73 % pevnosti v tlaku, ale vzorky z CFRP nebyly opět ovlivněny. Uomoto a Nishimura ponořili GFRP, AFRP a AGFRP (hybrid aramidových a skleněných vláken) do roztoku Na(OH)<sub>2</sub> při 40 °C po dobu 120 dní. Pevnost GFRP v tahu byla snížena o 70 %, ale AFRP a AGFRP- vzorky nebyly ovlivněny a pomocí EPMA (elektronová sondová mikroanalýza) se ukázalo, že intruze je hlubší v GFRP. Kombinovaná expozice zmrazování-rozmrazování alkalického prostředí testovaného Gangarao a Vijayem přineslo 7-49% snížení pevnosti v tahu a 3-31% snížení Youngova modulu pro systémy E-skla GFRP (s vinylesterem nebo polyesterem). Saadatmanesh a Tannous ponořené vzorky CFRP, AFRP

a GFRP v nasyceném roztoku  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  při 25 a 60 °C ukázaly, že Fickův zákon by mohl být použit k predikci ztrát pevnosti v tahu FRP výztuží. [14]

#### 1.4.5 Vystavení alkalickému roztoku – pryskyřice

Chin a kol. ponořili polymerní pryskyřice do alkálií při okolní zvýšené teplotě a testovali vzorky na pevnost v tahu pomocí DMTA (dynamic mechanical analyzer), DSC (differential scanning calorimetry), TGA (thermogravimetric analysis) a FTIR (fourier transform infrared spectroscopy analysis). Výsledky ukázaly, že vinylesterové polymery měly vyšší odolnost než ozopolyester (80 % a 40 % zbývající pevnosti v tahu). Bakis a kol. testovali tři různé GFRP tyče 28denním ponořením do nasyceného roztoku  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  při 80 °C. Vinylesterové tyče byly méně ovlivněny než matrice se směsí vinylester/polyester. Alsayes a Alhozaimy zkoumali dva typy GFRP tyčí (40 % nenasycený polyester/60 % uretan modifikovaný vinylesterem a druhý blíže nespecifikovaný druh) potažených cementovou pastou ( $w/c=0,5$ ) a ponořené do vody. Pevnost v tahu GFRP tyče se snížila o 20 % za čtyři měsíce. Když byly stejné vzorky ponořeny do alkalického roztoku (20 g/l NaOH) odpovídající hodnota byla 30 %. Pro jiný typ GFRP (typ nedeklarované pryskyřice) odpovídající snížení bylo prakticky nulové, což naznačuje, že typ pryskyřice a výrobní proces mohou být klíčovými faktory pro alkalickou odolnost GFRP tyčí. [14]

#### 1.4.6 Expozice alkáliím při mechanickém namáhání

U betonových konstrukcí je namáhána většina výztuže a studoval se vliv napětí a alkálií. Rahman a kol. podrobili GFRP a CFRP vyrobených z vinylesterové pryskyřice roztoku NaOH (58 g/l) při 70 °C po dobu 370 dní a tahovým zatížením 0,3 UTS a 0,5 UTS. Vzorek GFRP selhal po 45 dnech pravděpodobně z důvodu rychlé difúze hydratovaných hydroxylových iontů ( $\text{OH}^-$ ), ale FTIR analýza ukázala, že většina pryskyřice nebyla ovlivněna. Gangarao a Vijay zjistili snížení pevnosti (1-76 %) u namáhaných GFRP tyčí v alkalickém roztoku o pH 13 po 201 dnech. Nejlepších odolností dosáhly výztuže s vinylesterovou pryskyřicí. Sheard a kol. uvedli snížení interlaminární pevnosti ve smyku pro některé systémy GFRP a CFRP v roztocích o pH 11,5-13,5 a zbytek vzorků byl téměř nedotčen. V souvisejících studiích to prokázali Clarke a Sheard. Vzorky CFRP si po šesti měsících expozice vedly méně dobře než GFRP při zrychlených podmínkách (pH 12,5, 5%



UBS při 38 °C). Benmokrane a kol. také objevili snížené pevnosti při hodnocení vlivu alkálií na typ pryskyřice a výrobní proces. Dospěli k závěru, že vinylesterová pryskyřice je nejvhodnější polymer pro GFRP tyče. Arockiasamy a kol. zjistili 0% snížení pevnosti CFRP pod tahem (0,65 UTS) v alkalickém prostředí (pH 13-14) po devíti měsících. [14]

#### 1.4.7 Působení alkálií při zvýšené teplotě

Scheibe a Rostasy provedli zátěžové testy přetržení pro AFRP tyče za různých podmínek. Zapuštěné tyče byly namáhány 0,75 UTS na vzduchu (65% relativní vlhkost při 20 °C) nebo ponořené do 0,4 molárního roztoku KOH nasyceného  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  při teplotě do 60 °C. Životnost v betonu vystaveném teplotě 20 °C v alkalickém prostředí a teplotě 20 °C na vzduchu byl 714 h a 3308 h. Porter a kol. ponořené tyče z E-skla (vinylesterová pryskyřice) ve vodním prostředí při 60 °C a v alkalickém prostředí (pH 12) při 60 °C. Z „křivek stárnutí skleněných výztuží odolných vůči alkáliím“ podle Litherlanda a kol. se jeden den v tomto prostředí rovná 279 dnům expozice v reálném čase. Při pull out testech se tyče zdály nedotčené, možná proto, že je před plným účinkem expozice chránil silný betonový kryt. Pantuso a kol. nechal podrobit tyče ze skleněných vláken (polyesterová pryskyřice) v betonu nechal podrobit cyklům smáčení/sušení ve vodním prostředí po dobu 60 dní. Pevnost v tahu se snížila až o 21 % oproti 7 % u holých prutů ponořených ve vodní lázni. [14]

Pro simulování přílivu a odlivu byly vzorky CFRP zality betonem a podrobeny cyklům smáčení/sušení po dobu 18 měsíců při 20 až 60 °C podle Sen a kol. Pevnost vazby se zvýšila v důsledku bobtnání prutů FRP, ale zkoušky v ohybu na vzorcích vyztuženého nosníku neprokázaly podobné zlepšení. Sheard a kol. také neuvedli žádné mechanické nebo fyzické zhoršení GFRP nebo CFRP po dobu 12 měsíců v různých alkalických roztocích při 20 – 38 °C. Porter a kol. studovali předpjaté nosníky (0,4 UTS) ponořené do vysoce alkalických roztoků a uvedli, že výztuže z GFRP (polyesterové pryskyřice) ztratily svou předpínací sílu, zatímco CFRP, také vyrobené s polyesterovou pryskyřicí, se zdály nedotčené. Adimi a kol. studovali typ tahové únavy (tah-tah) GFRP a CFRP výztuže v různé alkalitě. Byly hlášeny jen zanedbatelné dopady na jejich únavový život. V rámci studie dlouhodobé trvanlivosti AFRP tyčí od Scheibeho a Rostasyho byly testovány předpjaté desky, předpraskané a skladované výztuže po dobu dvou let. Gangarao a Vijay trámy uložily do slané vody po dobu 240 dní. Trámy vykazovaly snížení momentové kapacity o 18 %, což

bylo přisuzováno alkáliím, které vyvolaly poškození vazby. Tomosawa a Nakatsuji nechali odhalené vyztužené trámy na japonském pobřeží po dobu dvou let a nezjistili žádné snížení pevnosti v ohybu pro AFRP. [14]

#### 1.4.8 UV záření

Ultrafialové paprsky mohou ovlivnit polymerní materiály. I když výztužné FRP tyče nejsou po uložení v betonu vystavené UV záření, mohou mu být vystaveny během skladování, nebo pokud se FRP výztuž používá jako vnější výztuha. Expoziční testy byly provedeny v laboratoři. Byla na nich měřena pevnost v tahu a byla porovnávána s referenčními vzorky. Kato a kol. zkoumali vliv UV záření na AFRP, CFRP a GFRP tyčích, které byly vystavené v laboratořích s vysokou intenzitou UV záření. Vzorky byly vystaveny 250, 750 a 1250 cyklům smáčení/sušení s intenzitou UV záření  $0,2 \text{ MJ/m}^2/\text{h}$  a teplotě  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ . Vlákná byla také testována po vystavení UV záření až 1000 h. Pruty AFRP vykazují přibližně 13% snížení pevnosti v tahu po 2500 hodinách expozice, GFRP tyče mají 80% snížení pevnosti po 500 h (dále už žádné snížení nenásledovalo) a CFRP tyče nevykazovaly žádné známky snížení. [14]

#### 1.4.9 Tepelné působení

U kompozitních materiálů může dojít ke zhoršení působením tepla, pokud mají složky různé koeficienty tepelné roztažnosti. S FRP železobetonovými prvky, příčná tepelná roztažnost je zvláště důležitá pro dobré spojení. Sen a Shahawy studovali denní/sezónní změnu teploty na trvanlivost 12 předpraskaných a předepjatých CFRP výztuží a předepjatých pilotů, které byly navrženy tak, aby selhávaly prasknutím předpětí tyče. Ty byly skladovány v nádržích a podrobeny cyklům smáčení/sušení a teplotních cyklu ( $20\text{-}60 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Trvanlivost byla hodnocena periodickými zkouškami v ohybu po dobu tří let. Výsledky testů ukázaly, že výkon pilot nebyl do značné míry ovlivněn, ale u některých byla pozorována jak degradace vazby, tak snížení únosnosti vzorů, u kterých bylo předpraskání před expozicí největší. [14]

#### 1.4.10 **Karbonatace**

Bylo provedeno malé množství výzkumných prací o vlivu karbonatace betonu na FRP výztuž. Touto problematikou se zabýval projekt WUROCRETE, který studoval širokou škálu aspektů působící na trvanlivost FRP výztuží. Získaná data byla více variabilní než u jiných akcelerovaných podmínek. Nebylo však pozorováno žádné zhoršení v důsledku karbonatace. [14]

## 2 Praktická část

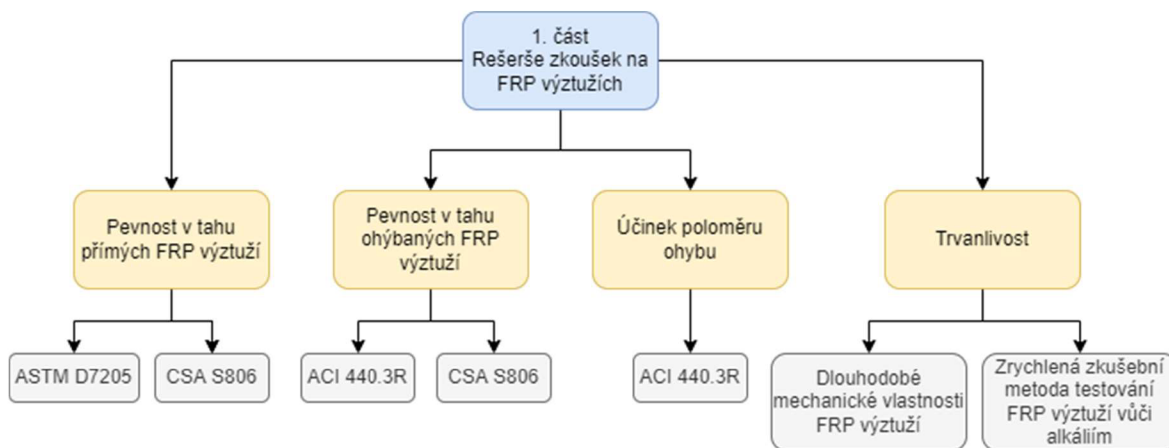
### 2.1 Metodika práce

Praktická část práce se zabývá zkoumáním působení vlivu agresivního prostředí na přímé a ohýbané FRP výztuže. Skládá se ze tří částí (viz. schéma na obr. č. 20, 21, 22)

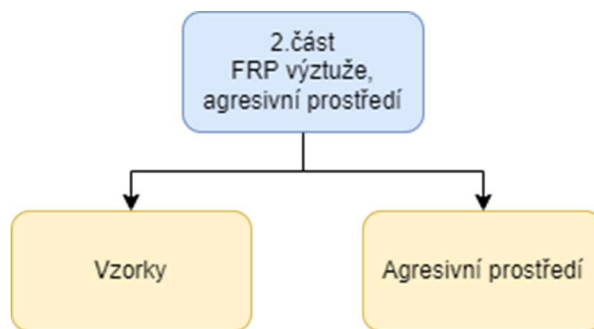
V první části jsou uvedeny možnosti testování přímých a ohýbaných FRP výztuží. Vychází se zde z amerických, kanadských a evropských norem, které se zaměřují na zkoušení mechanických vlastností a testování trvanlivosti.

Druhá část sestává z informací o zkoušených vzorcích, v jakém prostředí byly uloženy a jaký beton byl použit.

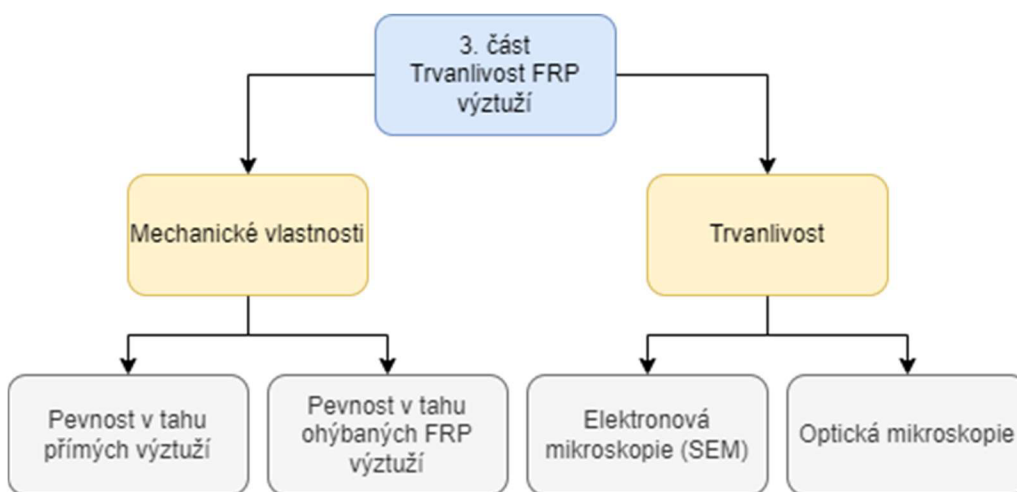
Třetí část se zaměřuje na trvanlivost přímých a ohýbaných FRP výztuží. Vzorky byly vystaveny třem různým prostředím (vodní, alkalické) při různých teplotách (20 °C, 40 °C) a po dané době expozice jsou mechanicky testovány (pevnost v tahu) a pozoruje se vliv agresivních prostředí prostřednictvím optického a elektronového mikroskopu.



Obrázek 20 Schéma 1. části praktické práce



Obrázek 21 Schéma 2. části praktické práce



Obrázek 22 Schéma 3. části praktické části

## 2.2 Postupy zkoušek na FRP výztužích

Z hlediska testování jsme se zabývali normami pro zjišťování vlastností přímých a ohýbaných FRP výztuží. Pro toto zkoušení se využívají primárně kanadské a americké normy, kde se americké normy odkazují na normy ASTM pro konkrétní zkoušky. Pro testování přímých výztuží se využívá americká norma ASTM D7205 a kanadská norma CSA S806, což je obdoba americké normy. Pro testování ohýbaných výztuží se využívá americká směrnice ACI 440.3R a opět kanadská norma CSA S806.

## 2.2.1 Pevnost v tahu přímých výztuží

Tato práce je primárně zaměřená na určení vlastností a trvanlivosti ohýbané výztuže. Aby bylo možné vyhodnotit naměřené hodnoty ohýbaných prutů, je třeba nejprve znát pevnosti přímé výztuže.

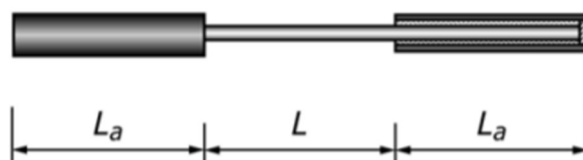
Těmito zkouškami se zabývá americká norma ASTM D7205, kanadská norma CSA S806 a evropská norma ISO 10406-1. Všechny tyto normy jsou založené na obdobném principu, liší se pouze v detailech.

### 2.2.1.1 Pevnost v tahu přímých výztuží dle ASTM D7205

V této normě se testují přímé pruty, které se po obou koncích osadí kotvicími koncovkami, které se následně upevňují do zkušebního zařízení – lisu. Ten konstantní rychlostí a tahem zatěžuje zkoušený vzorek až do úplného porušení. Zároveň zaznamenává sílu potřebnou pro porušení, podélné přetvoření a konečné posunutí. [15]

Princip této zkoušky spočívá v otestování alespoň pěti vzorků z daných podmínek (např. pět vzorků z alkalického prostředí při 20 °C, dalších pět vzorků z alkalického prostředí při 40 °C atd.), není-li možné prokázat platné pevnosti z menšího počtu vzorků. [15]

Vzorek, který se bude usazovat do kotev, se skládá z volné délky  $L$  a dvou délek kotvy  $L_a$ . Volná délka mezi kotvami by neměla být menší než 380 mm nebo menší než 40násobek účinného průměru tyče. Délka vzorku by měla být dostatečná pro adekvátní využívané ukotvení. [15]



Obrázek 23 Ukotvení vzorku [15]

Rychlost provádění zkoušky se volí tak, aby došlo k úplnému porušení v intervalu od 1 do 10 minut. Pokud nelze stanovit rychlost provádění zkoušky dle materiálu, začne se

vzorek zatěžovat při konstantní rychlosti až do nejvyššího napětí. Jakmile se zjistí bod nejvyššího napětí, lze určit, o jaký materiál se jedná a tím i naprogramovat rychlost provádění zkoušky. Doporučená rychlost deformace by měla být  $0,01 \text{ min}^{-1}$ . [15]

Vzorec pro výpočet pevnosti v tahu:

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

Kde:

$F_{tu}$  = mezní pevnost v tahu [MPa]

$P_{max}$  = maximální síla při porušení

A = plocha průřezu tyče.

Modul pružnosti by se měl nacházet ve spodní části křivky, kde by počáteční bod přetvoření by měl začít na hodnotě 0,001 a konečný bod přetvoření by měl být 0,003. Pro materiály, které selhaly při menších hodnotách, než je 0,006, by měl být počáteční bod 25 % maximálního napětí a konečný bod 50 % maximálního napětí. Výsledné hodnoty se udávají na tři platné číslice. [15]

Vzorec pro výpočet modulu pružnosti:

$$E_{chord} = \Delta\sigma / \Delta\Sigma$$

Kde:

$E_{chord}$  = tahová mezní pevnost [MPa]

$\Delta\sigma$  = rozdíl tahového napětí mezi počátečním a konečným přetvořením [MPa]

$\Delta\Sigma$  = rozdíl přetvoření při působení tahu mezi počátečním a konečným bodem na dolní a horní části křivky.

### 2.2.1.2 Pevnost v tahu přímých výztuží dle CSA S806

Tato zkouška se zaměřuje na testování pevnosti v tahu, modulu pružnosti a konečného prodloužení FRP výztuží dle kanadské normy CSA S806 příloha C. [16]

Testovací zařízení musí odpovídat požadavkům dle normy ASTM části E 4. D, kde musí působit na vzorek vyšším zatížením, než má vzorek pevnost, aby došlo k jeho porušení. Též musí být vybavený regulátorem pro zatěžování. [16]

Jako testovací zařízení na měření napětí lze využít:

- Přichytný typ extenzometru s minimální délkou pětinasobného průměru tyče (d) za předpokladu, že jej lze připevnit na povrch výztuže
- LVDT senzor o minimální délce 50 mm připevněné na držácích s funkcí rychlého uvolnění
- Dva tenzometry o minimální délce měřidla 12,5 mm namontované naproti sobě, které jdou upevnit na vzorky s hladkým povrchem a vzorek má dostatečnou délku pro uchycení.

Zařízení musí nepřetržitě zaznamenávat zatížení, deformaci a prodloužení vzorku. Minimální rozlišení musí být pro zatížení 100 N, pro deformaci 1 microstrain a pro prodloužení vzorku 0,01 mm. [16]

Testované vzorky musí odpovídat danému výrobnímu postupu nebo šarži. Nesmí na něm být vykonány žádné mechanické nebo chemické změny, které by měly pozměnit vzorek. Celková délka vzorku musí být alespoň 40násobek průměru tyče (d) + 2násobek délky úchopu ( $L_g$ ). Pro vytvoření vzorků z mříží a armokošů, je potřeba řezat vzorky v dostatečné vzdálenosti, aby příčná část vzorku nebyla porušena. Pro zlepšení uchopení vzorku je dobré ponechat alespoň 2 mm na obou koncích tyče. Počet testovaných vzorků musí být alespoň pět a testují se při laboratorních podmínkách – teplota  $20 \pm 10$  °C a relativní vlhkost  $50 \pm 25\%$ . Na vzorky působí zatížení 250 až 500 MPa/min. [16]

Pro výpočet pevnosti v tahu se nejvyšší zatížení vydělí plochou průřezu. Pro výpočet modulu pružnosti se použije následující rovnice:

$$E = \frac{1000(P_1 - P_2)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)A}$$

Kde:

E = Modul pružnosti [MPa]

$P_1, \varepsilon_1$  = Vynaložené a odpovídající zatížení při přibližně 50 % konečného napětí [Mpa]

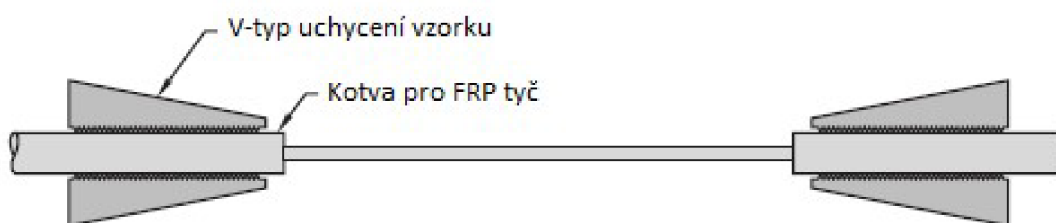


$P_2, \varepsilon_2$  = Vynaložené a odpovídající zatížení při přibližně 25 % konečného napětí [MPa]

$A$  = plocha průřezu [mm<sup>2</sup>]

Délka prodloužení odpovídá nejvyššímu zaznamenanému zatížení, které se vydělí délkou vzorku mezi uchycenými částmi a vynásobí se 100krát, aby se získala délka prodloužení FRP tyče v %. [16]

Pevnost v tahu se zaokrouhlí na nejbližších 10 MPa a modul pružnosti se zaokrouhlí na nejbližších 1000 MPa. Konečné prodloužení vzorku se zaokrouhlí na nejbližší desetinu procentní hodnoty. [16]



Obrázek 24 Montáž uchycení V-typu na testovaný vzorek [16]

## 2.2.2 Pevnost v tahu ohýbaných výztuží

Jak už bylo řečeno, tato práce se zaměřuje na sledování vlivu agresivního prostředí na trvanlivost FRP ohýbaných výztuží. Zkouškami na ohýbanou výztuž se zabývají americké postupy ACI 440.3R a kanadské normy CSA S806.

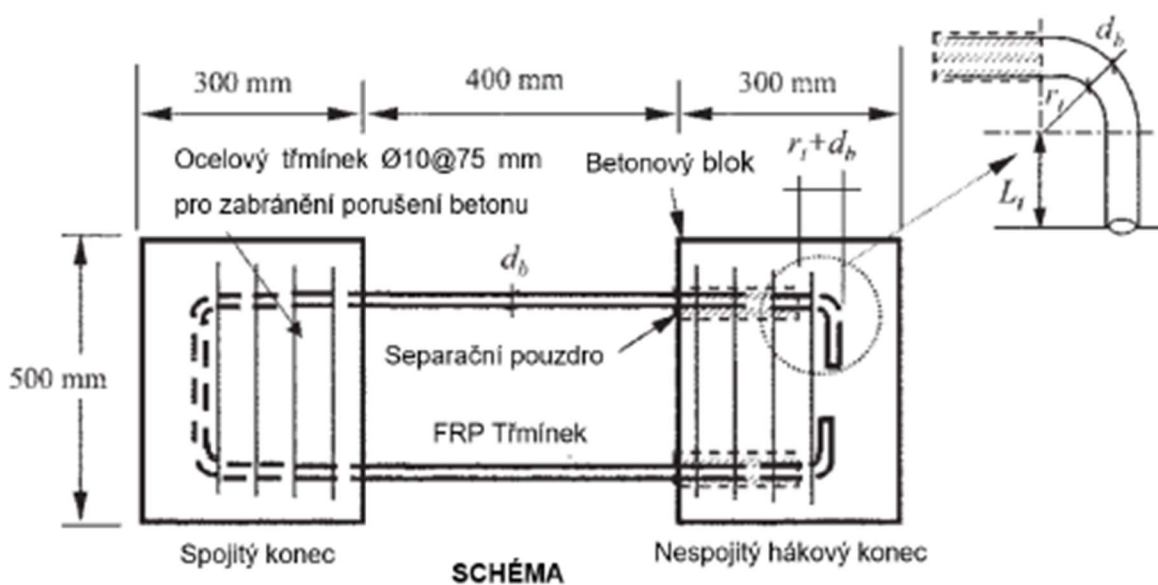
### 2.2.2.1 Pevnost v tahu ohýbaných výztuží dle ACI 440.3R

Pro zjištění parametrů na testování pevnosti v tahu FRP výztuží se vychází z ASTM standardů, kterými jsou:

- C 39 Standardní testovací metoda pro pevnost v tlaku na válci
- C 143 Standardní testovací metoda pro sednutí hydraulického cementu
- C 192 Standardní výroba a zrání betonu v laboratorních podmínkách
- E 4 Standardní kalibrace testovacích strojů

Tato metoda je navržena pro ověření ohýbaných částí, konkrétně pak na její pevnost. Hlavní proměnné jsou průměr, rádius ohybu a druh výztuže. [17]

Ohýbaná část vede ke snížení pevnosti FRP výztuže v důsledku rádiusu a poloměru ohybu. Tato zkouška se zaměřuje na měření pevnosti ohýbaných částí, které jsou kolmo na rovnoběžné části vystupující z betonového bloku. Výsledkem je zjištění poklesu mechanických vlastností v závislosti na ohybu. [17]



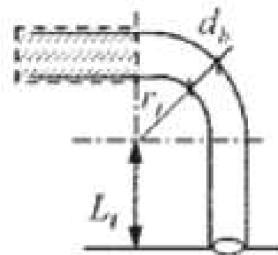
Obrázek 25 Schéma uložení vzorku [17]

Jako měřicí zařízení se používá hydraulický válec a píst, který se musí kalibrovat před zkoušením dle ASTM části E 4. Je třeba, aby byla předpokládaná síla vyvinutá na vzorek vyšší, než pevnost FRP výztuže. Nepřesnost měření může být maximálně do 1 %. [17]

### Příprava vzorku

Standardní příprava vzorku lze vidět na obr. č. 25. Velikosti betonových bloků se od sebe mohou lišit v závislosti na druhu a velikosti využívané výztuže. Volná délka mezi betonovými bloky by neměla být menší, než 200 mm (doporučuje se 400 mm). Betonové

bloky by měly být dodatečně vyztuženy ocelovými třmínky, aby nedošlo k porušení betonu, nýbrž k porušení FRP výztuže v místě ohybu. Délka ocelových třmínku závisí na délce  $L_t$ , která by neměla být větší než 150 mm. Délka  $L_t$  je kratší rovná část za ohybem (viz. obr. č. 26). [17]



Obrázek 26 Detail délky  $L_t$  [17]

Kde:  $r_t$  = poloměr ohybu

$L_t$  = délka konečné části výztuže

$D_b$  = průměr ohýbané části.

V místě vstupu výztuže do betonového bloku je použito separační pouzdro, které má zabránit působení rovné části, čímž se tah bude soustředit pouze na místo ohybu. Pokud by se měřila i přímá část, simulovalo by to měření pevnosti ukotvení v betonu, nikoliv pouze pevnost výztuže v ohýbané části. Aby se při výrobě vzorku nedostal beton do separačního pouzdra, musí se oba jeho konce zaplnit tmelem. [17]

Betonová směs by měla být standardní receptura. Zrno hrubého kameniva by mělo mít maximálně 20 – 25 mm. Směs by měla být navrhuta a připravena dle ASTM části C 192. Sednutí čerstvého betonu by mělo být  $100 \pm 20$  mm dle ASTM části C 143 a 28denní pevnost v tlaku by měla dosahovat minimálně  $30 \pm 3$  MPa dle ASTM části C 39. Minimálně pět válcových těles o velikosti 150 x 300 mm nebo 100 x 200 mm by mělo z každé várky dosáhnout požadovaných pevností. [17]

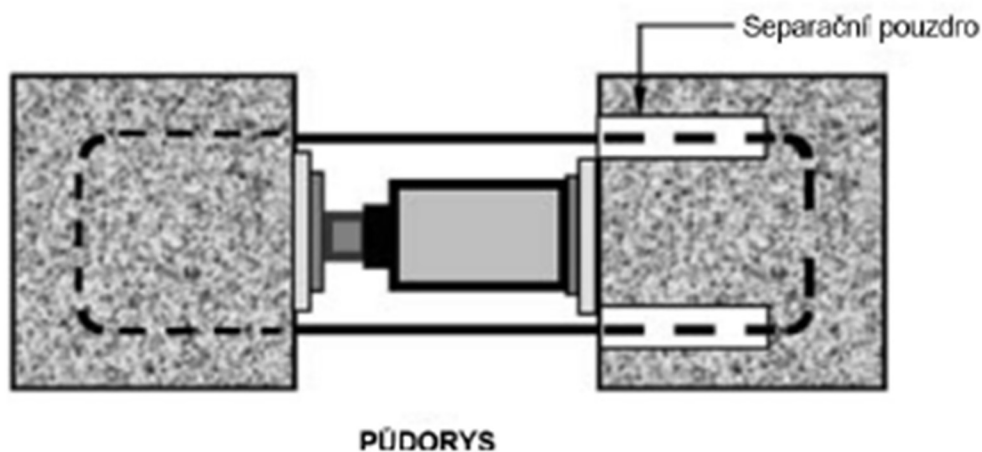
Minimálně by mělo být z každé várky pět platných testovaných vzorků. Pokud by zkoušený vzorek selhal porušením/rozštěpením betonového bloku, neměl by se výsledek brát v potaz a další test by měl být proveden na vzorku ze stejné várky. [17]

Pokud testované vzorky selžou vytržením z betonu, znamená to, že poloměr ohybu a kotevní délka  $L_t$  jsou nedostačující pro otestování FRP výztuže. Aby nedocházelo k selhání, je třeba upravit parametry, což může vést i ke zvětšení velikosti betonového bloku. [17]

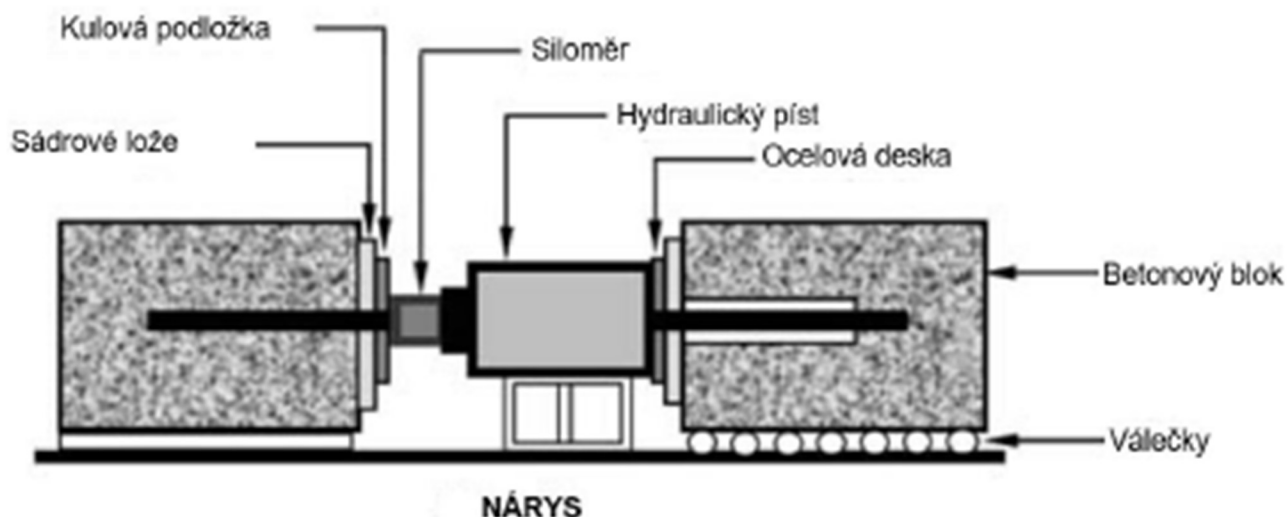
Pokud není jinak definováno, provádění zkoušky by mělo probíhat za laboratorních podmínek, které jsou  $23 \pm 3$  °C a relativní vlhkost  $50 \pm 10\%$ . Před zabetonováním je třeba zkontrolovat samotnou výztuž a zaznamenat si její stav. [17]

### Zkoušení vzorku

Na obrázku č. 27 lze vidět zkušební sestavu pro zkoušení vzorku, která sestává z hydraulického zvedáku, který oddaluje od sebe dva betonové bloky a snímače vyvozeného zatížení. Mezi hydraulický zvedák, siloměr a betonové bloky je třeba umístit ocelové desky a sádrové pytle, aby došlo k rozložení zatížení na povrchu betonu. Oba betonové bloky by měly být umístěny na pohyblivé válečky, aby se minimalizovalo tření mezi betonovými bloky a testovací podložkou. Pokud by se při zkoušce trhala výztuž na jiných místech, než v ohýbané části, je třeba postupovat dle ACI 440.3R části B.2. [17]



Obrázek 27 Schéma zkušební sestavy – půdorys [17]



Obrázek 28 Schéma zkušební sestavy – nárys [17]

Testovaný vzorek by neměl být vystavený žádným nárazům, vibracím nebo kroucení. Nárůst pevnosti by měl být kontinuální a hladký do doby, než dojde k porušení vzorku. Aplikace síly by se během testu neměla zastavit. Rychlost namáhání by měla být taková, aby vzorek selhal mezi 1 až 10 minutami testu. [17]

Zaznamenává se, při jakých hodnotách vzorek selhal a jakým způsobem došlo k porušení. Výsledky jsou platné pouze v případě, pokud došlo k porušení v ohýbané části vzorku. Pokud došlo k porušení na jinačích (přímých) místech třmínku, nebo se porušil beton, pak se výsledek považuje za neplatný. Je potřeba získat alespoň pět platných výsledků z měření. Pevnost v ohybu FRP třmínků se vypočítá dle následující rovnice a zaokrouhlí se na tři platné číslice. [17]

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

Kde:

$f_{ub}$  = pevnost v ohybu FRP třmínku [MPa]

$F_{ub}$  = největší zatěžovací síla pro ohybové zkoušky [N]

$A$  = plocha průřezu daného třmínku [mm<sup>2</sup>].

Faktor redukující sílu vlivem ohybu lze vypočítat z následující rovnice.

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

Kde:

$x$  = faktor redukující sílu kvůli ohybu

$f_u$  = vypočítaná pevnost v tahu podle ACI 440.3R metody B.2.

#### 2.2.2.2 Pevnost v tahu ohýbaných výztuží dle CSA S806

Tato zkušební metoda se zabývá ohýbanými tyčemi, kde specifikuje jejich zkušební požadavky na pevnost v tahu dle kanadské normy CSA S806 příloha E. Jedná se o FRP tyče, které se využívají jako třmínky pro vyztužování betonu. Zkoušení probíhá v laboratorních podmínkách, kde se řeší pevnostní kapacita v ohýbané části. [16]

Výztuž se ohýbá za účelem lepšího ukotvení v betonu, zároveň se díky ohýbání snižuje pevnostní kapacita vzorku. Hlavními kritérii pro posouzení vlivu na FRP třmínek jsou poloměr ohybu a typ třmínku. Tato zkušební metoda měří maximální únosnost třmínku FRP vystaveného tahové síle ve směru přímé části. [16]

Standardní příprava vzorku lze vidět na obr. č. 25. Velikosti betonových bloků se od sebe mohou lišit v závislosti na druhu a velikosti využívané výztuže. Volná délka mezi betonovými bloky by neměla být menší než 200 mm. Betonové bloky by měly být dodatečně vyztuženy ocelovými třmínky, aby nedošlo k porušení betonu, nýbrž k porušení FRP výztuže v místě ohybu. Délka ocelových třmínků není přesně definována, avšak se doporučuje, aby výška třmínku nebyla větší než 750 mm<sup>2</sup>. [16]

Minimálně by mělo být z každé várky pět platných testovaných vzorků. Pokud by zkoušený vzorek selhal porušením/rozštěpením betonového bloku, neměl by se výsledek brát v potaz a další test by měl být proveden na vzorku ze stejné várky. Testované vzorky musí být charakteristické pro daný způsob výroby. [16]

Na obrázku č. 27 a č. 28 lze vidět zkušební sestavu pro zkoušení vzorku, která sestává z hydraulického zvedáku, který oddaluje od sebe dva betonové bloky a siloměru k měření působícího zatížení. Mezi hydraulický zvedák, siloměr a betonové bloky je třeba umístit ocelové desky a sádrové pytle, aby došlo k rozložení zatížení na povrchu betonu. Oba

betonové bloky by měly být umístěny na pohyblivé válečky, aby se minimalizovalo tření mezi betonovými bloky a testovací podložkou. Hydraulický zvedák a siloměr musí být zkalibrovány před prováděním zkoušky. Pro zajištění rovnoměrného rozložení působícího zatížení se na nohách třmínku použije extenzometr. [16]

Pevnost v tahu přímých FRP tyčí o stejném průměru jako FRP třmínky se hodnotí podle přílohy C této normy (viz. kapitola Pevnost v tahu přímých výztuží dle CSA S806). [16]

Zkoušení probíhá při teplotě  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  a testované vzorky nesmí být vystaveny žádnému nárazu, vibracím či kroucení. [16]

Pro platné vyhodnocení je třeba brát v potaz jen vzorky, kde došlo k porušení v ohýbané části. Pokud došlo k porušení v jiné části třmínku, výsledek se považuje za neplatný. Pro vyhodnocení je třeba alespoň tři platných výsledků. [16]

Kapacita ohybu třmínku se vypočítá dle následující rovnice:

$$f_{bend} = \frac{F_{ult}}{2A_b}$$

Kde:

$f_{bend}$  = ohybová kapacita FRP třmínku

$F_{ult}$  = maximální únosnost dle ohybových zkoušek

$A_b$  = plocha průřezu jednoho třmínku.

Faktor snížení pevnosti se vypočítá dle následující rovnice:

$$\chi = \frac{f_{bend}}{f_{fu}}$$

Kde:

$\chi$  = faktor snížení pevnosti v důsledku ohybového efektu

$f_{bend}$  = ohybová kapacita FRP třmínku

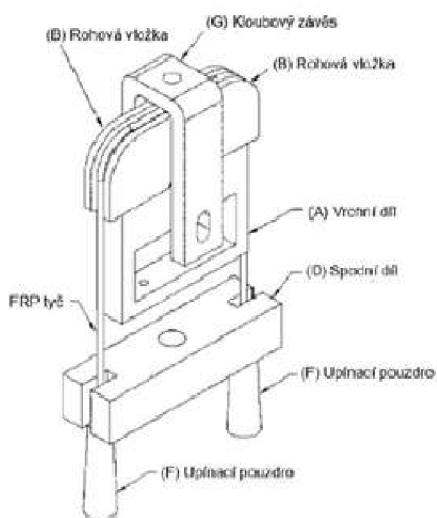
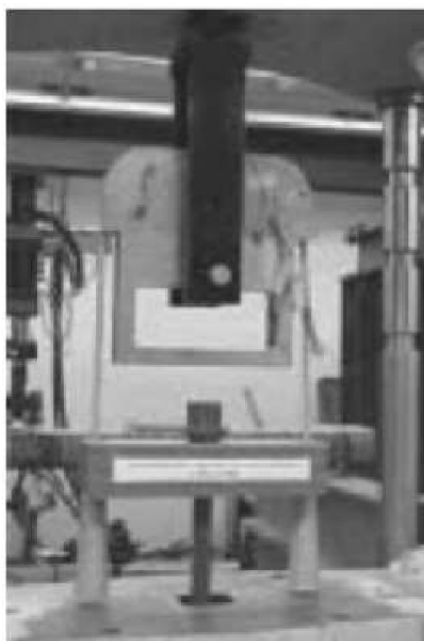
$f_{fu}$  = pevnost v tahu rovnoběžná s vláknem stanovená v souladu s přílohou C této normy (viz. kapitola Pevnost v tahu přímých výztuží dle CSA S806).

### 2.2.3 Účinek poloměru ohybu dle ACI 440.3R

Tato metoda udává efekt poloměru ohybu FRP výztuže. Tyto zkoušky vychází z ASTM standardů, kterými jsou:

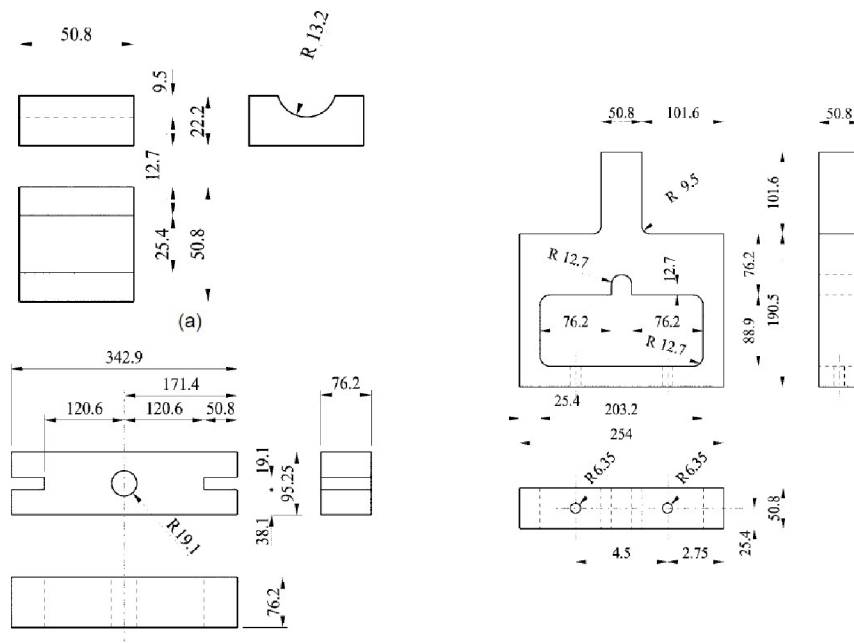
- D 883 Terminologie plastických látek
- D 3039/D 3039M Metody testování tahových vlastností kompozitu s polymerní maticí
- E 4 Postupy pro ověření kalibrace testovacích zařízení
- E 6 Terminologie související s metodami zkoušení mechanických vlastností.

Tahové zkoušky jsou prováděny pomocí unikátního zařízení. Testovací prvek se skládá ze tří komponentů spodní a horní části a zaměnitelných rohových vložek. Zkoušený FRP prvek ve formě ohýbané výztuže se umístí ve drážce, která běží po bocích a horní části zkušebního zařízení, stejně jako v zaměnitelných rohových vložkách. [17]



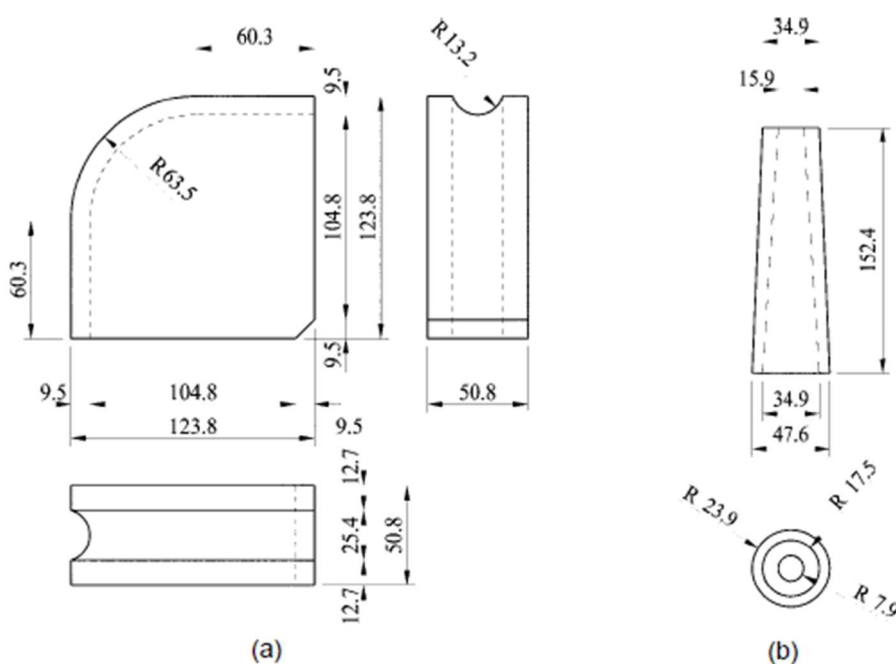
Obrázek 29 Sestava pro zkoušení (vlevo-reálné zobrazení, vpravo-schéma) [17]



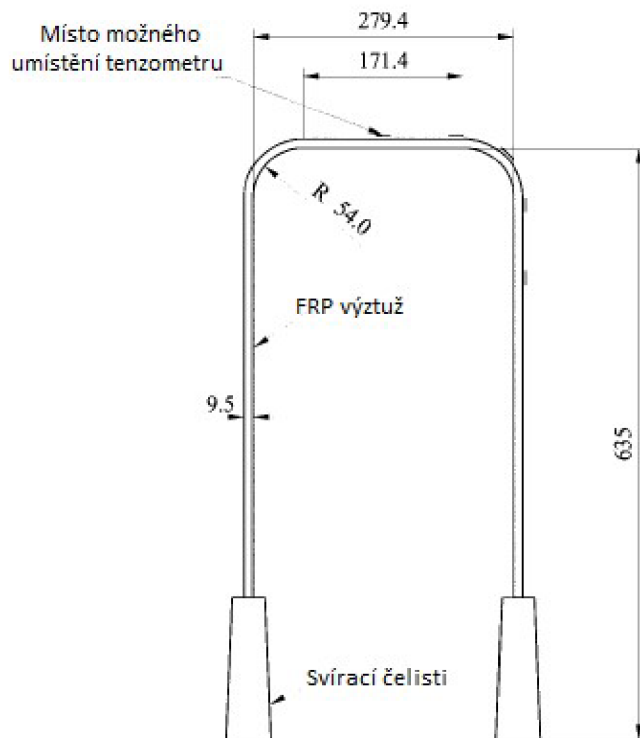


Obrázek 30 Části testovacího zařízení (vlevo-dolní část (a)klín, (b)spodní část [mm], vpravo-horní část [mm]) [17]

Zařízení vyvozující napětí je umístěno v různých místech v závislosti na vlastnostech, které chceme měřit. Pokud chceme například měřit modul pružnosti a prodloužení, zatěžovací prvky jsou montovány kolem rohových částí. Zatížení je poté vyvoláváno až do porušení prvku. [17]



Obrázek 31 Zaměnitelné rohové vložky udávající zkoušený poloměr; (a)rohová vložka, (b) svírající čelisti [17]



**Obrázek 32 Tvar testovaného prvku [17]**

Tato zkouška udává přesné informace o vlastnostech v závislosti na poloměru ohybu výztuže. Tento poloměr je udáván zaměnitelnými rohovými vložkami. Tato metoda může být použita pro testování všech FRP výztuží – jak čtvercového, tak i kruhového průřezu. [17]

Redukovaná tahová síla je vypočítaná při dosažení do následující rovnice a výsledek bude zaokrouhlený na tři platné číslice. [17]

$$S = P/(2A)$$

Kde:

S = redukovaná tahová síla pro daný poloměr ohybu [MPa]

P = tahové napětí potřebné pro porušení vzorku [N]

A = průřezová plocha výztuže [mm<sup>2</sup>].

Je možné vypočítat modul pružnosti v různých bodech prvku pomocí rovnice níže. Výsledek se bude opět zaokrouhlovat na tři platné číslice. Modul pružnosti by měl být počítán z hodnot zatížení a prodloužení, které odpovídají 20 % a 50 % redukované pevnosti v tahu. [17]

$$E_L = \Delta P / (2A\Delta\varepsilon)$$

Kde:

$E_L$  = modul pružnosti vzorku (po směru vláken) [MPa]

$\Delta P$  = nárůst tahového zatížení

$A$  = průřezová plocha výztuže

$\Delta \varepsilon$  = nárůst prodloužení.

#### 2.2.4 Možnosti testování trvanlivosti

Mezi možnostmi testování trvanlivosti FRP výztuží lze zahrnout dvě možnosti. První je zrychlená zkušební metoda testování odolnosti FRP výztuží vůči alkáliím dle ACI 440.3R. V této metodě se vystaví vzorky agresivnímu prostředí za zvýšených pevností po určitou dobu, čímž se simuluje působení agresivních médií po určitou dobu, akorát ve zkrácené době. Druhou možností testování je přes dlouhodobé mechanické vlastnosti dle ACI 440.3R, kde se uvádí několik možných metod pro testování.

##### 2.2.4.1 Zrychlená zkušební metoda testování odolnosti FRP výztuží vůči alkáliím

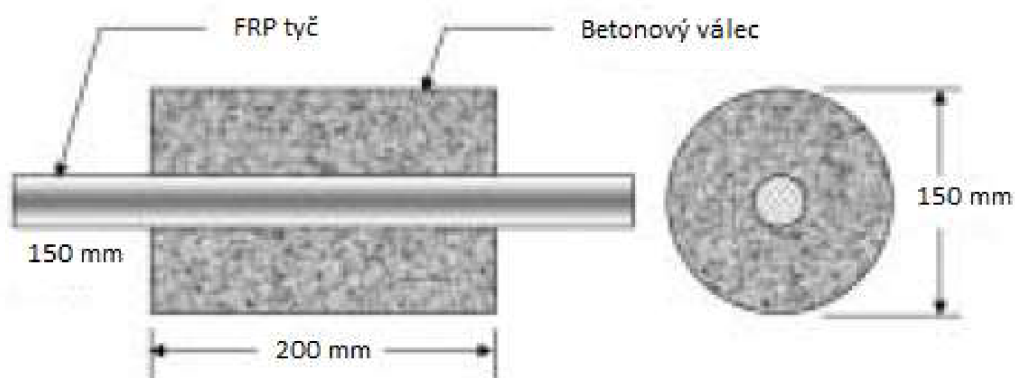
Tato zkušební metoda se zaměřuje na zkušební požadavky pro hodnocení odolnosti FRP výztuží, které se používají pro vyztužování betonu. V betonovém uložení na FRP výztuže působí alkalické působení. Odolnost vůči alkalickému prostředí se měří na vzorcích, které mohou, ale nemusí být vystavené mechanickému namáhání. [17]

Tato zkušební metoda se skládá ze tří možných variant testování, kde jsou podmínky různé, avšak teplota je pro všechny tři metody totožná a to 60 °C. [17]

Metoda A – Jedná se o prostředí, ve kterém jsou FRP výztuže ponořeny do alkalického roztoku bez jakéhokoliv mechanického namáhání. Sledovanými parametry zde jsou pH roztoku, teplota alkalického roztoku a doba ponoření vzorků. [17]

Metoda B – U této metody jsou vzorky ponořené v alkalickém prostředí za neustálého tahového zatížení. Sledovanými parametry zde je hladina alkalického prostředí, hodnota pH roztoku, teplota alkalického roztoku a doba ponoření vzorků. [17]

Metoda C – Zde jsou FRP vzorky obklopeny vlhkým betonem a jsou vystaveny trvalému tahovému zatížení. Sledovanými parametry je úroveň konstantního zatížení, hodnota pH prostředí, teplota betonové směsi a doba uložení. [17]



Obrázek 33 Navrhování betonového válce pro metodu C [17]

Toto zkoušení se odkazuje na ASTM normy, kterými jsou:

- C 192 Standardní postup výroby a ošetřování zkušebních vzorků v laboratoři
- C 511 Standardní ošetřování ve vlhku (malé/velké místnosti) nebo ve vodě konkrétně pro testování hydraulického cementu a betonu
- D 618 Standardní postup testování pro úpravu plastických látek
- D 522M – Standardní zkušební metoda pro vlastnosti absorpce vlhkosti a rovnovážné podmiňování kompozitních materiálů s polymerní maticí.

Tato zkušební metoda zkoumá odolnost FRP výztuží vůči alkalickému prostředí, a to v laboratořích, kde je možné vytvořit potřebné podmínky pro zkoušení. Hlavními parametry

jsou teplota a koncentrace alkalického roztoku, druh FRP výztuží a úroveň trvalého zatížení na vzorky. [17]

Tato zkušební metoda měří změnu hmotnosti a pevnosti v tahu po vystavení v alkalickém prostředí – bez tahového namáhání (viz. Metoda A), nebo tahové namáhání po vystavení FRP výztuží v alkalickém prostředí a zalití výztuží betonem za stálého namáhání (viz. Metoda B a Metoda C) - [17].

Tato zkušební metoda slouží k určení alkalické rezistence daného materiálu, zjištění potřebných dat pro výzkum a vývoj, zajištění kvality, konstrukčního návrhu a analýzy. Primárním výsledkem ve zkoušení těmito metodami je změna hmotnosti a mechanických vlastností, což je podstatné pro následné využívání FRP výztuží. [17]

Úroveň tahového namáhání působící na vzorek (viz. Metoda B a Metoda C) není nijak definována. Nejčastěji se úroveň tahového namáhání navrhuje tak, aby působící zatížení bylo rovno součtu hmotnosti od samotné stavby a od užitého namáhání. Pokud provozní zatěžování není známo, konstantní tahové napětí by mělo být pro FRP výztuže se skleněnými vlákny takové, aby vyvolalo tahové napětí rovno 2000 mikrostreinů. Vyšší úroveň trvalého namáhání může být použito, jako urychlení zkoušky. Úroveň trvalého tahového namáhání by měla být zaznamenána pro daný materiál. [17]

FRP výztuže by jako vzorky měly být reprezentativní jako výrobky daného druhu, či šarže. Obecně platí, že by výztuže neměly být zpracovány, jakkoliv jinak, než je běžným výrobním způsobem. Během přípravy vzorků by se mělo předejít jakémukoliv působení na vzorek (deformace vzorku, zahřívání, působení UV záření, vystavení venkovním podmínkám a další vlivy). Délka výztuže by měla být sumou délky výztuže, která bude vystavena agresivnímu prostředí a délky konců výztuže, které budou ukotveny. Délka testované části výztuže by neměla být menší než 40násobek průměru výztuže. Pro tyče v krouceném provedení by měla být délka též větší, než dvakrát rozteč pramenů. Minimální počet testovaných vzorků je pět a každý jeden z nich by měl být označený. Před ponořením do agresivního prostředí je třeba řezané konce výztuží opatřit epoxidovou výztuží a nechat zatvrdnout, aby se právě těmito konci nedostalo agresivní médium do zkoušených vzorků. [17]

Alkalický roztok v metodě A a metodě B by měl simulovat prostředí pórové vody v betonu z portlandského cementu. Alkalické prostředí se skládá ze:

- 118,5 g Ca(OH)<sub>2</sub> na 1 l deionizované vody
- 0,9 g NaOH na 1 l deionizované vody
- 4,2 g KOH na 1 l deionizované vody.

Roztok by měl mít pH hodnotu v rozmezí 12,6 až 13 aby představovalo prostředí vyzrálého betonu. Při testování je potřeba, aby byl alkalický roztok zakryt před i během průběhu zkoušky, aby se předešlo jakékoliv interakci se vzdušným CO<sub>2</sub> a odpařování směsi.

U těchto zkoušek se výpočet zaměřuje na dvě části. První částí je výpočet změny hmotnosti dle následující rovnice. [17]

$$\text{Nárůst hmotnosti (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} * 100$$

$$\text{Úbytek hmotnosti (\%)} = \frac{W_0 - W_1}{W_0} * 100$$

Kde:

$W_1$  = hmotnost vzorku po ponoření v časové periodě 1 [g]

$W_0$  = počáteční hmotnost vzorku před ponořením [g].

Druhou částí je procentuální pokles pevnosti. Jako platné výsledky pro výpočet se použijí pouze ty, kde došlo u FRP výztuží k porušení v ohýbané části. Pokud došlo k porušení v jiné, než ohýbané části, vzorek by měl být vyřazen. Výsledek procentuálního poklesu pevnosti po namočení se zaokrouhlí na dvě platné číslice. [17]

$$R_{et} = \frac{F_{u2}}{F_{u1}} * 100$$

Kde:

$R_{et}$  = Procentuální pokles pevnosti [%]

$F_{u1}$  = Pevnost vzorku před ponořením do agresivního prostředí [N]

$F_{u2}$  = Pevnost vzorku po ponoření do agresivního prostředí [N].

#### 2.2.4.2 Dlouhodobé mechanické vlastnosti FRP výztuží

Druhým možným testováním trvanlivosti je zkoušení dlouhodobých mechanických vlastností FRP výztuží. Tyto zkoušky probíhají dle amerických směrnic ACI 440.3R. Spadají pod ně tři části.

##### 2.2.4.2.1 B.7 Metoda pro zkoušení tahové únavy FRP výztuží

Tato zkušební metoda stanovuje zkušební požadavky pro tahovou únavu FRP výztuží při konstantním zatížení. Zaměřuje se na FRP pruty, které se používají jako výztuže do betonu, nebo předpínací výztuže. Vzorky by měly být lineární nebo ve formě mříží vyrobeny z nekonečných vláken, aby se chovaly v konečné fázi jako celek. [17]

Různé typy únavových zkoušek, jako je; napětí-napětí; napětí-kompresce, komprese-kompresce, nebo různé kombinace tahu, komprese a smyku jsou možné. Nejzákladnějším typem zkoušky je napětí-napětí pro hodnocení materiálových charakteristik. Testovaným parametrem je zde zatížení. Zatěžovací stroj je řízený tak, aby byl vzorek vystavený opakovanému zatěžování rozsahu konstantního zatížení. V tomto postupu lze popsat zjišťovaný parametr pomocí obou napětí nebo aplikovaného zatížení jako proměnnou s konstantní amplitudou únavy. [17]

##### 2.2.4.2.2 B.8 Zkušební metoda pro porušení FRP výztuží tečením

Tato zkušební metoda stanovuje zkušební požadavky pro dotvarování FRP výztuží, které se používají jako výztuže do betonu, nebo jako předpínací výztuž do betonu. [17]

##### 2.2.4.2.3 B.9 Testovací metoda pro dlouhodobou relaxaci FRP výztuží

Tato zkušební metoda stanovuje zkušební požadavky pro hodnocení chování dlouhodobé relaxace FRP tyčí, které se využívají jako předpínací výztuž do betonu za stálé teploty a napětí. [17]

### 2.3 Popis zkoušených výztuží

Jedná se o kompozitní materiál složený ze skleněných vláken a epoxidové pryskyřice. Dodavatelem je Prefa Kompozity, a.s. Pro zkoumání trvanlivosti byly zvoleny přímé FRP výztuže a ohýbané. Přímé pruty se vyráběly na půltruzní lince. Ohýbané třmínky se vyráběly manuálně z pultrudovaných přímých prutů, které se po částečném vytvrzení za snížených teplot navíjely na formu, která tvořila nekonečnou spirálu třmínků. Po vytvarování třmínku došlo k následnému vytvrzení a nařezání na požadované formáty. Díky tomuto způsobu výroby nebyly jednotlivé třmínky totožné – ať už se jedná o rovnoběžnost prutů, nebo povrchovou úpravu. Průměr těchto výztuží je roven 10 mm.

#### Složení FRP výztuží:

- Vlákná: skleněná vlákna s označením E-CR (R25H 2400, výrobce 3B, cca 80 % hmotnosti)
- Pryskyřice: Epoxidová (cca 20 % hmotnosti)
- Povrchová úprava: křemičité opískování, ovinutí nylonovou nití.

### 2.4 Popis agresivního prostředí

Agresivní prostředí je navrženo dle ACI 440.R, část B.6, metoda A. Byly navrženy tři druhy agresivního prostředí. Konkrétně se jednalo o:

- Vodní prostředí při 20 °C
- Alkalické prostředí při 20 °C
- Alkalické prostředí při 40 °C.

Tato prostředí se navrhovala pro zjištění trvanlivosti FRP výztuží. Sledovala se změna mechanických vlastností a vliv agresivních médií na strukturu vzorků. Třmínky byly vystaveny agresivnímu prostředí po dobu 30, 42, 90, 180 a 360 dní. Alkalické prostředí simuluje pórovou vodu uvnitř betonu z portlandského cementu. Alkalický roztok měl mít pH hodnotu okolo 12,6 – 13, aby věrohodně simuloval betonové prostředí. Během procesu působení agresivního prostředí se opakovaně pH roztoků kontrolovalo. Zvýšená teplota má urychlit proces degradace.

Jednotlivá prostředí byla vytvořena ve velkých boxech 100 cm x 65 cm (délka x šířka), kde se předpokládalo s výškou hladiny 30 cm. Jakmile je agresivní prostředí



připraveno, uloží se do něj vzorky a přikryje se, aby se zabránilo odpařování vody, přísunu vzduchu a tím reakci s atmosferickým CO<sub>2</sub>

Složení alkalického prostředí:

- 118,5 g Ca(OH)<sub>2</sub> na 1 l deionizované vody
- 0,9 g NaOH na 1 l deionizované vody
- 4,2 g KOH na 1 l deionizované vody.

## 2.5 Pevnost v tahu – přímé vzorky

Pevnost v tahu se zkoušela na výztužích vyráběných standardní pultruzí. Jedná se o GFRP výztuže o průměru 10 mm. Zkoušky probíhaly dle americké normy ASTM D7205.

V testování FRP bylo navazováno na předchozí experiment, kde se zkoušely přímé FRP výztuže na pevnost v tahu. Konkrétně se jednalo o referenční vzorky a vzorky vystavené v agresivním prostředí po dobu 30 a 42 dní. Agresivní prostředí bylo vodní uložení při 20 °C a alkalické prostředí při 20 °C a 40 °C. Hodnoty pro tyto výztuže lze vidět v následující tabulce.

**Tabulka 3 Vypočítané hodnoty pro výztuže referenční, 30denní a 42denní**

Označení vzorku	Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Průměrná pevnost [MPa]	Modul pružnosti (sečný) [GPa]
Referenční vzorek	78,54	1368	52,6
30 dní – H <sub>2</sub> O při 20 °C	78,54	1302	52,3
30 dní – alkalické prostředí při 20 °C	78,54	1297	52,1
30 dní – alkalické prostředí při 40 °C	78,54	1279	52,1
42 dní – H <sub>2</sub> O při 20 °C	78,54	1267	51,6
42 dní – alkalické prostředí při 20 °C	78,54	1286	52,1
42 dní – alkalické prostředí při 40 °C	78,54	1243	52,3

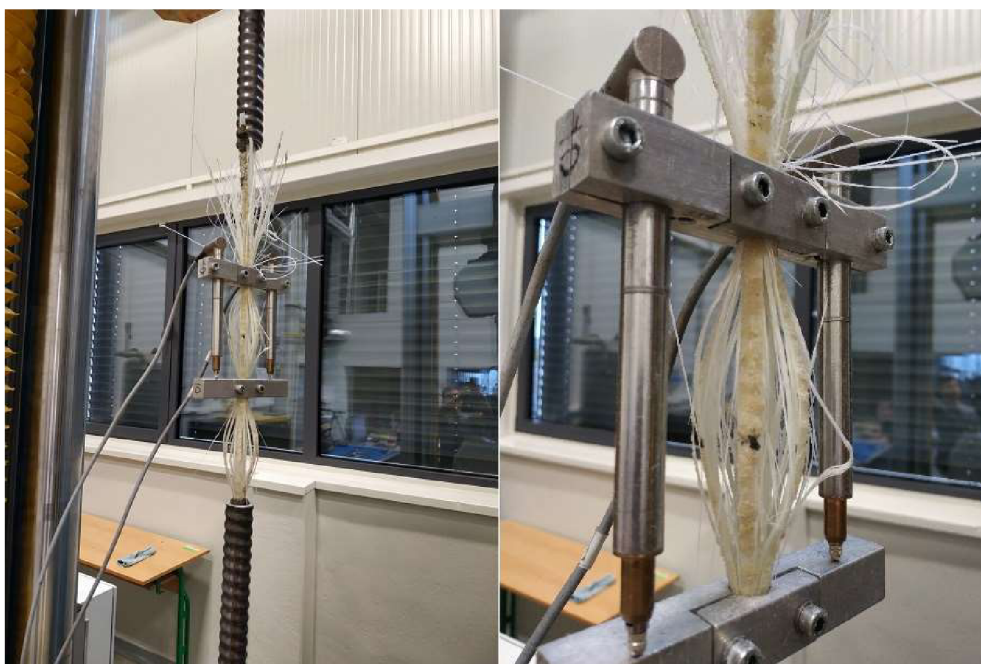
Naše vzorky byly vystaveny v agresivním prostředí po dobu 90, 180 a 360 dní ve třech různých prostředích; vodní prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C a alkalické prostředí při 40 °C.

Výztuže byly osazeny závitovými tyčemi po obou koncích a následně osazeny kotvami, které se poté upevnily v lisu. V polovině délky výztuže se opatřila výztuž dvěma potenciometry pro měření protažení prutu (viz obr. č. 34). Lis zatěžoval vzorek rychlostí 5 mm/min.



**Obrázek 34 Příprava na zkoušení přímých výztuží v tahu (zleva-vzorky osazené závitovými tyčemi a kotvami, čelisti lisu, připravený vzorek ke zkoušení) [Aneta Blahová]**

Vzorek při zatěžování zprvu nevykazoval žádné vizuální znaky poškození až ke konci zkoušky bylo viditelné praskání vzorku, které vedlo k následnému celkovému přetržení. Na obr. č. 35 lze vidět ztelná delaminace vzorku.

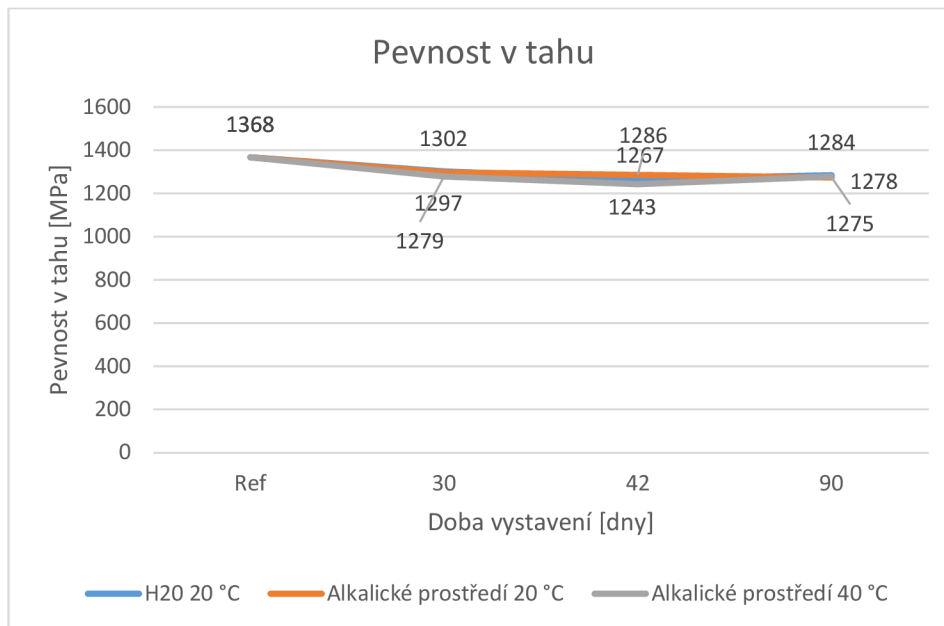


**Obrázek 35 Příklad delaminace u vzorku uloženého ve vodním prostředí při 20 °C po dobu 360 dní [Aneta Blahová]**

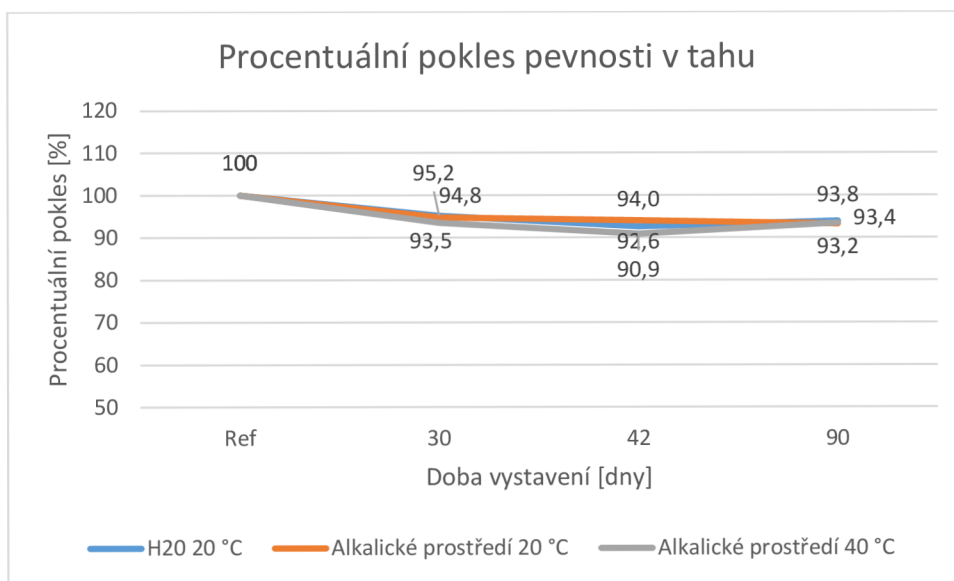
## Vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 90 dní

**Tabulka 4 Pevnost v tahu a modul pružnosti pro vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 90 dní**

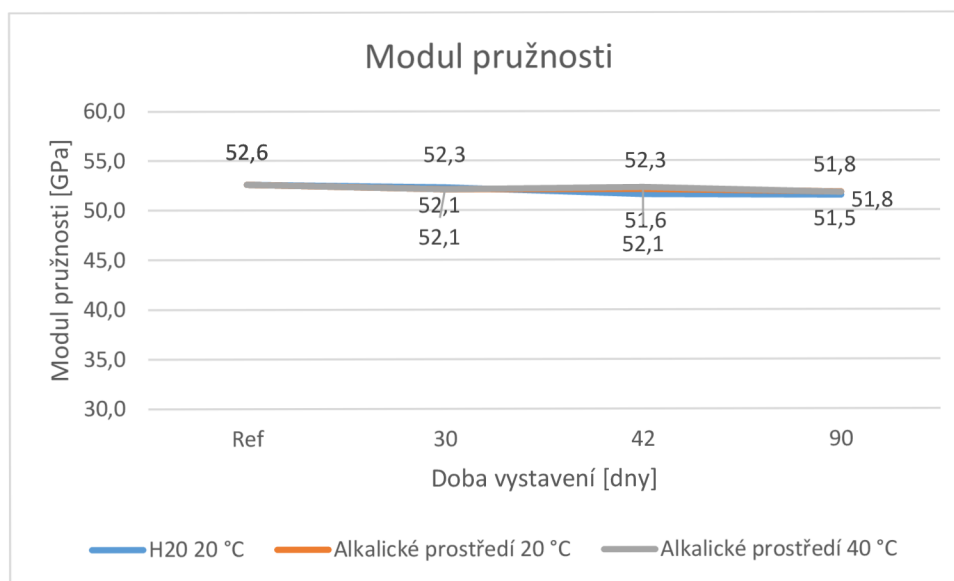
Označení vzorku	Fmax [kN]	Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]	Modul pružnosti (sečný) [GPa]	Průměrný modul pružnosti [GPa]
L_FRP_90d - A1	102,37	78,54	1303,42	1283,78	51,6	51,5
L_FRP_90d - A2	96,52	78,54	1228,93		52,0	
L_FRP_90d - A3	99,92	78,54	1272,22		51,6	
L_FRP_90d - A4	104,5	78,54	1330,54		51,0	
L_FRP_90d - B1	102,59	78,54	1306,22	1275,28	52,7	51,9
L_FRP_90d - B2	99,79	78,54	1270,57		51,3	
L_FRP_90d - B3	100,22	78,54	1276,04		51,9	
L_FRP_90d - B4	98,04	78,54	1248,28		51,4	
L_FRP_90d - C1	96,96	78,54	1234,53	1277,63	52,1	51,8
L_FRP_90d - C2	101,13	78,54	1287,63		52,2	
L_FRP_90d - C3	102,66	78,54	1307,11		52,8	
L_FRP_90d - C4	100,63	78,54	1281,26		50,1	



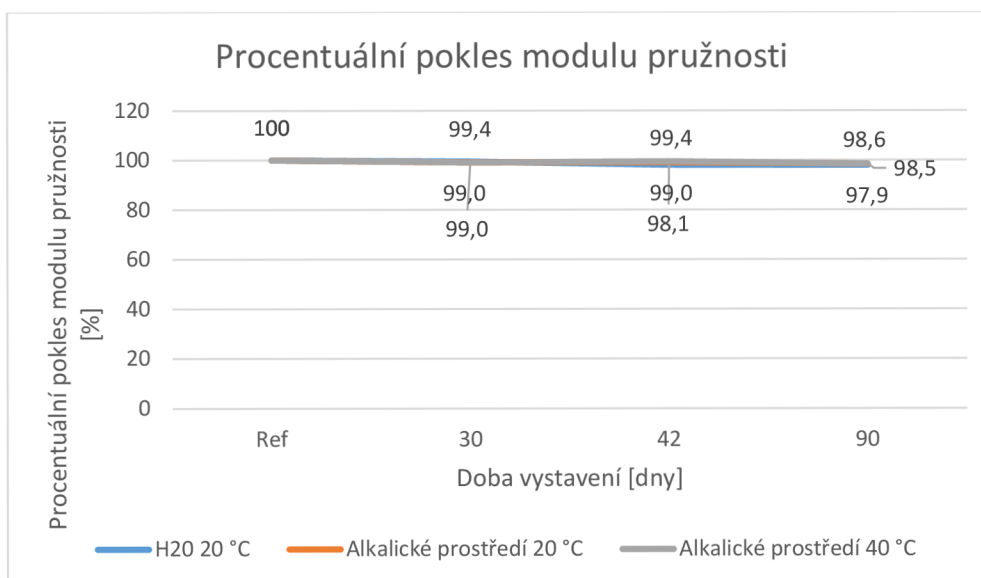
**Graf 1 Pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90 dní**



Graf 2 Procentuální pokles pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90 dní



Graf 3 Modul pružnosti FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90 dní



**Graf 4 Procentuální pokles modulu pružnosti u FRP výztuži – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90 dní**

Na obrázku č. 36 jsou FRP výztuže vystavené po dobu 90 dní agresivnímu prostředí. Vizuálně mezi nimi není viditelnější rozdíl.

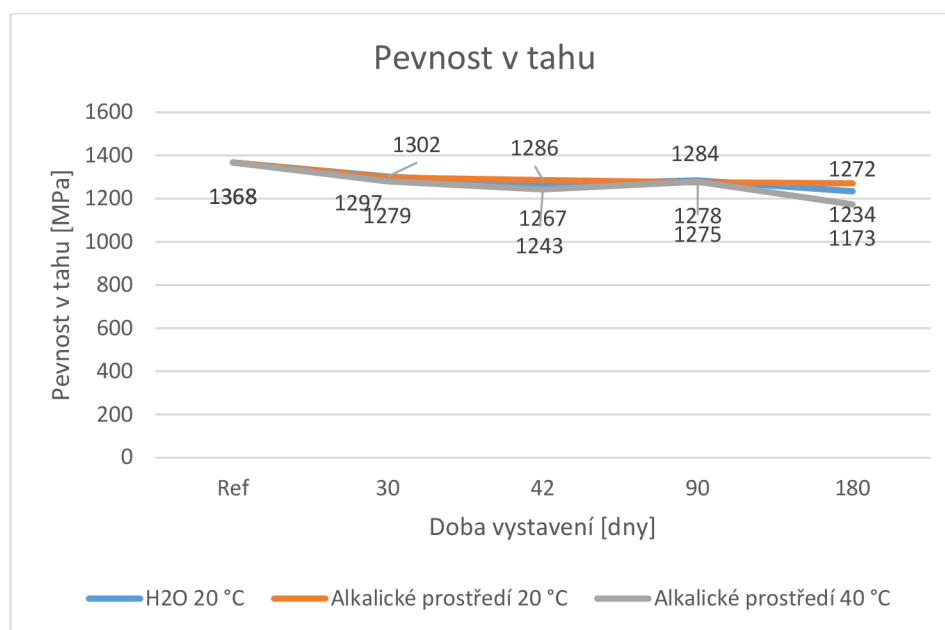


**Obrázek 36 Pevnost v tahu přímých prutů po 90 dnech expozice (zleva-vodní prostředí, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]**

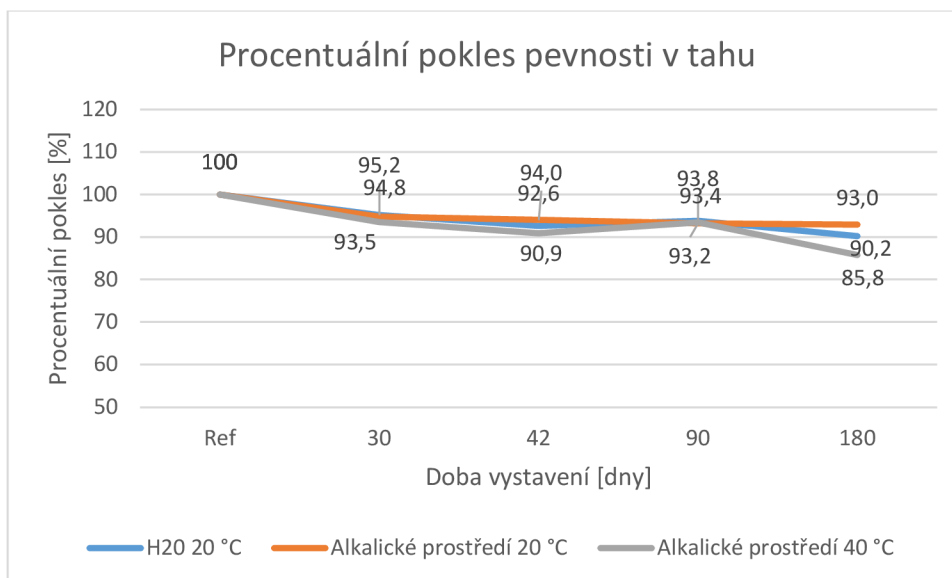
## Vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 180 dní

**Tabulka 5 Pevnost v tahu a modul pružnosti pro vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 180 dní**

Označení vzorku	Fmax [kN]	Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]	Modul pružnosti (sečný) [GPa]	Průměrný modul pružnosti [GPa]
L_FRP_90d - A1	96,8	78,54	1232,49	1234,15	53,45	52,32
L_FRP_90d - A2	96,56	78,54	1229,44		51,17	
L_FRP_90d - A3	97,54	78,54	1241,91		52,49	
L_FRP_90d - A4	96,82	78,54	1232,75		52,18	
L_FRP_90d - B1	100,32	78,54	1277,31	1271,58	52,33	52,52
L_FRP_90d - B2	99,92	78,54	1272,22		52,63	
L_FRP_90d - B3	97,92	78,54	1246,75		53,03	
L_FRP_90d - B4	101,32	78,54	1290,04		52,08	
L_FRP_90d - C1	86,29	78,54	1098,68	1173,26	46,53	47,55
L_FRP_90d - C2	95,16	78,54	1211,61		49,25	
L_FRP_90d - C3	96,18	78,54	1224,60		46,85	
L_FRP_90d - C4	90,96	78,54	1158,14		47,55	

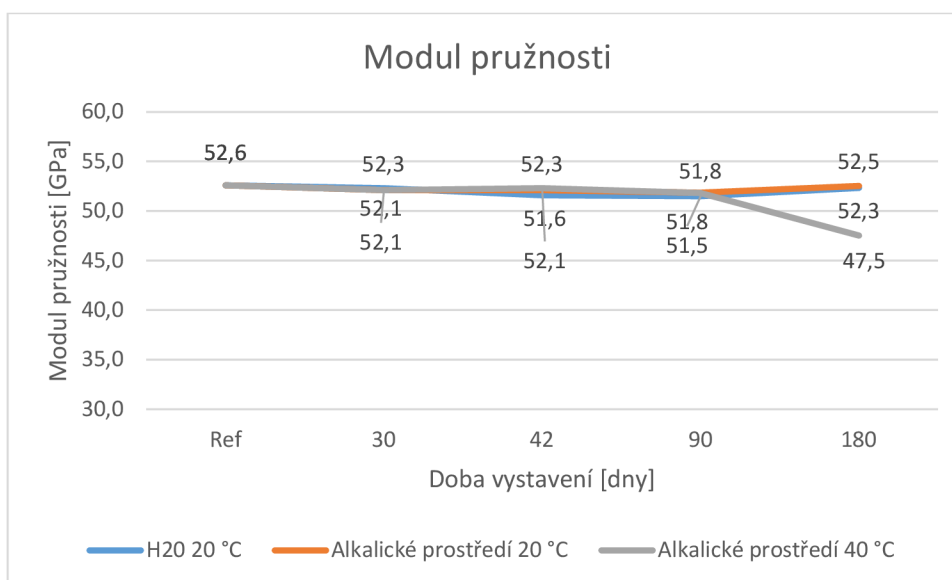


**Graf 5 Pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180 dní**

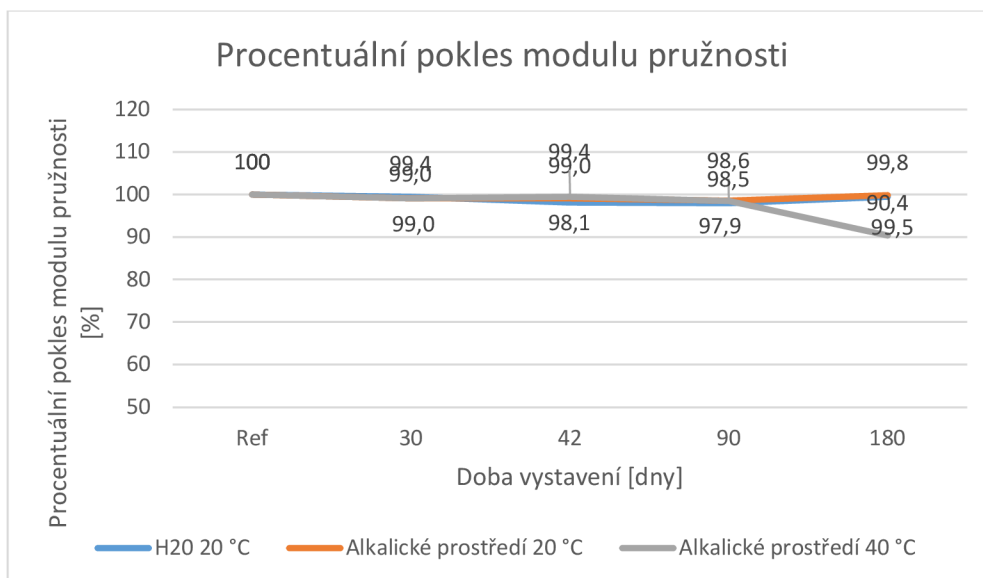


**Graf 6 Procentuální pokles pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180 dní**

U poklesu pevnosti v tahu lze pozorovat prvních znatelnějších známek degradace výztuže, kdy při vystavení 180 dní vzorky uložené v alkalickém prostředí při 40 °C mají nižší pevnost než vzorky vystavené ve vodním prostředí.



**Graf 7 Modul pružnosti FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180 dní**



**Graf 8 Procentuální pokles modulu pružnosti u FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180 dní**

Modul pružnosti, stejně jako pevnost v tahu, se znatelně mění poprvé až u vzorků vystavených 180 dní působení alkalického prostředí při 40 °C. Lze konstatovat, že do 90 dní si výztuže vystavené alkalickému prostředí při teplotě 40 °C držely svým způsobem mechanické vlastnosti a nebyly na nich znatelné nijak výrazné pevnostní změny vůči ostatním výztužím. Při 180 dnech lze již vidět, že alkalické prostředí při zvýšené teplotě znatelně urychluje degradaci výztuže. Dle výsledků si výztuž dokázala udržet svoje vlastnosti pouze do určité doby.

Tento výsledek je mírně překvapivý, pokud se srovná s výsledky z elektronového mikroskopu, kde výsledky výztuží uložených v agresivním prostředí po 90 dnech vypadají mnohem více napadené/poškozené (viz obr. č. 63 a 64), nežli výztuže po 180 dnech v agresivním prostředí (obr. č. 65 a 66).

Na obrázku č. 37 jsou FRP výztuže vystavené po dobu 180 dní agresivnímu prostředí. Vizuálně mezi nimi lze již pozorovat jisté rozdíly. U vzorků uložených v alkalickém prostředí se objevují jakoby spleené kousky vláken a pryskyřice, což u vzorků uložených ve vodě pozorovat nelze.



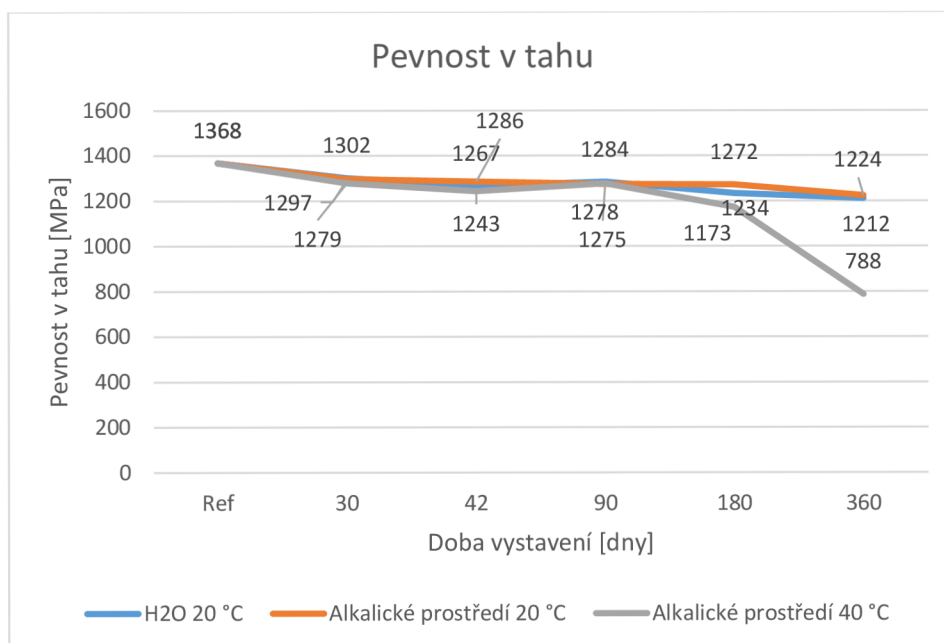


Obrázek 37 Pevnost v tahu přímých prutů po 180 dnech expozice (zleva-vodní prostředí, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]

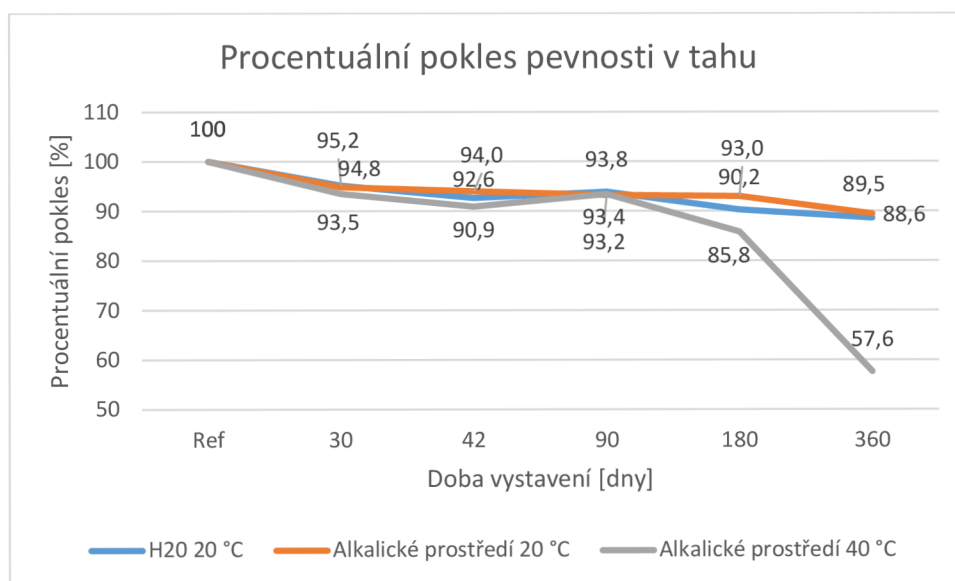
Vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 360 dní

Tabulka 6 Pevnost v tahu a modul pružnosti pro vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 360 dní

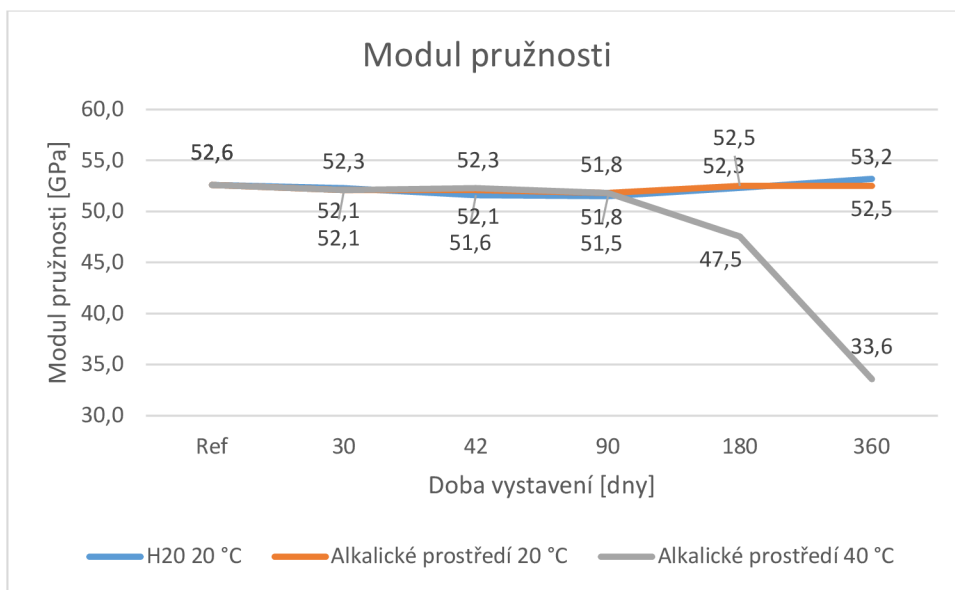
Označení vzorku	Fmax [kN]	Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]	Modul pružnosti (sečný) [GPa]	Průměrný modul pružnosti [GPa]
L_FRP_90d - A1	97,1	78,54	1236,31	1212,12	52,91	53,20
L_FRP_90d - A2	94,58	78,54	1204,23		53,44	
L_FRP_90d - A3	93,92	78,54	1195,82		53,24	
L_FRP_90d - B1	92,72	78,54	1180,54	1223,81	52,45	52,51
L_FRP_90d - B2	96,82	78,54	1232,75		52,34	
L_FRP_90d - B3	99,29	78,54	1264,20		54,52	
L_FRP_90d - B4	97,88	78,54	1246,24		50,20	
L_FRP_90d - B5	93,88	78,54	1195,31		53,03	
L_FRP_90d - C1	65,88	78,54	838,81	788,26	32,22	33,57
L_FRP_90d - C2	58,66	78,54	746,88		35,98	
L_FRP_90d - C3	56,15	78,54	714,92		31,48	
L_FRP_90d - C4	61,33	78,54	780,88		34,87	
L_FRP_90d - C5	67,53	78,54	859,82		33,32	



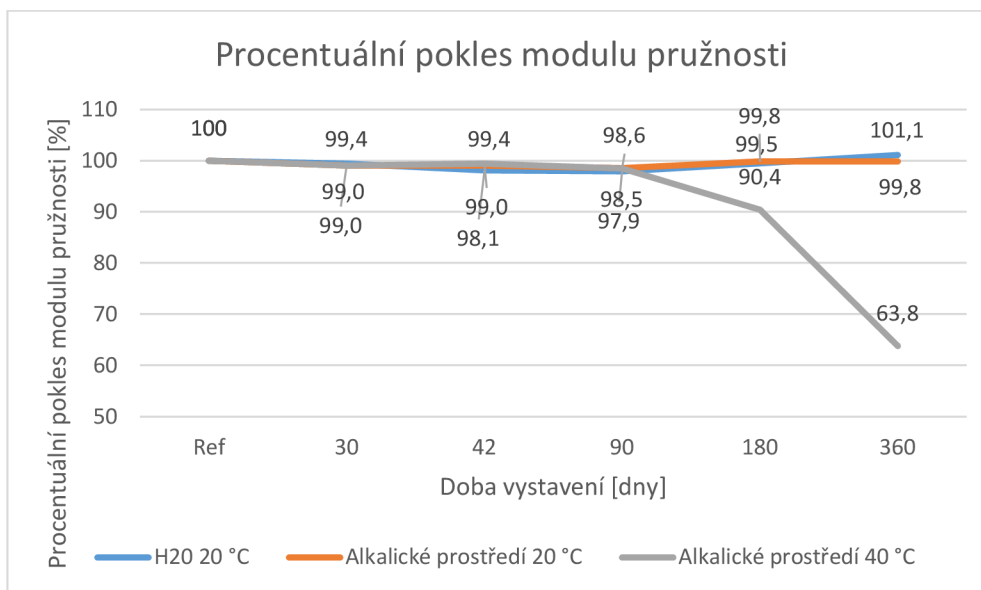
Graf 9 Pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180, 360 dní



Graf 10 Procentuální pokles pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180, 360 dní



Graf 11 Modul pružnosti u FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180, 360 dní



Graf 12 Procentuální pokles modulu pružnosti u FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180, 360 dní

U pevností v tahu i modulu pružnosti lze vidět obdobných průběhů, kde největší pokles nastal u vzorků uložených 360 dní v agresivním prostředí při 40 °C. U pevnosti se dostala hodnota na 57,6 % z původní pevnosti a u modulu pružnosti procentuální pokles propadl až na 63,8 %.

Na obrázku č. 38 jsou FRP výztuže vystavené po dobu 360 dní agresivnímu prostředí. Na obrázku lze vidět u vzorků vystavených působení vodního prostředí místo předpokládaného „roztřepení“, jak tomu bylo i u předešlých vzorků, rozpraskanou výztuž, kde jsou v různých místech „kusy“ slepených vláken a pryskyřice. Naopak u vzorků vystavených alkalickému prostředí tento jev pozorovat nelze. Došlo zde k delaminaci výztuže.



Obrázek 38 Pevnost v tahu přímých prutů po 360 dnech expozice (zleva-vodní prostředí, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]

### Závěr testování pevnosti v tahu přímých prutů

Pevnost v tahu se testovala dle americké normy ASTM D7205, kde byly pruty opatřeny po obou stranách závitovými tyčemi, na které se při zkoušce upevnily kotvy. Ty se poté upevnily do lisu pro následující zkoušení.

Při vyhodnocování výsledků se postupovalo dle normy, kdy se vypočítá průměrná hodnota pevností v tahu a následně z něj 10% odchylka. Veškeré hodnoty, které se nevejdou do tohoto intervalu se vyřadí.

Při pozorování vývinu pevností se začaly hodnoty lišit teprve až při vystavení vzorků agresivnímu prostředí po dobu 180 dní. Konkrétně se jednalo o vzorky vystavené alkalickému prostředí při 40 °C. Trend, kdy se začala snižovat těmto vzorkům pevnost, trval i po vystavení alkalickému prostředí při teplotě 40 °C po 360 dnech. Z těchto výsledků lze konstatovat jako odůvodněný vliv alkalického prostředí při zvýšené teplotě, což věrně simuluje urychlení vlivu agresivního prostředí v čase.

## 2.6 Pevnost v tahu – ohýbané vzorky

V návaznosti na předchozí experiment se zkoušely ohýbané výztuže v podobě L - konfigurace. Jednalo se o manuálně vyrobené třmínky, které se následně nařezaly na požadované velikosti (viz obr. č. 39). Následně se uchytily do formy a vylily se betonem (obr. č. 40). Dle americké směrnice (ACI 440.3R) a kanadské normy (CSA S806) se betonové bloky vyztužují kombinací ocelové i kompozitní výztuže. Pro usnadnění přípravy vzorků byl zvolen vysokopevnostní beton C60/75, který zaručil vysokou pevnost (viz tab. č. 10, 12, 14, 16 a 18), čímž se nemusely vzorky vyztužovat ocelovou výztuží.



Obrázek 39 Vlevo – třmínek v dodaném stavu, vpravo – třmínek po řezání připravený k osazení do formy [Aneta Blahová]



Obrázek 40 Výroba betonových bloků (vlevo-formy s výztuží před zalitím, vpravo-formy s výztuží po zalití betonem) [Aneta Blahová]

### Složení UHPC C60/75:

- Cement

Jako cement byl použit cement CEM I 42,5 R z výrobního závodu Mokrý

- Mikrosilika

Jako mikrosilika se použila mikrosilika od firmy BASF Stavební hmoty Česká republika, s.r.o.

- Kamenivo

Kamenivo sestávalo ze tří různých frakcí a různých závodů, konkrétně se jednalo o:

- 0-4 mm ze závodu Žabčice, prané kamenivo
- 4-8 mm z Polničky
- 8-16 mm z Olbramovic

- Voda

Jako voda se využila nezávadná voda z Brněnského vodovodního řádu, která splňuje požadavky na nezávadnost.

- Plastifikační přísada

Poslední složkou je plastifikační přísada Mapei Dynamon SF Advanced 36. Jedná se o plastifikační přísadu na bázi polykarboxylátetherů. Mezi vlastnosti se řadí vysoká redukce vody již při malé dávce a snadná zpracovatelnost. [5]

Následující tabulky obsahují výsledné hodnoty po stanovení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu, pevnosti v tlaku a příčném tahu.

### Zkoušení betonu na vzorky po 30 dnech (1. směs):

**Tabulka 7 Vyhodnocení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a pevnosti betonu v tlaku**

Vzorek	Stáří vzorků [dny]	Hmotnost [kg]	Rozměry [mm]			Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla [kN]	Pevnost v tlaku $f_{ci}$ [Mpa]
			l	b	h			
1	6	8,14	149,9	149,9	150,3	2410	1854	82,3
2		8,13	149,9	150	149,8	2410	1877	83,6
$\Sigma$		8,14	149,9	150,0	150,1	2410	1866	83,0

Tabulka 8 Vyhodnocení pevnosti v příčném tahu

Vzorek	Stáří vzorků [dny]	Hmotnost [kg]	Rozměry [mm]		Síla [kN]	Pevnost v příčném tahu $f_{ct}$ [Mpa]
			d	L		
1	6	8,14	149,9	149,8	215,1	6,1
2		8,05	149,9	149,7	179,4	5,1
$\Sigma$		8,10	149,9	149,8	197,3	5,6

Zkoušení betonu na vzorky po 42 dnech (2. směs):

Tabulka 9 Vyhodnocení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a pevnosti betonu v tlaku

Vzorek	Stáří vzorků [dny]	Hmotnost [kg]	Rozměry [mm]			Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla [kN]	Pevnost v tlaku $f_{ci}$ [Mpa]
			l	b	h			
1	18	8,15	149,7	149,5	151,2	2410	2214	97,9
2		8,11	149,7	149,7	149,4	2420	2183	97,6
3		8,15	149,6	149,7	150,5	2420	2232	99,2
$\Sigma$		8,14	149,7	149,6	150,4	2420	2210	98,2

Tabulka 10 Vyhodnocení pevnosti v příčném tahu

Vzorek	Stáří vzorků [dny]	Hmotnost [kg]	Rozměry [mm]		Síla [kN]	Pevnost v příčném tahu $f_{ct}$ [Mpa]
			d	L		
1	18	8,23	149,7	149,7	197,5	5,6
2		8,09	149,8	149,8	210,2	6,0
3		8,14	149,8	149,8	209,0	5,9
$\Sigma$		8,15	149,8	149,8	205,6	5,8

Zkoušení betonu na vzorky po 90 dnech (3. směs):

Tabulka 11 Vyhodnocení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a pevnosti betonu v tlaku

Vzorek	Stáří vzorků [dny]	Hmotnost [kg]	Rozměry [mm]			Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla [kN]	Pevnost v tlaku $f_{ci}$ [Mpa]
			l	b	h			
1	6	8,19	149,9	149,9	148,9	2450	1853	83,1
2		8,29	149,9	150,0	151,4	2440	1900	83,7
3		8,25	149,9	149,9	150,1	2440	2029	90,2
$\Sigma$		8,24	149,9	149,9	150,1	2420	1927	85,7

Tabulka 12 Vyhodnocení pevnosti v příčném tahu

Vzorek	Stáří vzorků [dny]	Hmotnost [kg]	Rozměry [mm]		Síla [kN]	Pevnost v příčném tahu $f_{ct}$ [Mpa]
			d	L		
1	6	8,29	149,9	150,1	191,3	5,4
2		8,22	150,0	150,0	190,3	5,4
3		8,19	150,0	150,0	171,7	4,9
<b>Σ</b>		<b>8,23</b>	<b>150,0</b>	<b>150,0</b>	<b>184,4</b>	<b>5,2</b>

Zkoušení betonu na vzorky po 180 dnech (4. směs):

Tabulka 13 Vyhodnocení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a pevnosti betonu v tlaku

Vzorek	Stáří vzorků [dny]	Hmotnost [kg]	Rozměry [mm]			Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla [kN]	Pevnost v tlaku $f_{ci}$ [Mpa]
			l	b	h			
1	7	8,23	149,7	149,7	150,7	2440	2052	90,9
2		8,20	149,8	149,7	149,7	2440	2028	90,5
3		8,23	149,7	149,8	150,5	2440	1993	88,5
<b>Σ</b>		<b>8,22</b>	<b>149,7</b>	<b>149,7</b>	<b>150,3</b>	<b>2420</b>	<b>2024</b>	<b>90,0</b>

Tabulka 14 Vyhodnocení pevnosti v příčném tahu

Vzorek	Stáří vzorků [dny]	Hmotnost [kg]	Rozměry [mm]		Síla [kN]	Pevnost v příčném tahu $f_{ct}$ [Mpa]
			d	L		
1	7	8,14	149,9	149,7	211,0	6,0
2		8,24	149,8	149,8	207,2	5,9
3		8,23	149,9	149,8	218,2	6,2
<b>Σ</b>		<b>8,20</b>	<b>149,9</b>	<b>149,8</b>	<b>212,1</b>	<b>6,0</b>

Zkoušení betonu na vzorky po 360 dnech (5. směs):

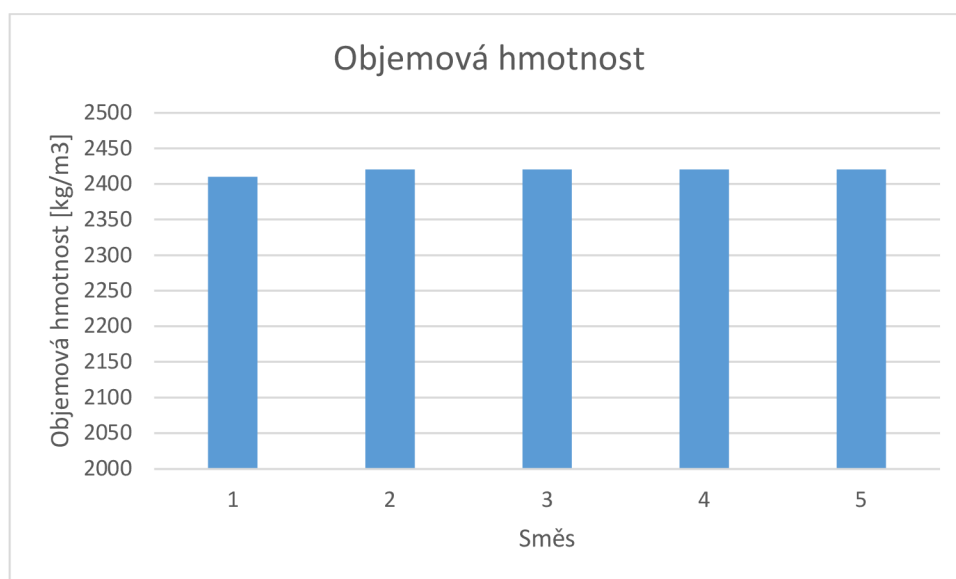
Tabulka 15 Vyhodnocení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a pevnosti betonu v tlaku

Vzorek	Stáří vzorků [dny]	Hmotnost [kg]	Rozměry [mm]			Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Síla [kN]	Pevnost v tlaku $f_{ci}$ [Mpa]
			l	b	h			
1	4	8,17	149,6	149,7	150,0	2430	1431	63,8
2		8,20	149,6	149,6	150,4	2440	1390	61,8
3		8,13	149,7	149,7	148,7	2440	1382	62,1
<b>Σ</b>		<b>8,17</b>	<b>149,6</b>	<b>149,7</b>	<b>149,7</b>	<b>2420</b>	<b>1401</b>	<b>62,6</b>

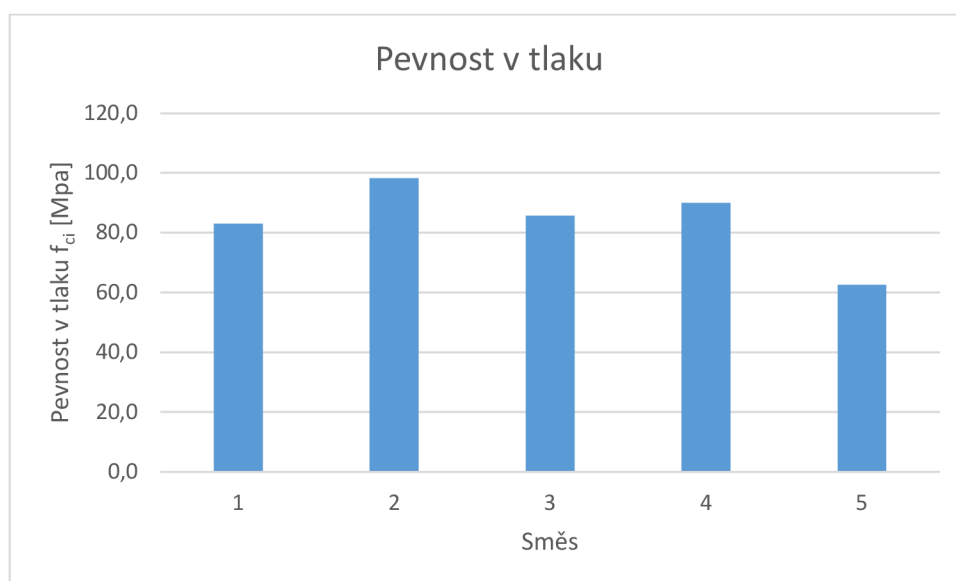


Tabulka 16 Vyhodnocení pevnosti v příčném tahu

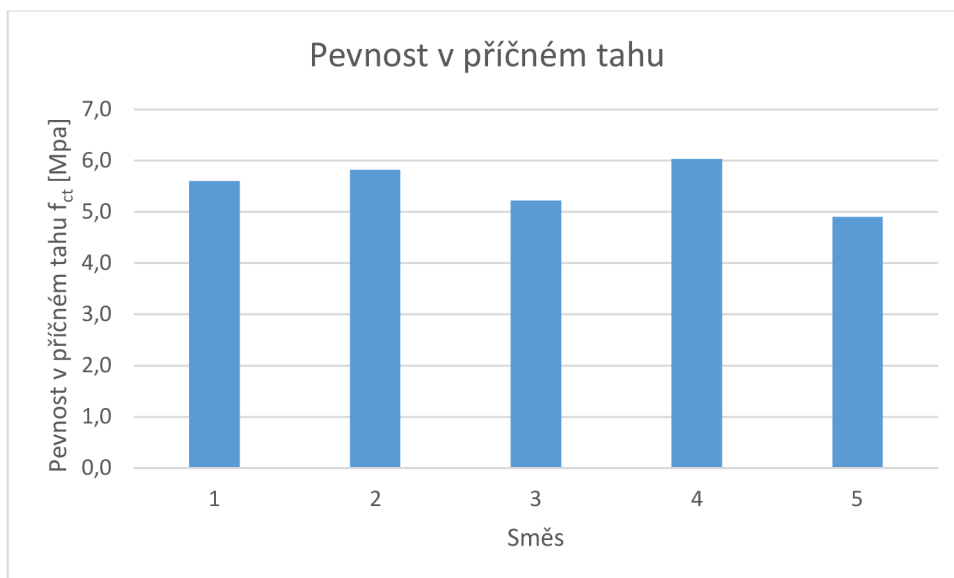
Vzorek	Stáří vzorků [dny]	Hmotnost [kg]	Rozměry [mm]		Síla [kN]	Pevnost v příčném tahu $f_{ct}$ [Mpa]
			d	L		
1	4	8,15	149,6	149,6	170,2	4,9
2		8,14	149,8	149,7	174,3	5,0
3		8,23	149,7	149,7	172,1	4,9
$\Sigma$		<b>8,17</b>	<b>149,7</b>	<b>149,7</b>	<b>172,2</b>	<b>4,9</b>



Graf 13 Objemová hmotnost betonových směsí



Graf 14 Pevnost v tlaku betonových směsí



**Graf 15 Pevnost v příčném tahu betonových směsí**

Betonové bloky se odformovávaly po čtyřech až osmnácti dnech s tím, že poptávaných pevností dosáhly již po třech dnech. Po odformování se vzorky připravily pro zkoušení ve speciálně upraveném lisu. Vzorek se usadil do ocelového profilu, který držel kvádr pevně díky působícímu tlaku 150 baru na něj. Poté se provlékla závitová tyč hlavou od lisu a namontovala se na ni velká matka z vnitřní části hlavy lisu (obr. č. 41). Tím byl vzorek pevně uchycen a připraven ke zkoušení. Rychlost zatěžování byla 4 mm/min.



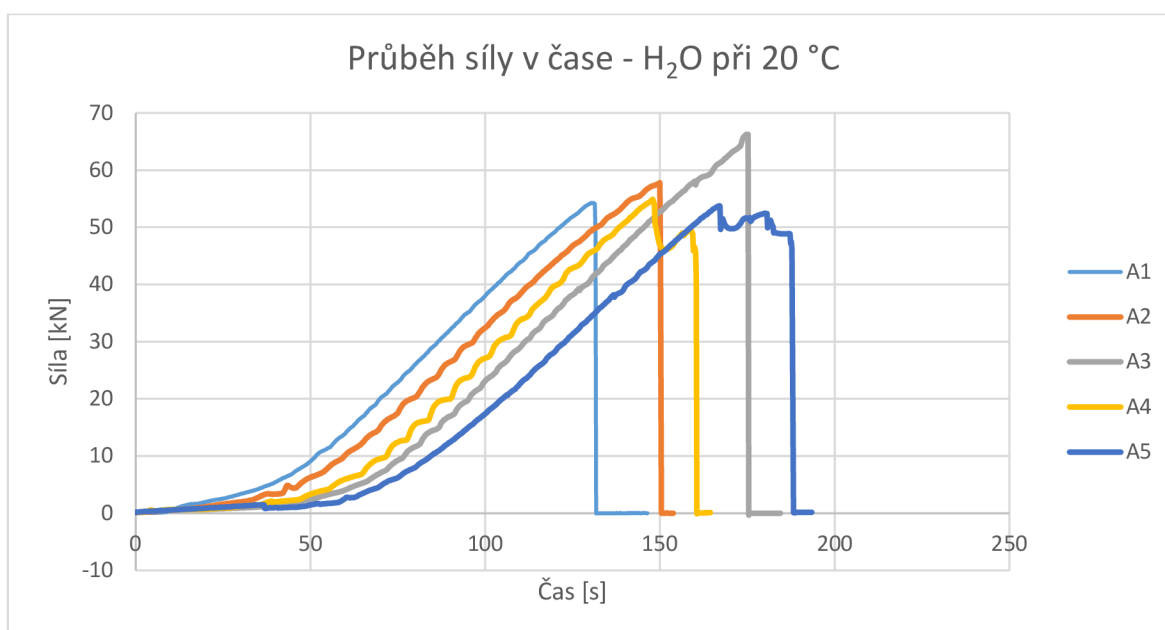
**Obrázek 41 Uchycení vzorku v lisu [Aneta Blahová]**

U ohýbaných FRP výztuží se počítaly pouze pevnosti v tahu, jelikož vzhledem k sofistikovanému zkušebnímu zařízení nebyla možnost umístění tenzometru na výztuž, neboť hlava lisu navazovala na závitovou tyč a délka volné výztuže mezi závitovou tyčí a betonovým blokem je minimální, jak lze vidět na obr. č. 41.

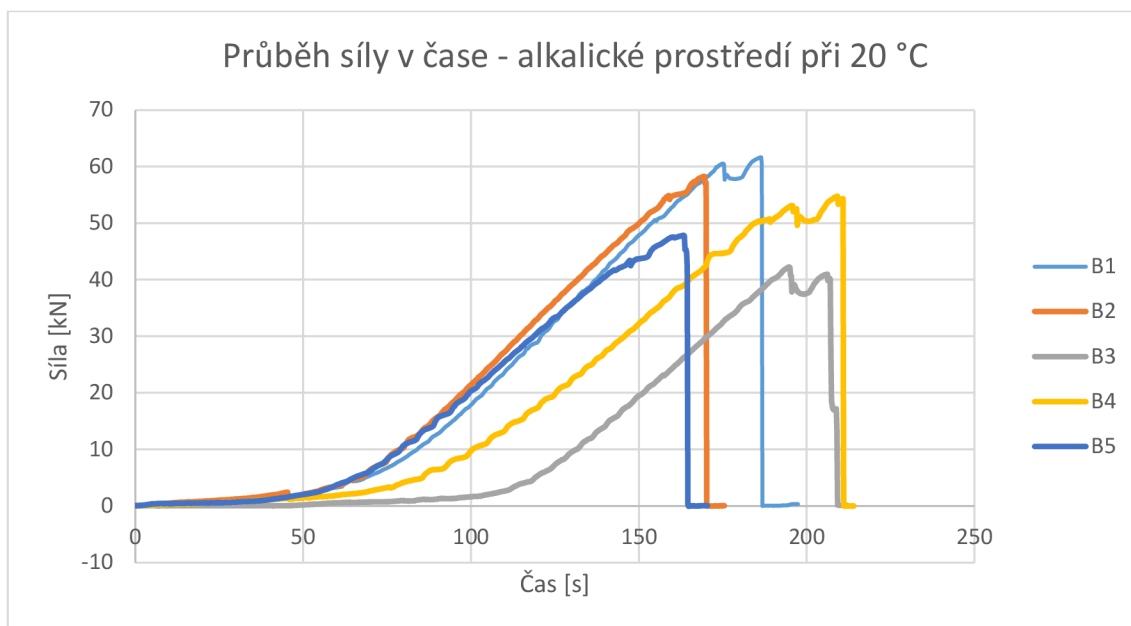
### Vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 90 dní

**Tabulka 17 Pevnost v tahu pro vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 90 dní**

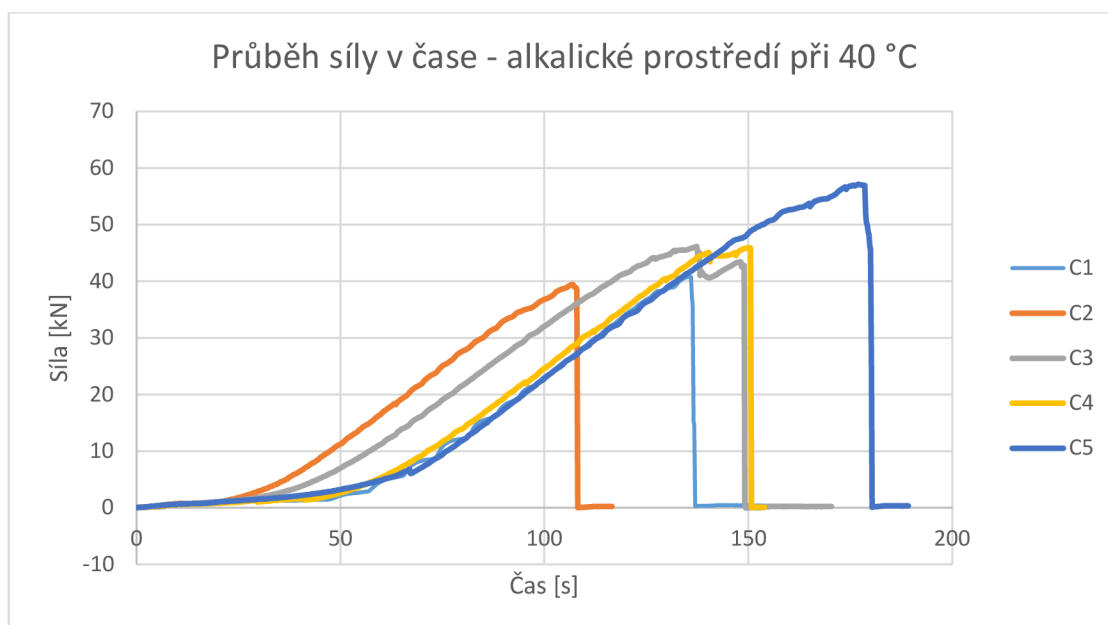
Označení vzorku	Fmax [kN]	Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
L_FRP_90d - A1	54,33	78,54	691,75	731,53
L_FRP_90d - A2	57,86	78,54	736,69	
L_FRP_90d - A3	66,3	78,54	844,16	
L_FRP_90d - A4	54,97	78,54	699,90	
L_FRP_90d - A5	53,81	78,54	685,13	
L_FRP_90d - B1	61,7	78,54	785,59	676,19
L_FRP_90d - B2	58,68	78,54	747,14	
L_FRP_90d - B3	42,3	78,54	538,58	
L_FRP_90d - B4	55	78,54	700,28	
L_FRP_90d - B5	47,86	78,54	609,37	
L_FRP_90d - C1	40,84	78,54	519,99	584,85
L_FRP_90d - C2	39,47	78,54	502,55	
L_FRP_90d - C3	46,18	78,54	587,98	
L_FRP_90d - C4	46,02	78,54	585,94	
L_FRP_90d - C5	57,16	78,54	727,78	



**Graf 16 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 90 dní ve vodním prostředí při 20 °C**



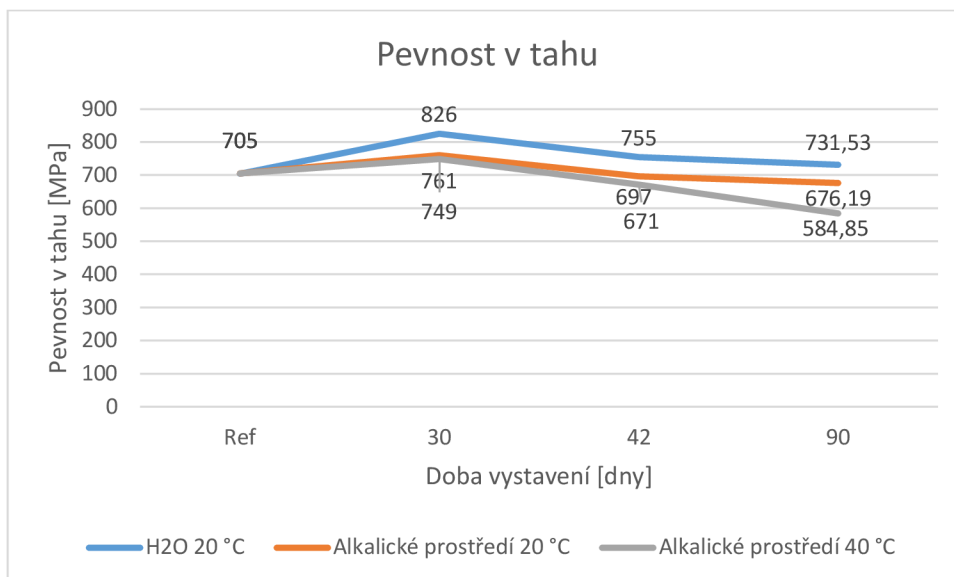
**Graf 17 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 90 dní v alkalickém prostředí při 20 °C**



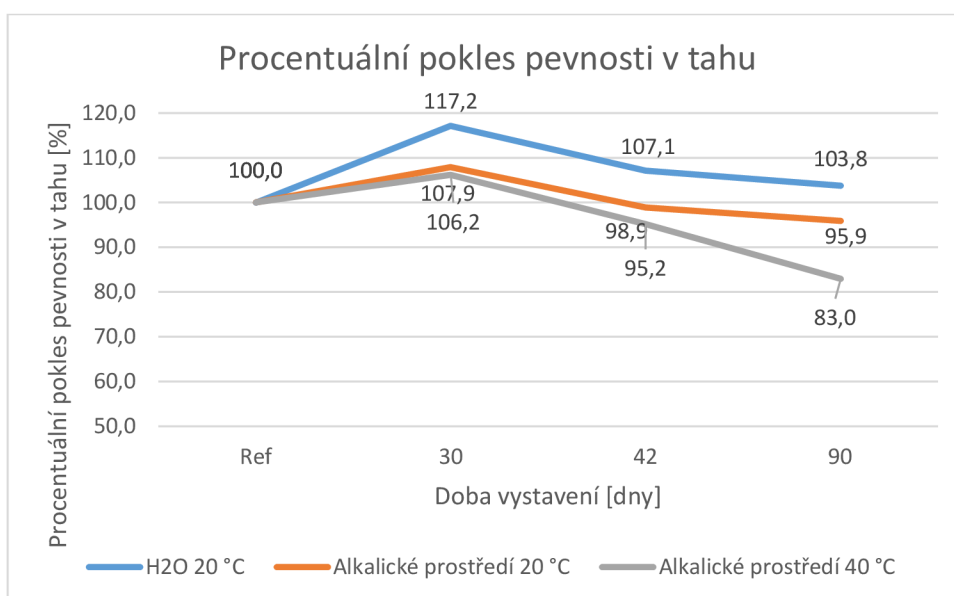
**Graf 18 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 90 dní v alkalickém prostředí při 40 °C**

Dle správného postupu by měl výpočet po získání pevností pokračovat vytvořením průměrné pevnosti z naměřených vzorků, následně 10% směrodatná odchylka z nich a hodnoty, které se do této odchylky nevměstí vyřadit. Jak lze vidět na grafech č. 16, 17 a 18,

pevnosti v tahu ohýbaných FRP výztuží mají velký rozptyl. Pokud by se postupovalo dle postupu, dostalo by se až do extrému, kdy by se vystupovalo pouze z jedné hodnoty, nebo by byly zamítnuté všechny. Proto při vyhodnocování pevností v tahu ohýbaných třmíneků budou využity všechny hodnoty.



Graf 19 Pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90 dní



Graf 20 Procentuální pokles pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90 dní

Pevnost v tahu po 90 dnech vystavení v agresivním prostředí se mírně rozlišuje. Co je však zajímavý fakt je nejen snižování pevnosti, ale i narůstání během prvních 30 až 42 dnů po vystavení v agresivním prostředí.

Na obr. č. 42 jsou již veškeré přímé výztuže po uskutečnění tahové zkoušky. Lze vidět několik vzorků, které se přetrhly v ohýbané části, jak bylo chtěné. Také lze pozorovat vzorky, kde k přetrhnutí došlo v přímé části, nebo těsně za začátkem ohýbané části.

Žádný ze vzorků nebyl vyřazený kvůli nepodařenému přetrhnutí, nebo vytrhnutí.

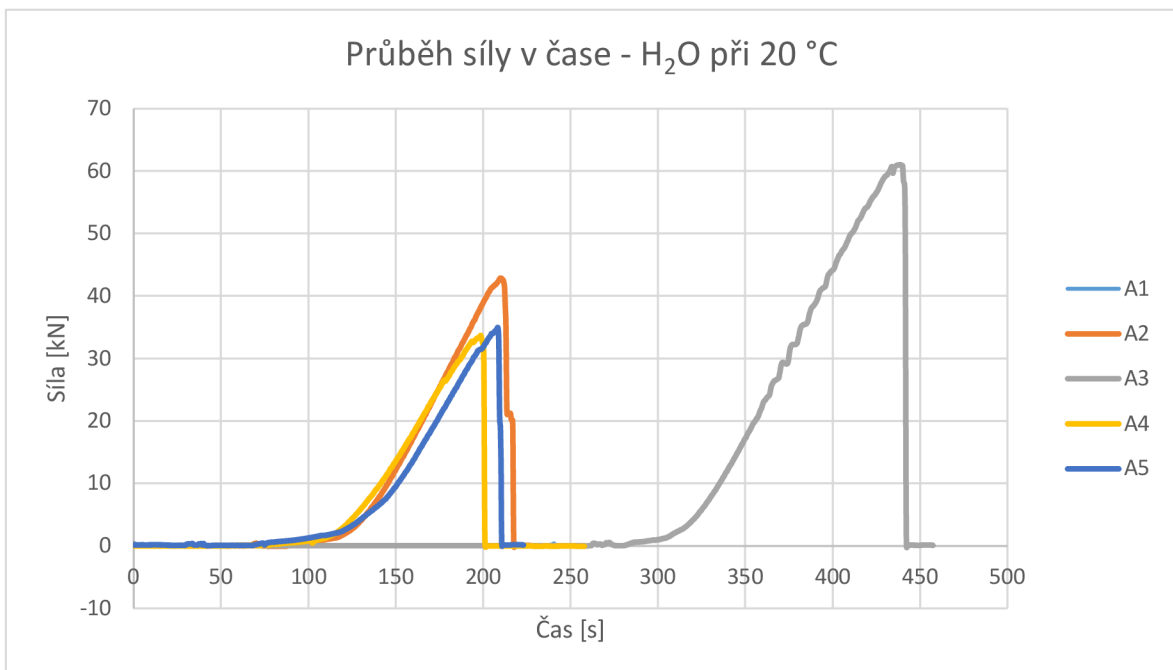


Obrázek 42 Vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 90 dní po pevnostní zkoušce (shora-H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]

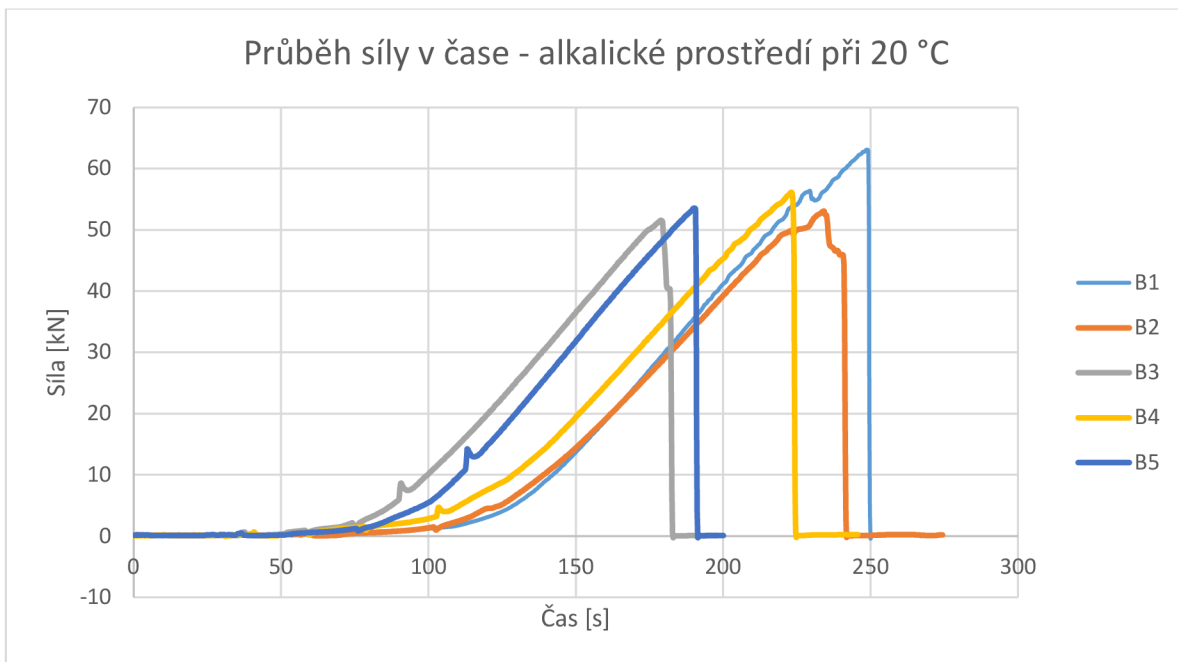
## Vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 180 dní

Tabulka 18 Pevnost v tahu pro vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 180 dní

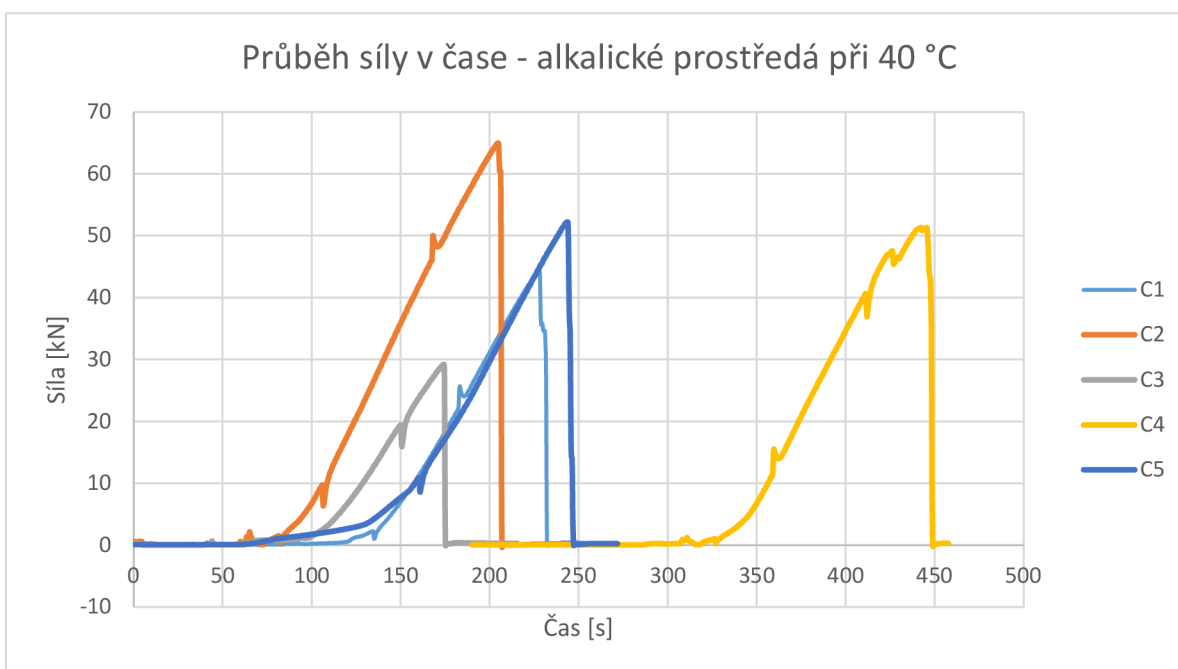
Označení vzorku	Fmax [kN]	Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
L_FRP_180d - A1	61,01	78,54	776,80	597,68
L_FRP_180d - A2	42,86	78,54	545,71	
L_FRP_180d - A3	62,2	78,54	791,95	
L_FRP_180d - A4	33,69	78,54	428,95	
L_FRP_180d - A5	34,95	78,54	445,00	
L_FRP_180d - B1	63,11	78,54	803,54	706,70
L_FRP_180d - B2	53,08	78,54	675,83	
L_FRP_180d - B3	51,59	78,54	656,86	
L_FRP_180d - B4	56,17	78,54	715,18	
L_FRP_180d - B5	53,57	78,54	682,07	
L_FRP_180d - C1	44,26	78,54	563,53	616,14
L_FRP_180d - C2	64,95	78,54	826,97	
L_FRP_180d - C3	29,2	78,54	371,79	
L_FRP_180d - C4	51,33	78,54	653,55	
L_FRP_180d - C5	52,22	78,54	664,88	



Graf 21 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 180 dní ve vodním prostředí při 20 °C



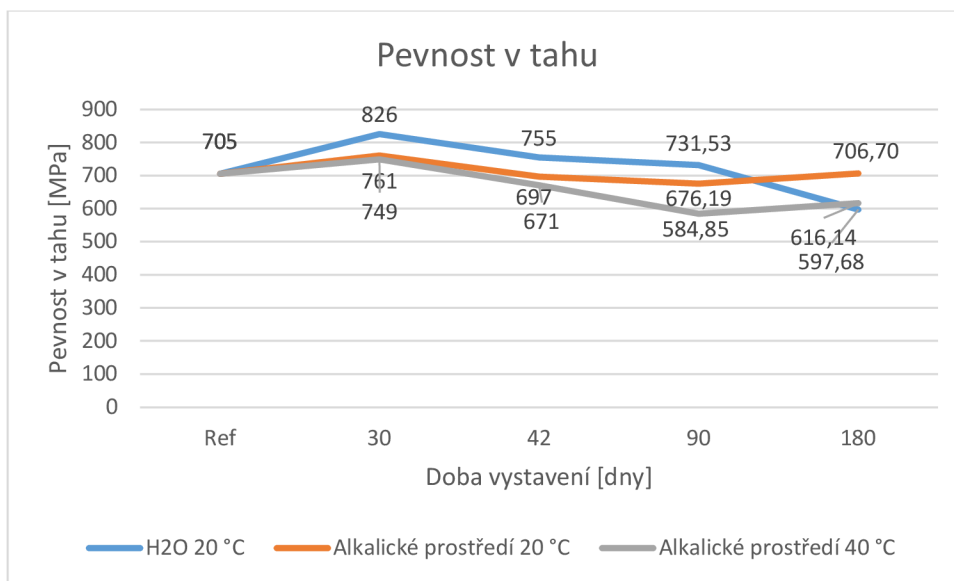
**Graf 22 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 180 dní v alkalickém prostředí při 20 °C**



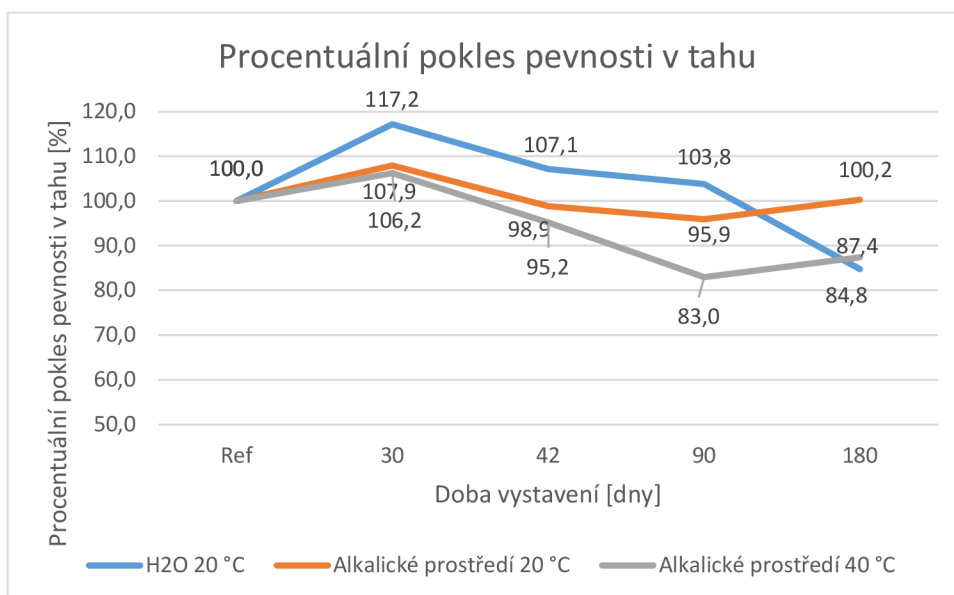
**Graf 23 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 180 dní v alkalickém prostředí při 40 °C**

Jak již bylo zmíněno, pravidlo vyřazení vzorků, které nespádají do 10% odchylky, nebylo možno dodržet kvůli velkému rozptylu hodnoty pevností v tahu ohýbaných FRP výztuží.





Graf 24 Pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180 dní



Graf 25 Procentuální pokles pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180 dní

Pevnost v tahu po 180 dnech uložených vzorků v agresivním prostředí se stále nijak rapidně neliší. Překvapením se stává vzorek uložený ve vodním prostředí při 20 °C, který má nižší pevnost v tahu, než vzorek uložený v alkalickém prostředí při 20 °C. Možným vysvětlením je velký rozptyl hodnot a tím možná nepřesnost vyhodnocování výsledků.

Na následujícím obrázku jsou výztuže již po zkoušení a lze pozorovat, že nejúspěšnějšími vzorky na požadované přetrhnutí v ohybu jsou vzorky vystavené agresivnímu prostředí při 40 °C. U zbytku výztuži až na pár výjimek lze opět pozorovat přetrhnutí již v přímé části, nebo na úplném začátku ohýbané části. Tento jev může být důsledkem působení agresivního prostředí a oslabení výztuže nejen v ohýbané části.

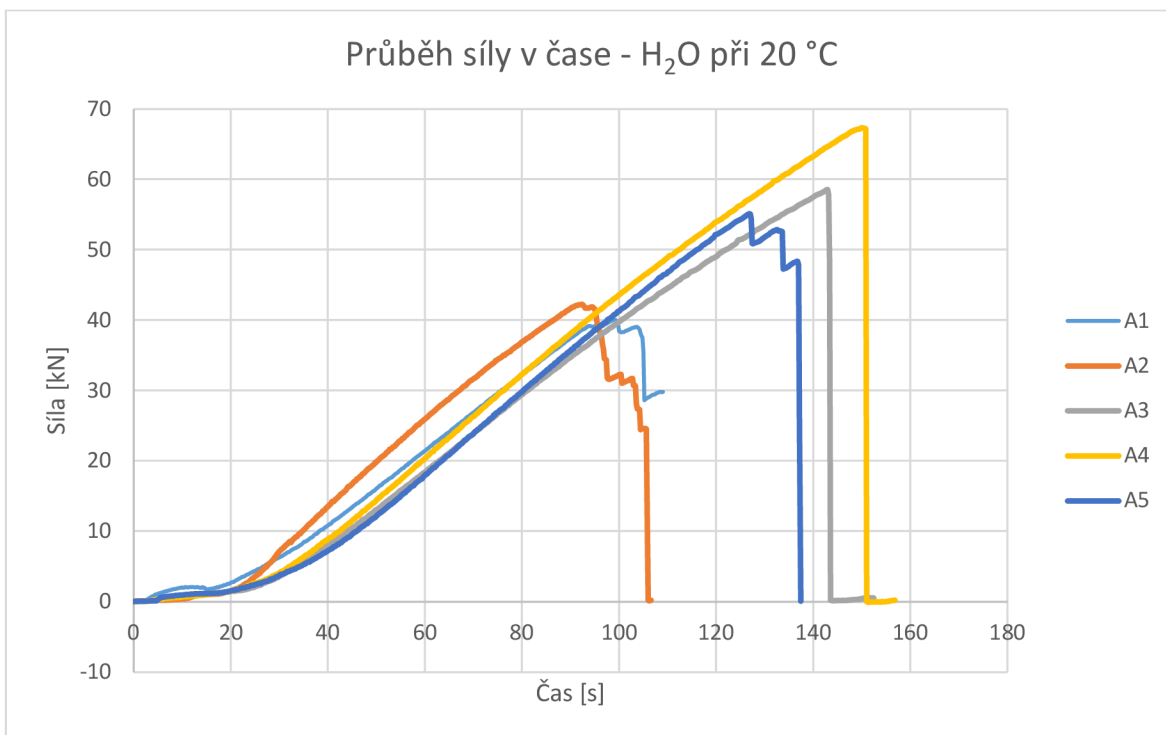


**Obrázek 43** Vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 180 dní po pevnostní zkoušce (shora-H2O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]

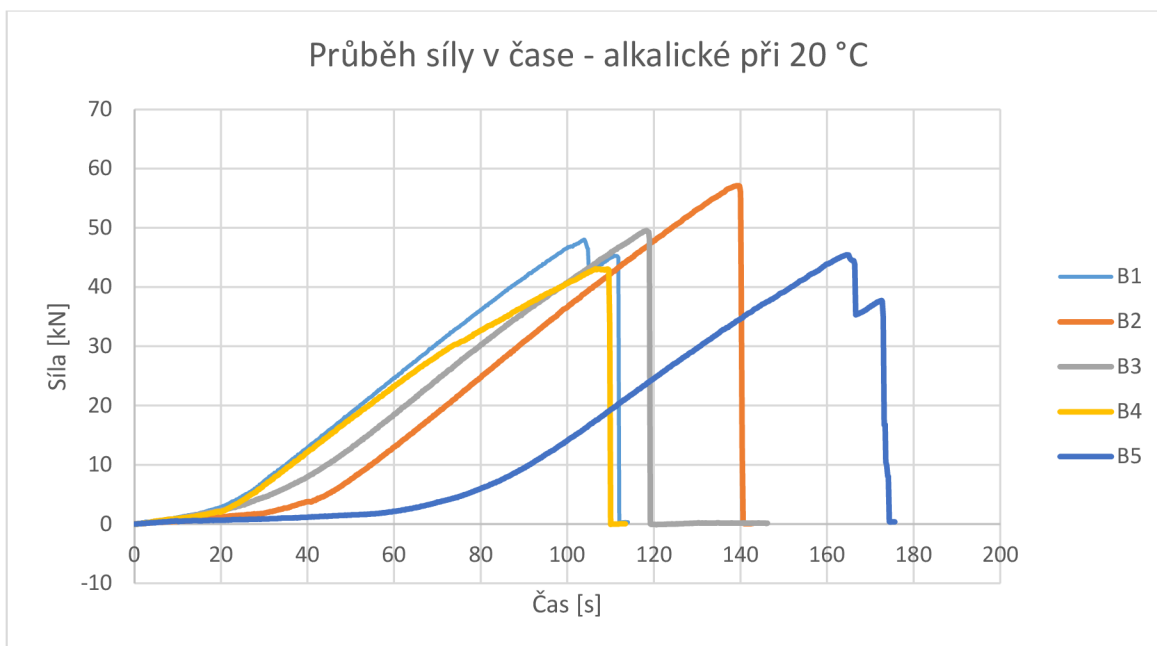
## Vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 360 dní

**Tabulka 19 Pevnost v tahu pro vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 360 dní**

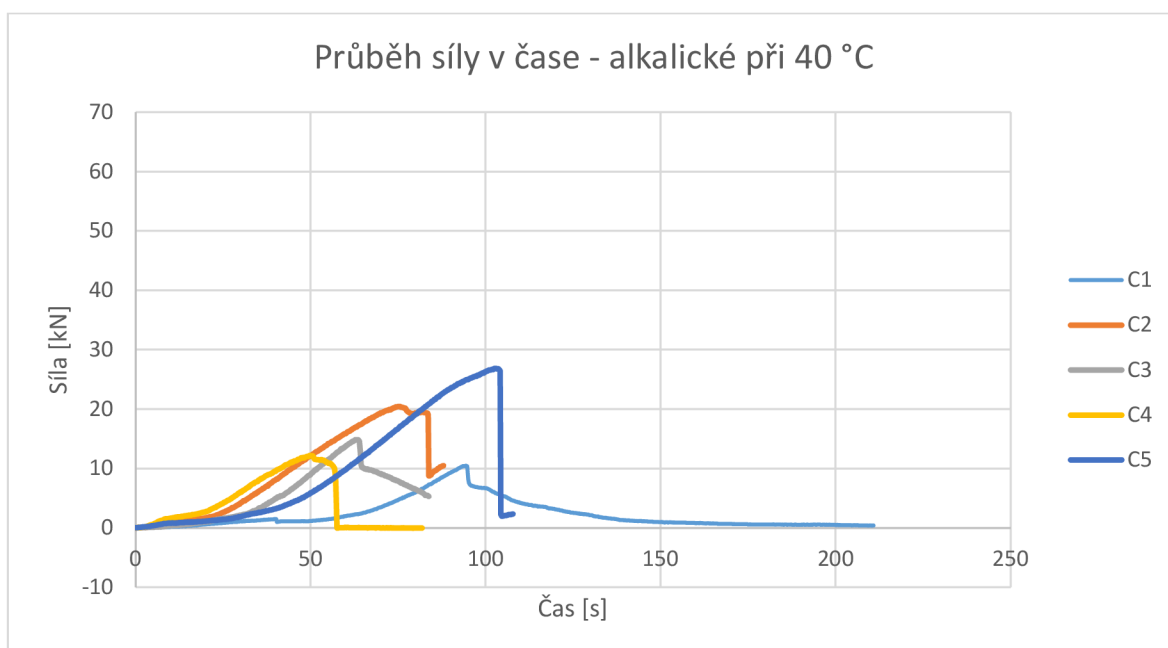
Označení vzorku	Fmax [kN]	Plocha [mm <sup>2</sup> ]	Pevnost [MPa]	Průměrná pevnost [MPa]
L_FRP_90d - A1	40,12	78,54	510,82	670,84
L_FRP_90d - A2	42,3	78,54	538,58	
L_FRP_90d - A3	58,5	78,54	744,84	
L_FRP_90d - A4	67,36	78,54	857,65	
L_FRP_90d - A5	55,16	78,54	702,32	
L_FRP_90d - B1	48,07	78,54	612,04	620,07
L_FRP_90d - B2	57,21	78,54	728,42	
L_FRP_90d - B3	49,57	78,54	631,14	
L_FRP_90d - B4	43,13	78,54	549,15	
L_FRP_90d - B5	45,52	78,54	579,58	
L_FRP_90d - C1	10,52	78,54	133,94	185,19
L_FRP_90d - C2	20,46	78,54	260,50	
L_FRP_90d - C3	14,98	78,54	190,73	
L_FRP_90d - C4	12,22	78,54	155,59	
L_FRP_90d - C5	26,91	78,54	342,63	



**Graf 26 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 360 dní ve vodním prostředí při 20 °C**



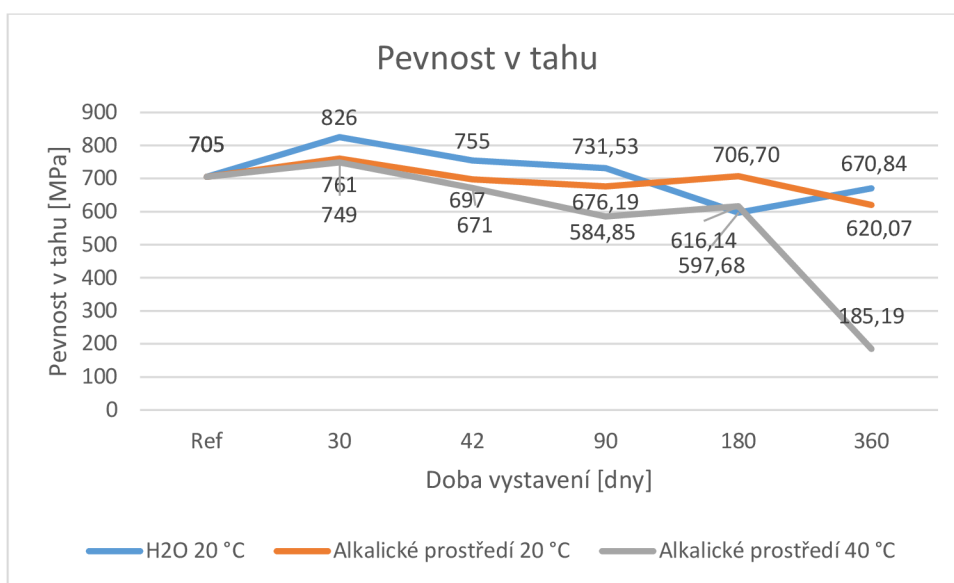
**Graf 27 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 360 dní v alkalickém prostředí při 20 °C**



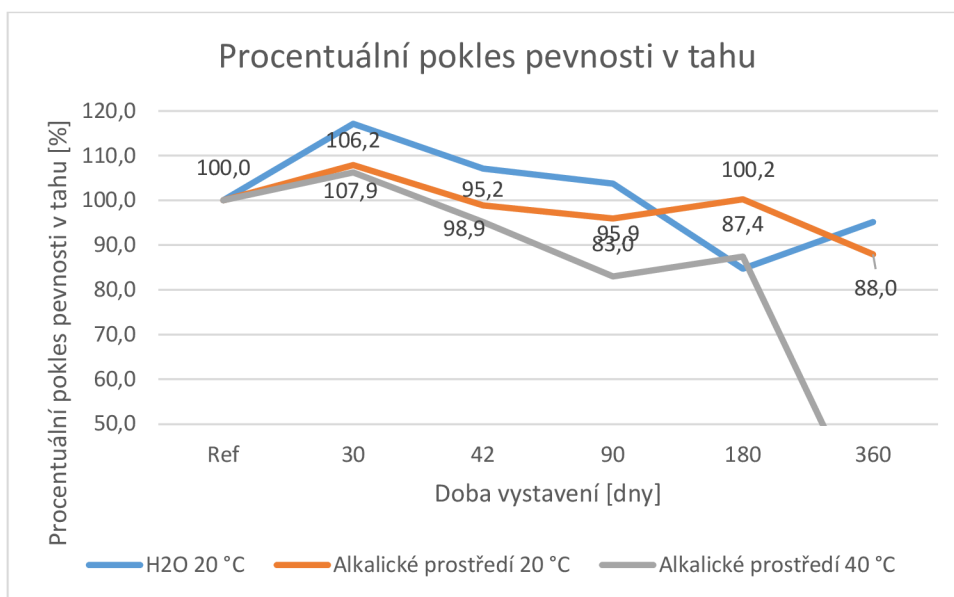
**Graf 28 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 360 dní v alkalickém prostředí při 40 °C**

Stejně jako v minulých případech, postup vyřazení hodnot, které se nevejdou do 10% odchylky, nelze uplatnit při vyhodnocování dat. U vzorků vystavených 360 dní v agresivním prostředí byly rozptýly hodnot nejznatelnější. U vzorků uložených ve vodě při

20 °C, pokud by se postupovalo dle správného postupu, byly by vyřazeny čtyři hodnoty z pěti možných. U vzorků uložených v alkalickém prostředí při 20 °C by byly vyřazeny tři výsledky a u stejného prostředí při 40 °C by byly vyřazeny všechny výsledky. Toto se může přikládat za nedokonalý způsob výroby, kdy při ohýbání vznikají mikrotrhlíky, kterými může pronikat do výztuže agresivní médium. Dalším vlivem může být též nedostatečné ošetření výztuže po řezání, kdy řezané části zůstaly odhalené.



Graf 29 Pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180, 360 dní



Graf 30 Procentuální pokles pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180, 360 dní

U vzorků uložených 360 dní v agresivním prostředí již je možné pozorovat znatelné rozdíly v pevnostech. Výsledné pevnosti odpovídají předpokladu, kdy nejvyšších pevností v tahu dosahují vzorky uložené ve vodě při 20 °C, druhé jsou vzorky v alkalickém prostředí při 20 °C. Jako poslední jsou vzorky uložené v alkalickém prostředí při 40 °C, kterému se snížila pevnost v tahu na čtvrtinu původní pevnosti. To může být zapříčiněno stále technologicky nedokonalým způsobem výroby, kdy při ohýbání vznikají mikrotrhlínky v ohýbaných částech, čímž agresivní médium snáze proniká do výztuže. Též se může jednat o neošetření řezaných částí před vystavením agresivnímu prostředí.

Na obr. č. 44 lze vidět ohýbané výztuže po zkoušce v tahu. U vzorku vystavených alkalickému prostředí při 40 °C lze vidět ukázkové přetrhnutí, kdy u všech vzorků došlo k přerušení v ohýbané části.



**Obrázek 44** Vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 360 dní po pevnostní zkoušce (shora-H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]

## Závěr testování pevnosti v tahu ohýbaných prutů

Zkoušení FRP ohýbaných třmínek probíhalo dle americké směrnice ACI 440.3R a její kanadské obdoby CSA S806. Dle těchto norem by se měl betonový blok vyztužovat spolu s FRP výztuží i ocelovou výztuží. Aby se usnadnila příprava vzorků, navrhl se vysokopevnostní beton C60/75, který dosahuje dostatečných pevností, aby se od dodatečného vyztužování upustilo. Betonové bloky se odformovávaly po čtyřech až osmnácti dnech, přičemž poptávané pevnosti dosáhly po třech dnech.

Pevnosti v tahu by se správně měly vyhodnocovat dle norem, kdy po vypočítání průměrné pevnosti v tahu se určí 10% odchylka a hodnoty, které do ní nespádají, se vyloučí. V tomto případě se muselo toto pravidlo vynechat, jelikož byl velký rozptyl pevností. Pokud by se dodrželo pravidlo vyřazení neplatných hodnot, dostalo by se to až do extrému, kdy by se vyřadily téměř všechny hodnoty, v jednom případě i všechny hodnoty (vzorky po 360 dnech uložení v alkalickém prostředí). Tím pádem by nebylo možné vyhodnocovat vzorky.

Pevnosti v tahu se nesnižovaly po celou dobu, jak bylo předpokládáno, nýbrž lehce oscillovaly. To může být zapříčiněno nepřesností s ohledem na vyhodnocování všech hodnot.

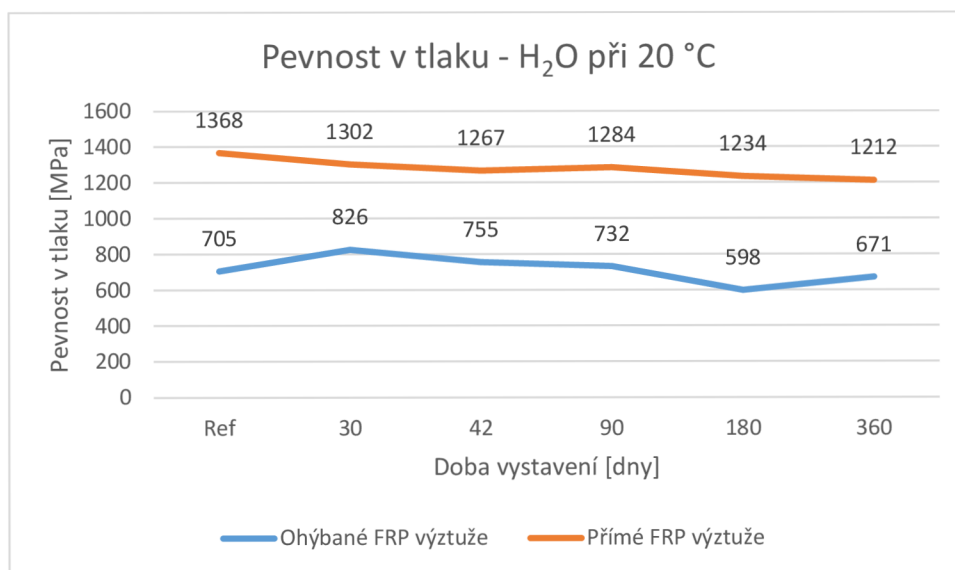
U vzorků uložených 360 dní v agresivním prostředí pevnosti v tahu již jsou dle předpokladu. Za nejodolnější vzorky lze považovat výztuže uložené ve vodním prostředí při 20 °C. Následují vzorky vystavené agresivnímu prostředí při 20 °C. Jako vzorky s nejnižší pevností se umístily dle předpokladu ohýbané FRP výztuže uložené v alkalickém prostředí při 40 °C. Tento fakt potvrzuje, že agresivní prostředí při zvýšené teplotě urychluje degradaci.

## **2.7 Porovnání pevností přímých a ohýbaných prvků**

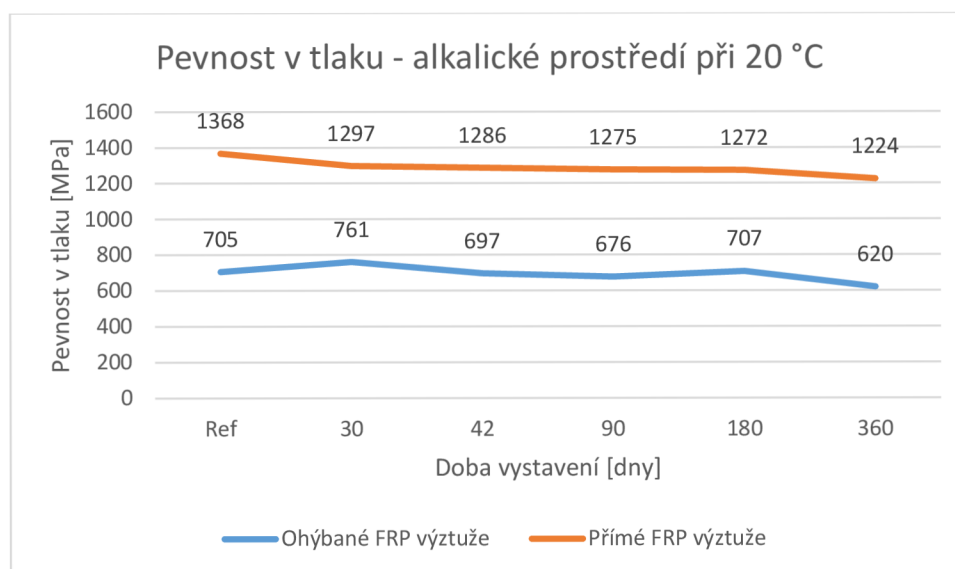
Pro porovnání pevností v tahu přímých a ohýbaných FRP výztuží jsme vycházeli z předpokladu, že pevnosti ohýbaných prvků musí být menší, než jsou pevnosti přímých výztuží. Další předpokladem bylo, že rozdíl pevností mezi přímými a ohýbanými prvky se bude zvětšovat díky působení agresivního prostředí, což nám i potvrdily grafy s vyhodnocenými hodnoty. U pevností v tlaku vzorků uložených ve vodním prostředí při 20 °C lze pozorovat pevnost ohýbaných prvků poloviční, než je pevnost přímých výztuží. Stejný jev se opakuje i u vzorků z alkalického prostředí při 20 °C. U vzorků uložených

v alkalickém prostředí při 40 °C lze už pozorovat znatelný rozdíl pevností, kdy ohýbané výztuže dosahují přibližně 23 % pevnosti v tlaku toho, co přímé výztuže.

Ohýbané výztuži přísluší rozhodně klad, jako je možnost ukotvení výztuže v betonu, avšak na úkor nižších mechanických vlastností v čase.

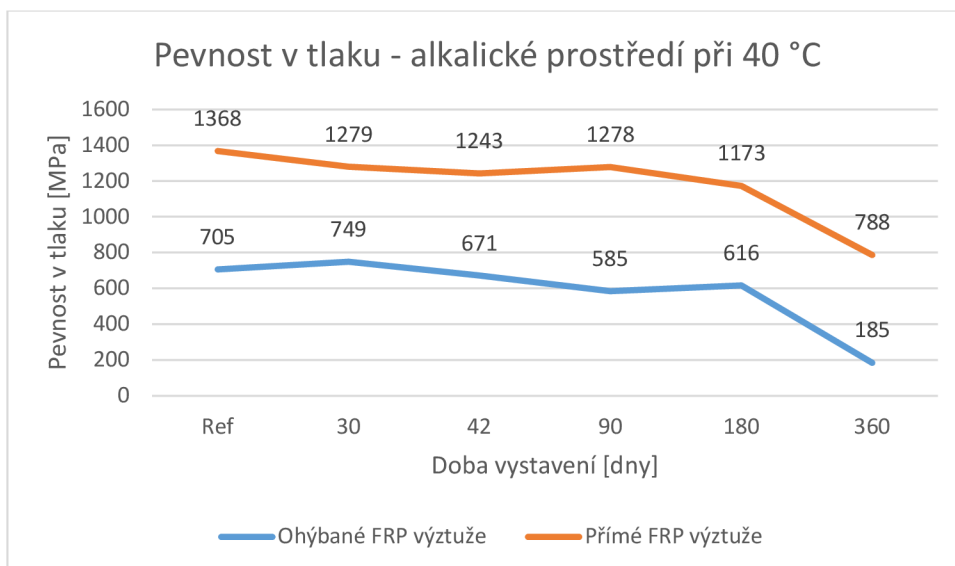


Graf 31 Srovnání pevností v tlaku pro přímé a ohýbané výztuže – H<sub>2</sub>O při 20 °C



Graf 32 Srovnání pevností v tlaku pro přímé a ohýbané výztuže – alkalické prostředí při 20 °C



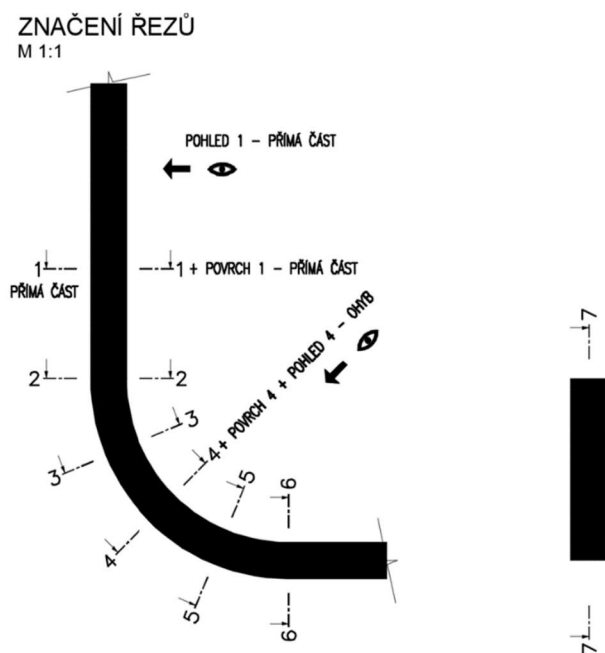


Graf 33 Srovnání pevností v tlaku pro přímé a ohýbané výztuže – alkalické prostředí při 40 °C

## 2.8 Vliv působení agresivního prostředí

Pro pozorování působení agresivního prostředí jsme sledovali vzorky vystavené třem různým prostředím. Prvním je vodní prostředí při teplotě 20 °C, druhé a třetí bylo alkalické prostředí při teplotách 20 °C a 40 °C. Vzorky byly vystavené různým prostředím po dobu 90 dnů, 180 dnů a 360 dnů.

Vzorky se nejprve musely nařezat pro pozorování pod mikroskopem na požadované velikosti, neboť se sledovaly jak příčné řezy, tak podélné, dle mikroskopu. Na pozorování vlivu agresivního prostředí jsme použili optickou mikroskopii a elektronovou skenovací mikroskopii. Na obrázku č. 45 můžeme vidět schéma řezaných částí, dle kterého byly značeny jednotlivé vzorky.



Obrázek 45 Označení jednotlivých řezaných částí vzorku

### 2.8.1 Optická mikroskopie

Při pozorování vzorků optickou mikroskopií jsme využívali optický mikroskop. Jedná se o pokročilý zobrazovací a měřicí systém, který disponuje možností poskytnutí snímku s vysokou čistotou, zaostřeností. Též je možné vytvořit snímky z různých úhlů v různém zvětšení – od 0,1x – 5000x. [1] V našem případě jsme využívali zvětšení 20x a 200x. Tuto metodu jsme aplikovali na vzorky, kde byl odhalen příčný řez i podélný řez.



Obrázek 46 Optický mikroskop KEYENCE VHX-6000 [18]

Jak už bylo zmíněno, optický mikroskop jsme využívali na vzorky uložené ve vodě po dobu 90 dnů, 180 dnů a 360 dnů. Na nich jsme pozorovali vliv působení agresivního prostředí. Vzorky byly řezané bruskou, která zanechala znatelné stopy na struktuře v jednotlivých řezech. Aby byly vzorky hladší, byly broušeny na korundovém písku a čištěny vodou.



Obrázek 47 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – řez v přímé části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]



Obrázek 48 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – přímý řez v ohýbané části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]



Obrázek 49 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – podélný řez v ohýbané části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]



**Obrázek 50** Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – povrch v přímé části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]

Jako první zde máme vzorky po 90 dnech, kdy na přímém řezu v rovné části (viz. obr. č. 47) i na vzorcích z přímého řezu v ohýbaných částích (viz. obr. č. 48) můžeme pozorovat malé, ale znatelné změny v porušení krycí vrstvy. Při srovnání podélného řezu v ohýbané části lze pozorovat nejen zmenšení povrchové krycí vrstvy, ale i odhalení vláken, či úplné obnažení (viz. obr. č. 49 a č. 50). Z pohledu strukturálního lze pozorovat na obrázku č. 49 rozmístění vláken v ohýbané části. Můžeme vidět, že při ohýbání dojde v tomto úseku k „nespolupráci“ vláken a dojde k vytvoření „vlnek“ namísto napnutých vláken, které mají stejný směr, jako má tvar výztuže.



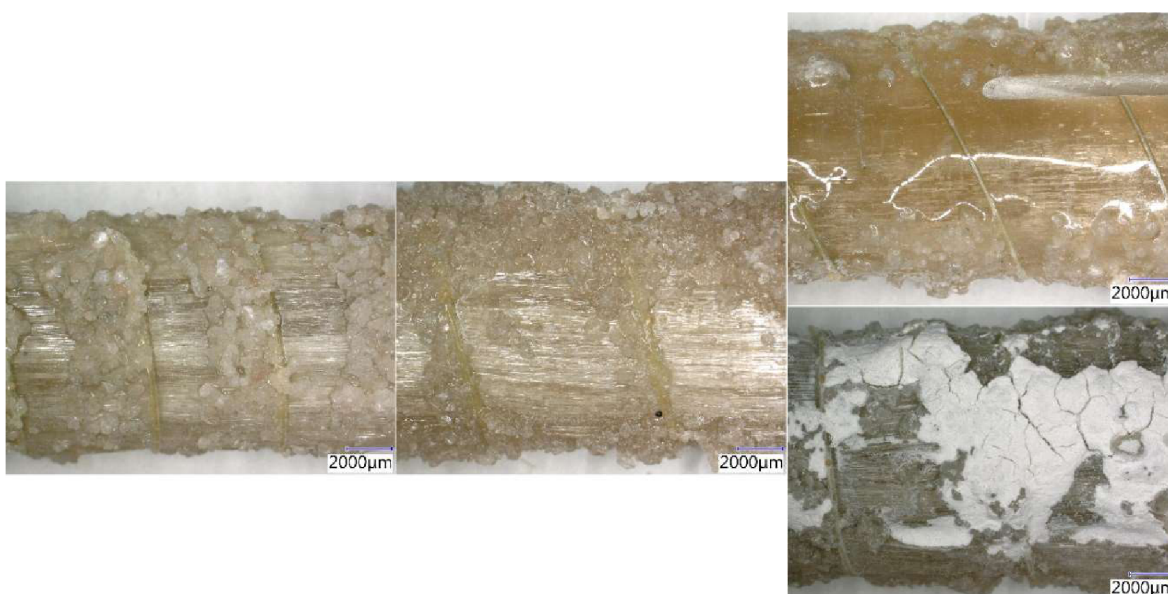
**Obrázek 51** Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 180 dnech při zvětšení 20x – řez v přímé části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]



**Obrázek 52** Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 180 dnech při zvětšení 20x – přímý řez v ohýbané části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]



**Obrázek 53** Vzorčky po vystavení agresivnímu prostředí po 180 dnech při zvětšení 20x – podélný řez v ohýbané části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]



**Obrázek 54** Vzorčky po vystavení agresivnímu prostředí po 180 dnech při zvětšení 20x – povrch v přímé části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]

U porovnávání vzorků po uložení 180 dní v agresivním prostředí můžeme pozorovat již při příčných řezech viditelnou absenci povrchové vrstvy u vzorků uložených v CaCO<sub>3</sub> při 40 °C (viz. obr. č. 51 a 52). U podélného řezu v ohýbané části opět můžeme pozorovat zvlnění vláken na vnitřní straně ohybu, stejně jako absenci povrchové krycí vrstvy v některých místech (viz. obr. č. 53). Viditelné znaky lze pozorovat na povrchu výztuže, kde je nejen zřetelná absence krycí povrchové vrstvy, tak i obnažení vláken. Dalším velkým znakem jsou sraženiny hydroxidů, kdy se postupným působením alkalií tvoří sraženiny na povrchu a krystalizují (viz. obr. č. 54).



**Obrázek 55** Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 360 dnech při zvětšení 20x – řez v přímé části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]



**Obrázek 56** Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 360 dnech při zvětšení 20x – přímý řez v ohýbané části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]



**Obrázek 57** Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 360 dnech při zvětšení 20x – podélný řez v ohýbané části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]



**Obrázek 58** Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 360 dnech při zvětšení 20x – povrch v přímé části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]

U vzorků, které byly vystavené agresivnímu prostředí po dobu 360 dní, lze konstatovat to stejné, jako u vzorků vystavených agresivnímu prostředí po dobu 180 dní. Pouze zde se jedná již o pokročilou degradaci vzorku na povrchu. Povrchová úprava (opískování) již zde téměř není. Také můžeme pozorovat degradaci nejen na povrchu, ale i v jádru vzorku, kdy dochází k narušení struktury (viz. obr. č. 56 vpravo a obr. č. 57 vpravo). Vlákna se narušují spolu s epoxidovou pryskyřicí a dochází k nesoudržnosti struktury. V praxi by toto znamenalo jistou ztrátu mechanických pevností.

### Závěr pozorování optickou mikroskopií

Jako úvodem lze konstatovat rozdíl mezi tvarem řezu v přímé části (kruhový průřez) výztuže a v ohýbané části výztuže (oválný průřez), kde došlo ke zásadnímu ztenčení díky technologii výroby ohýbaných prutů. Při stlačení došlo k nahromadění pryskyřice po stranách výztuže a snížení tloušťky pryskyřice na tlačných stranách. Při stlačování je nutno brát v potaz ještě jeden faktor a tím je možná tvorba mikrotrhlinek. Naše vzorky nebyly nijak ošetřeny po řezání, čímž mohlo dojít ke vniku agresivních médií z alkalického prostředí. To můžeme pozorovat při porovnání povrchu u vzorků z rovné části třmínku a ohýbané části třmínku – degradace je vždy vyšší u ohýbaných částí třmínků. Jelikož nedošlo k dokonalému vytvrzení a tím i dokonalému zesíťování, byl umožněn prostup agresivních médií a tím degradován povrch vzorku (samotná pryskyřice na povrchu bez vláken).

Na vzorcích vystavených alkalickému prostředí po dobu 90 dní není ještě tolik zásadní degradace. Dalo by se říct, že je to zlomová doba pro vystavení FRP výztuží tomuto alkalickému prostředí. Následující vzorky po 180 dnech a 360 dnech nesou již viditelné změny na povrchu výztuže, ať už v povrchové úpravě (opískování), narušení povrchové vrstvy, tak i narušení kraje jádra. V počátečních stavech narušování pryskyřice na povrchu může vést k dobrému výsledku, neboť se odhalují zrna písku, která byla zalita pryskyřicí, čímž může dojít k lepší soudržnosti v betonu. Následující vlivy již porušují strukturu a mohou vést ke „skelnatění“ povrchu, čímž mizí povrchová úprava, ke zhoršení fyzikálních i mechanických vlastností, až k plné ztrátě pevnosti.

U vzorků příčných řezů v ohýbaných částech lze viditelně rozeznat hranici mezi samotnou pryskyřicí a pryskyřicí s vlákny, například na obr. č. 57. Též zde pozorujeme „vylitou“ pryskyřici, která se nahromadila na vnitřní straně ohybu, k čemuž došlo při

technologii ohýbání. Dále můžeme vidět různé tloušťky pryskyřice, které nezůstaly konstantní po ohýbání prvku, či různé tloušťky krycí vrstvy. Zde se zohledňuje ještě jeden faktor, protože opískování již na referenčních vzorcích nebylo rovnoměrné a drželo se nejlépe v oblasti ovíjených nylonových nití. Též opačný faktor, že daný vzorek je už podroben působení alkalického prostředí po dobu 90 dní. Poslední viditelný jev je mírné zvlnění vláken ve vnitřní části ohybu.



Obrázek 59 Vzorek po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – řez v ohýbané části (uložený v alkalickém prostředí při 20 °C) [Aneta Blahová]

### 2.8.2 Elektronová mikroskopie

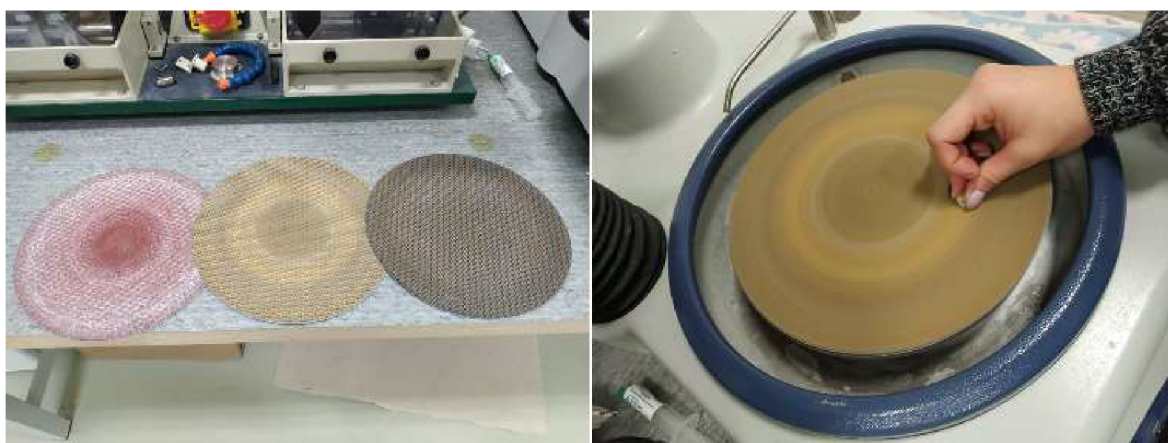
Pro elektronovou skenovací mikroskopii jsme využívali přístroje (SEM) TESCAN MIRA 3. Velká výhoda elektronové mikroskopie je ve zřetelném vyobrazení struktury vzorků na snímku oproti optické mikroskopii a možnosti získání morfologických i elementárních dat ze vzorku. Díky těmto vlastnostem se TESCAN MIRA využívá pro rutinní kontrolu materiálů v kontrole kvality. [20] Záporom je však vyšší pracnost při přípravě i samotném snímání vzorků.



Obrázek 60 Elektronový mikroskop (SEM) TESCAN MIRA 3 [19]



Elektronovou mikroskopií jsme využili pro vzorky vystavené v agresivním prostředí po dobu 90 dnů, 180 dnů a 360 dnů. Před samotným snímáním povrchu vzorků byla nutná příprava. Vzorky byly obroušeny na sucho na kotoučovém brusném kole BUEHLER MetaServ 250 Grinder-polisher. K broušení jsme využili brusné kotouče o velikosti zrn 8  $\mu\text{m}$ , 35  $\mu\text{m}$  a 75  $\mu\text{m}$ . Poté se pokovovaly (pozlatily) a vložily se do vakuovací komory Quorum Q150E ES.



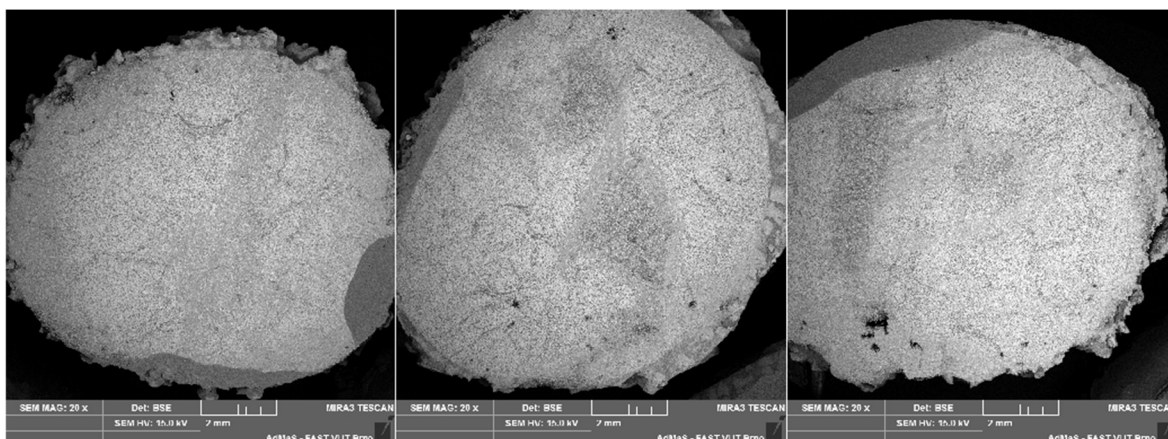
**Obrázek 61 Broušení vzorků (vlevo-jednotlivé brusné kotouče, vpravo-proces broušení vzorku) [Aneta Blahová]**



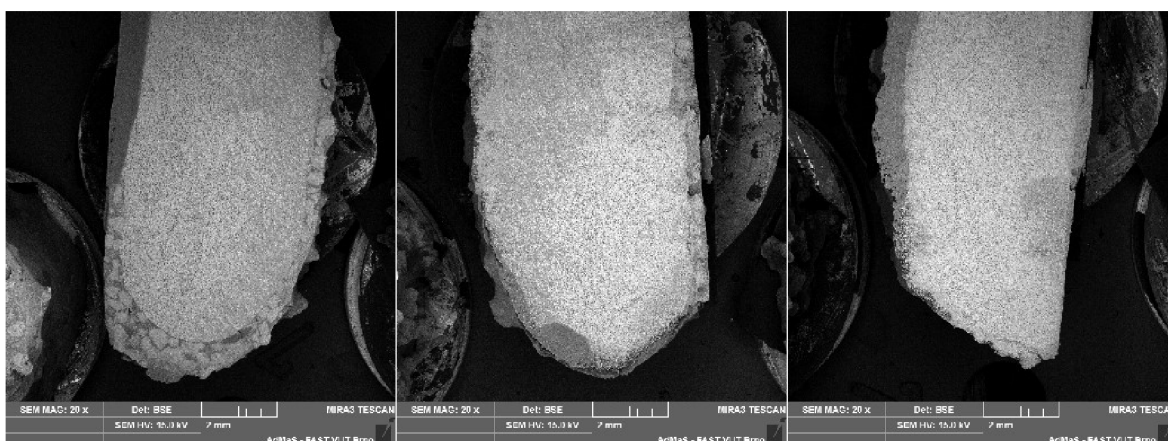
**Obrázek 62 Příprava vzorů ve vakuovací komoře [Aneta Blahová]**

Vakuovací komora pracuje na směsi argon-metanové směsi. Teprve po tomto procesu byly vloženy do samotného mikroskopu, kde opět došlo k vakuování vzorků. Pro

naše účely jsme využívaly zvětšení 20x a 50x. Vzorky v tomto případě čítaly příčné řezy z přímé části (označení 1) a z ohýbané části (označení 4).



**Obrázek 63** Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – povrch v přímé části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]

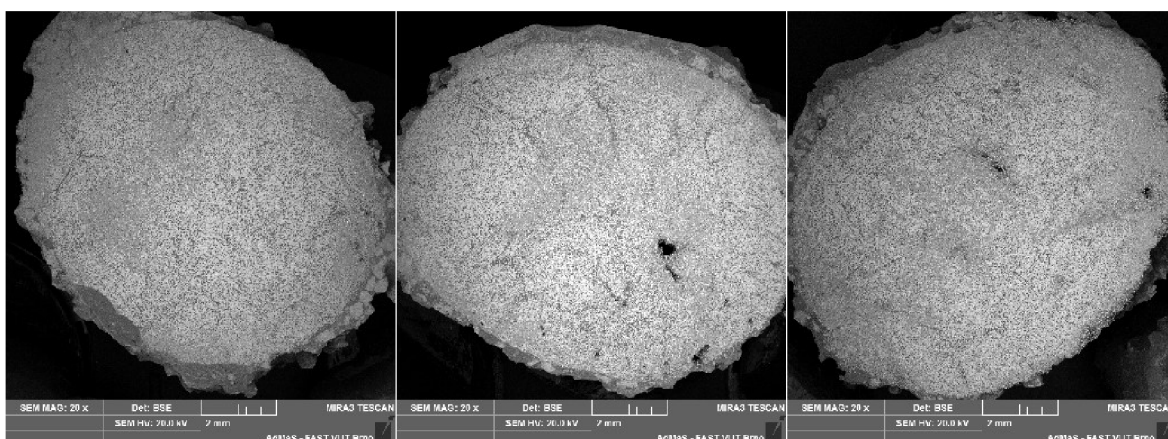


**Obrázek 64** Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – povrch v ohýbané části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]

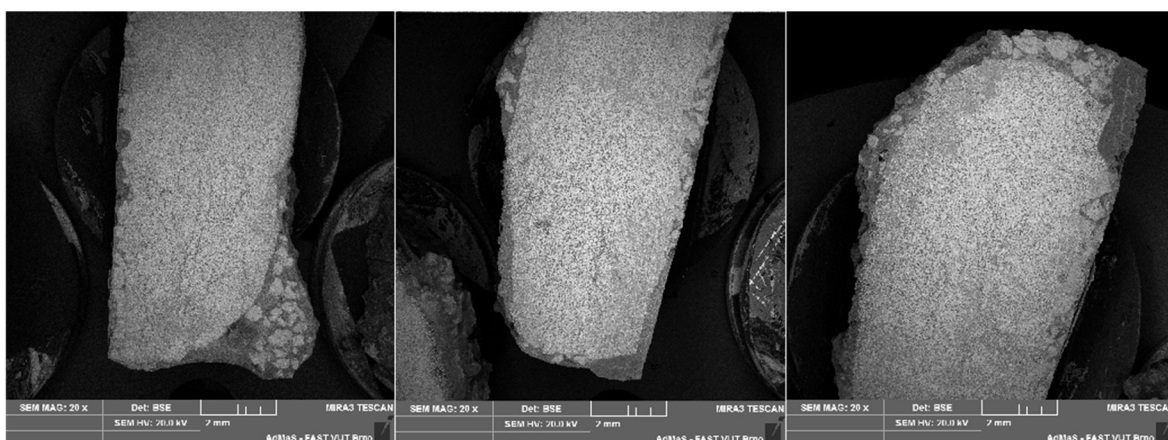
První sada, u které jsme hodnotili vliv působení agresivního prostředí, byla u vzorků vystavených těmito prostředími po dobu 90 dnů (obr. č. 63). Při přípravě vzorků došlo k nechtěnému přelakování, což lze vidět v podobě tmavých jednolitých ploch na snímcích. Na obr. č. 64 lze pozorovat redukci povrchové úpravy a ztenčení krycí pryskyřičné vrstvy, což vede na pár místech i k odhalení vláken. Při porovnání vzorku vystaveného působení vody při 20 °C po dobu 90 dní a vzorku vystaveného působení alkáliím při 40 °C po dobu 90 dní lze pozorovat rozdíl v pronikání agresivního média do průřezu vzorku. U vzorku ve vodním

prostředí lze vidět lokální narušení a rovnoměrný rozptýl média okolo tohoto porušení povrchu. Kdežto u vzorku vystavenému agresivnímu prostředí při 40 °C lze vidět místo, kde jsou porušená vlákna, tedy místo průniku agresivního média, ale nikoliv rovnoměrné rozptýlení do struktury průřezu, jako tomu bylo u vzorku, na nějž působí vodní prostředí. Tento jev se přiklání k tomu, že alkalické prostředí je agresivnější než vodní prostředí, a proto dochází ke snadšímu šíření strukturou FRP výztuže.

Na rozdíl od vzorků v přímé části, kde je narušení povrchové vrstvy a odhalení vláken pouze lokální, u vzorků z ohýbané části je míra porušení již po celém obvodu, což lze pozorovat mírným průnikem média po obvodu průřezu. Dochází k úbytku pryskyřice v tenčích částech, která byla stlačena při ohýbání výztuže, až úplné redukci v podélné části.



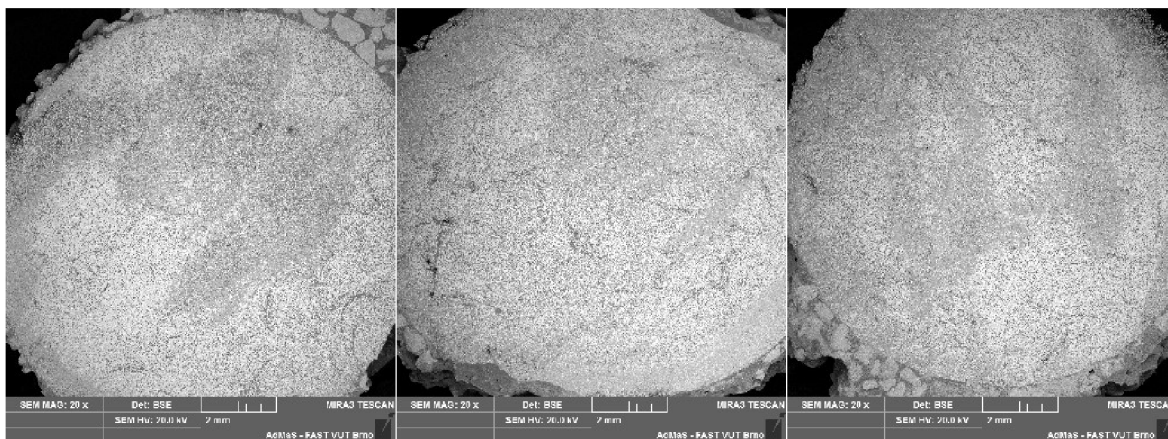
**Obrázek 65** Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 180 dnech při zvětšení 20x – povrch v přímé části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]



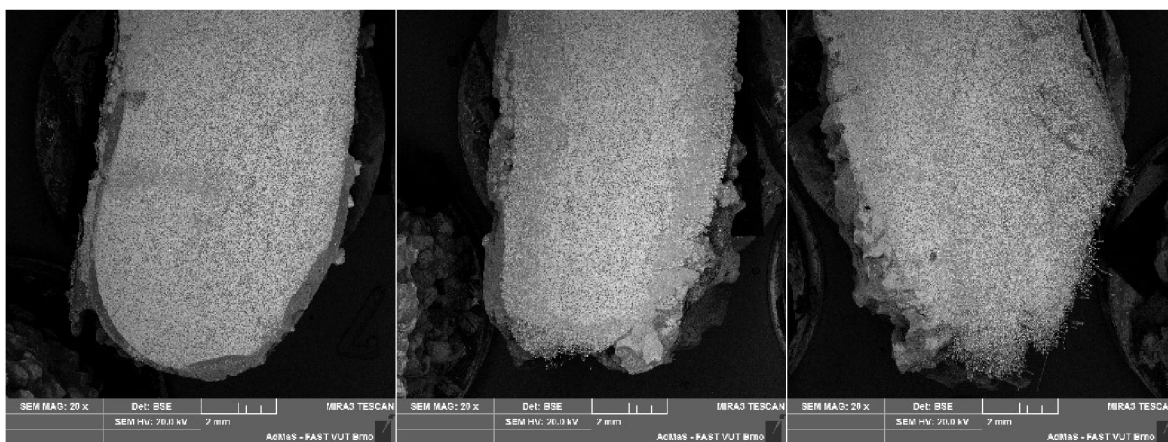
**Obrázek 66** Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 180 dnech při zvětšení 20x – povrch v ohýbané části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]

Při porovnání vzorku vystavených agresivnímu prostředí po dobu 180 dní lze pozorovat nepatrný rozdíl mezi nimi navzájem (obr. č. 65 a č. 66). Opět lze vidět vytlačenou pryskyřici vlivem mechanického ohýbání a změna tloušťky pryskyřice na okrajích průřezů v ohýbaném místě, kde v podélné délce dochází ke ztenčení vrstvy epoxidové pryskyřice (viz. obr. č. 66). U vzorku uloženého v alkalickém prostředí při teplotě 40 °C lze pozorovat v pravém horním rohu již počátek odhalení vláken, zatím jen na povrchu (obr. č. 65 vpravo).

Ve srovnání se vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 90 dní lze konstatovat, že vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 180 dnů jsou pravděpodobně technologicky lépe zhotovené, jelikož na nich nelze pozorovat ani srovnatelné porušení, jako tomu je u vzorků po 90 dnech.



**Obrázek 67** Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 360 dnech při zvětšení 20x – povrch v přímé části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]



**Obrázek 68** Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 360 dnech při zvětšení 20x – povrch v ohýbané části (zleva H<sub>2</sub>O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová]

U vzorků, které byly vystaveny působení agresivního prostředí po dobu 360 dní, jsou již velmi znatelné změny oproti původnímu stavu. Na příčných řezech v přímé části (viz. obr. č. 67) lze pozorovat úplné porušení pryskyřice na povrchu, odhalení vláken i porušení, které pokračuje do průřezu a je viditelné na všech přímých průřezech. Avšak i přes značné poškození struktury, nelze jej srovnávat s poškozením na přímých řezech v ohýbané části. Krycí vrstva je zde silně eliminována (obr. č. 68). Lze vidět již i absence části výztuže a výrazné zasáhnutí do průřezu.

#### Závěr pozorování elektronovou mikroskopií

Při pozorování elektronovou mikroskopií lze pozorovat znatelnou změnu narušení struktury vzorků po vystavení agresivnímu prostředí. Celkově lze konstatovat viditelnou změnu mezi tvarem a strukturou vzorků řezaných v přímých částech a v částech ohýbaných. Vlivem tvarování výztuží lze pozorovat změna na samotném těle, kdy se rovnoměrná pryskyřice po obvodu prutu díky stlačení (ohýbání) roznese do stran, čímž dojde k nerovnoměrnému rozmístění pryskyřice po obvodu výztuže. Též u vzorků z ohýbaných částí je možné vidět více dutin po obvodu, či mezer mezi jednotlivými svazky vláken. Tyto vady mohou vést v konečném důsledku ke zhoršení mechanických vlastností prvku. Též dávají prostor agresivním médiím se snadněji dostat do samotné výztuže.

U vzorků vystavených agresivnímu prostředí po dobu 90 dnů a 360 dnů lze vidět návaznost postupně se zhoršujícího stavu vzorků. U vzorků po 180 dnech, konkrétně u výztuže uložené ve vodním prostředí při 20 °C a v alkalickém prostředí při 20 °C, nelze pozorovat téměř žádná degradace vlivem agresivního prostředí. Tento jev je přikládán výrobě, kdy mohlo dojít k lepší výrobě, soudržnější povrchové úpravě, či mohl nastat jiný jev z výroby. Jedná o výztuže, které jsou vyráběny na automatické lince, a tak nejsou všechny 100% totožné.

## Závěr

Tato diplomová práce se zabývala přímými a ohýbanými kompozitními výztužemi, které se využívají pro vyztužování či předpínání konstrukcí. Práce se primárně zaměřovala na ohýbané FRP výztuže. Tato práce je rozdělena na teoretickou část a praktickou část.

V teoretické části se řeší složení FRP výztuží, jaké mohou být druhy a jak se vyrábí, kterými vlastnostmi disponují, kde se mohou využívat a jakou mají trvanlivost.

Praktická část je rozdělena na tři části. V první části jsou uvedeny postupy pro testování FRP výztuží. Testování vychází zejména z amerických norem ASTM D7205 a postupů dle ACI 440.3R a z kanadské normy CSA S806.

Druhá část se zabývá složením testovaných FRP výztuží a agresivního prostředí. Dané výztuže jsou složeny ze skleněných vláken a epoxidové pryskyřice. Povrchová úprava byla ovinutí nylonovou nití a opískování. Dodavatelem výztuží je Prefa kompozity, a.s. Agresivní prostředí bylo navrženo dle normy ACI 440.3R a sestávalo ze 118,5 g  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 0,9 g NaOH a 4,2 g KOH. Vše to jsou váhy na 1 litr deionizované vody. Toto prostředí má simulovat pórovou vodu v betonu při pH 12,6-13,0.

Třetí část se zabývá samotným experimentem, kdy byly uloženy FRP výztuže ve třech různých prostředích při různých teplotách. Konkrétně se jednalo o uložení v alkalickém prostředí při 20 °C a 40 °C a ve vodní lázni při 20 °C. Cílem tohoto měření bylo zjistit pokles pevností a míru degradace. Uložení v alkalickém prostředí při zvýšené teplotě má za význam urychlení míry degradace, která by při skutečném působení mohla zastávat pár desítek let. Doba expozice výztuží v agresivním prostředí byla 90 dní, 180 dní a 360 dní. Prováděné zkoušky byly pevnost v tahu přímých a ohýbaných FRP výztuží, optická mikroskopie a elektronová rastrovací mikroskopie (SEM).

Výstupy pevností z přímých výztuží se následně použily pro srovnání s pevnostmi ohýbaných výztuží. Jelikož ohýbané výztuže jsou vcelku novým technologickým trendem, nelze předpokládat, že ohýbané výztuže dosáhnou stejných kvalit jako pruty přímé. Toto je předmětem porovnání – jak se sníží pevnosti v tahu oproti přímým výztužím a jaký vliv má ohýbání výztuže na její trvanlivost. Dle výsledků z pevností v tahu lze pozorovat znatelný rozdíl mezi pevnostmi přímých prutů a ohýbaných prutů. Po expozici 360 dní v agresivním prostředí ohýbané výztuže dosahují čtvrtinových pevností v tahu než přímé výztuže. Hodnota výsledků může být lehce zkreslena, neboť díky velkému rozptylu naměřených

výsledků nebylo možné vyhodnocení dle ověřeného postupu, kdy se z aritmetického průměru pevností vytvoří 10% odchylka a následně se vyřadí veškeré pevnosti, které do ní nespádají. Pokud by se postupovalo dle norem, z naměřených pěti hodnot by se vyřadily v extrémním případě tři až čtyři hodnoty. V jednom případě se u vzorků po 360 dnech uložení v alkalickém prostředí při 40 °C vyloučily všechny hodnoty. Toto však neplatí u přímých výztuží. U přímých FRP výztuží se postupovalo správně dle postupu.

Další část diplomové práce je věnována sledování testovaných FRP výztuží pomocí optické a elektronové mikroskopie. V obou případech jsou vytvořené snímky na průřezy a u optického mikroskopu byly navíc vytvořeny snímky podélných řezů, jak vnitřní části, tak povrchové části. Jelikož vzorky byly řezány bruskou, byly tyto příčné části poškrábané, což zhoršovalo sledování struktury na optickém mikroskopu. Tento defekt byl upraven na elektronovém mikroskopu, kde se při přípravě vzorky brousily, čímž výsledné snímky ukazovaly zřetelně jednotlivé části struktury vzorku. Sledoval se primárně úbytek pryskyřice po okrajích průřezu, odhalování vláken a vnik agresivního média do průřezu. Naopak u optického mikroskopu bylo možné sledovat degradaci na povrchu, kdy se postupně rozpouštěla pryskyřice a začala se odhalovat vlákna.

Na základě zjištěných výsledků lze říci, že FRP kompozitní výztuže jsou vhodnou volbou pro vyztužování a předpínání betonů ve speciálních aplikacích, jelikož jsou primárně odolné proti agresivnímu prostředí, netečné vůči elektromagnetickému působení, disponují vysokou pevností v tahu a mají vysokou trvanlivost.

## Seznam zkratek

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

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

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

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

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

**C-GLASS** (*Chemical glass*) – Chemicky odolné skleněné vlákno

**E-GLASS** (*Electrical glass*) – Skleněné vlákno s nízkou elektrickou vodivostí

**S-GLASS** (*Strength glass*) – Skleněné vlákno s vysokou pevností v tahu

**AR-GLASS** (*Alkali resistant glass*) – Skleněné vlákno odolné vůči působení alkalického prostředí

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

**TBM** (*Tunnel Boring Machines*) – Stroj na vrtání tunelů



## Seznam použitých zdrojů

[1] IMAD SHAKIR ABBOOD, SIEF ALDEEN ODAA, KAMALALDIN F. HASAN., MOHAMMED A. JASIM. Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures. ResearchGate, Elsevier, 2020, 2-5.

[2] ANDROB GROUP: GFRP rebar LIGHTplus is conventional alternate and substitute to steel bar [online]. [cit. 2021-12-27]. Dostupné z: <https://androgroupp.com/gfrp-rebar-lightplus/>

[3] THE CONSTRUCTOR: Fibre Reinforced Polymer (FRP) in Construction, Types and Uses [online]. [cit. 2021-12-27]. Dostupné z: <https://theconstructor.org/concrete/fibre-reinforced-polymer/1583/>

[4] ČASOPIS STAVEBNICTVÍ: Zesilování stavebních konstrukcí dodatečně lepenou kompozitní výztuží [online]. [cit. 2021-12-27]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecne-lepenou-kompozitni-vyztuzi.html>

[5] BASALT REINFORCED COMPOSITES: Basalt Reinforced Compositated Product Information [online]. [cit. 2021.12-27]. Dostupné z: <https://basaltreinforcedcomposites.com/products/>

[6] PREFA KOMPOZITY: Technologie výroby [online]. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/>

[7] PREFA KOMPOZITY: *Katalog výrobků*. Prefa Kompozity, a.s..

[8] Pulwell Compositated Co., Ltd.: Fiberglass (GFRP) Rebars [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <http://www.pulwellpultrusions.com/en/Products.aspx?id=274>

[9] EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT: *Bewehrungsstab für den Betonbau und Verfahren zur Herstellung von Bewehrungsstäben*. Europäische patentschrift. 2015

[10] TECHNOLOGIES FOR LIGHTWEIGHT: Fibre-reinforced polymer stirrup for reinforcing concrete. 2019. Chemnitz.

[11] 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

- [12] SCMT4: *Recent Developments of FRP Bars as Internal Reinforcement in Concere Structures and Field Applications*. SCMT4. Las vegas, USA. 2016
- [13] SAYED MUKHTAR HOMAM. *Durability of fibre reinforced polymers (FRP) used in concrete structures*. National Library of Canada. 2000
- [14] SAYED MUKHTAR HOMAM. *Durability of FRP in concrete – Deterioration*. ResearchGate. 2003
- [15] D7205/D7205M – 06 (Reapproved 2016) Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. ASTM International. 2017.
- [16] S806-02: *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*. Reaffirmed. 2007
- [17] ACI 440.3R-04: *Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*. ACI Committee 440. 2004
- [18] LABCOMPARE: *Digitální mikroskop VHX-6000 od KEYENCE Corporation* [online]. [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://www.labcompare.com/49-Digital-Microscope-Video-Microscope/12629035-VHX-6000-Digital-Microscope/>
- [19] TESCAN: Performance in nanospace: *Prototyping Electron Beam Lithography-engineered insect wings with the TESCAN MIRA3 FEG-SEM* [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.tescan.com/prototyping-electron-beam-lithography-engineered-insect-wings-with-the-tescan-mira3-feg-sem/>
- [20] TESCAN: Performance in nanospace [online]. [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: <https://www.tescan.com/product/sem-for-materials-science-tescan-mira/>
- [21] MAPEI: Dynamon SF Advanced 36 [online]. [cit. 2021-12-17]. Dostupné z: <https://www.mapei.com/at/de-at/produkte/produktliste/produktdetails/dynamon-sf-advanced-36---flie-mittel>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 GFRP výztuže [2].....	13
Obrázek 2 CFRP výztuže [3].....	14
Obrázek 3 AFRP výztuže [4].....	15
Obrázek 4 BFRP výztuž s ukázkou vláken [21].....	15
Obrázek 5 Typická struktura FRP výztuží [1].....	16
Obrázek 6 Schéma pultruzní linky pro výrobu FRP tyčí [6].....	18
Obrázek 7 Začátek pultruzní linky pro výrobu FRP tyčí [7].....	19
Obrázek 8 Konečná část pultruzní linky pro výrobu FRP tyčí [7].....	19
Obrázek 9 Příklady ohýbaných FRP třmínků [8].....	20
Obrázek 10 Vlevo-detail na ztracené bednění a uzavření, vpravo-vzorek po odstranění ztraceného bednění a ztracené bednění [Aneta Blahová].....	21
Obrázek 11 Schéma výroby FRP výztuží ve ztraceném bednění [9].....	21
Obrázek 12 Možnosti uzavření ztraceného bednění [9].....	22
Obrázek 13 vlevo-schéma rotace přízí, uprostřed-motor na splétání přízí, vpravo-formování ohýbaných částí [10].....	22
Obrázek 14 Výroba armokoše vinutím okolo trnů [11].....	23
Obrázek 15 Vyztužování mostních konstrukcí (vlevo-Gateway Blvd/23 <sup>rd</sup> Ave-Alberta (2009), vpravo-410 Overpass Bridge Quebec (2012) [12].....	25
Obrázek 16 Visutý most Nipigon (On, Kanada) [12].....	25
Obrázek 17 (a) TBM, (b) armované koše z GFRP pro soft eye, (c) Manipulace s GFRP soft eye, (d) soft-eye pro membránovou stěnu [12].....	27
Obrázek 18 Vlevo-parkovací garáž Laurier-Taché, vpravo-parkovací garáž La Chanceliere [12].....	28
Obrázek 19 Vlevo-FRP vyztužování zdí, vpravo-vnější pohled na nádrž [12].....	29
Obrázek 20 Schéma 1. části praktické práce.....	36
Obrázek 21 Schéma 2. části praktické práce.....	37
Obrázek 22 Schéma 3. části praktické části.....	37
Obrázek 23 Ukotvení vzorku [15].....	38
Obrázek 24 Montáž uchycení V-typu na testovaný vzorek [16].....	41
Obrázek 25 Schéma uložení vzorku [17].....	42
Obrázek 26 Detail délky $L_1$ [17].....	43
Obrázek 27 Schéma zkušební sestavy – půdorys [17].....	44

Obrázek 28 Schéma zkušební sestavy – nárys [17].....	45
Obrázek 29 Sestava pro zkoušení (vlevo-reálné zobrazení, vpravo-schéma) [17]..	48
Obrázek 30 Části testovacího zařízení (vlevo-dolní část (a)klín, (b)spodní část [mm], vpravo-horní část [mm]) [17] .....	49
Obrázek 31 Zaměnitelné rohové vložky udávající zkoušený poloměr; (a)rohová vložka, (b) svírající čelisti [17].....	49
Obrázek 32 Tvar testovaného prvku [17] .....	50
Obrázek 33 Navrhování betonového válce pro metodu C [17] .....	52
Obrázek 34 Příprava na zkoušení přímých výztuží v tahu (zleva-vzorky osazené závitovými tyčemi a kotvami, čelisti lisu, připravený vzorek ke zkoušení) [Aneta Blahová] .....	58
Obrázek 35 Příklad delaminace u vzorku uloženého ve vodním prostředí při 20 °C po dobu 360 dní [Aneta Blahová] .....	58
Obrázek 36 Pevnost v tahu přímých prutů po 90 dnech expozice (zleva-vodní prostředí, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] ...	61
Obrázek 37 Pevnost v tahu přímých prutů po 180 dnech expozice (zleva-vodní prostředí, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] ...	65
Obrázek 38 Pevnost v tahu přímých prutů po 360 dnech expozice (zleva-vodní prostředí, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] ...	68
Obrázek 39 Vlevo – třmínek v dodaném stavu, vpravo – třmínek po řezání připravený k osazení do formy [Aneta Blahová].....	69
Obrázek 40 Výroba betonových bloků (vlevo-formy s výztuží před zalitím, vpravo- formy s výztuží po zalití betonem) [Aneta Blahová] .....	69
Obrázek 41 Uchycení vzorku v lisu [Aneta Blahová] .....	74
Obrázek 42 Vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 90 dní po pevnostní zkoušce (shora-H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová].....	78
Obrázek 43 Vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 180 dní po pevnostní zkoušce (shora-H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová].....	82
Obrázek 44 Vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 360 dní po pevnostní zkoušce (shora-H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová].....	86
Obrázek 45 Označení jednotlivých řezaných částí vzorku .....	90

Obrázek 46 Optický mikroskop KEYENCE VHX-6000 [18] .....	90
Obrázek 47 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – řez v přímé části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová].....	91
Obrázek 48 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – přímý řez v ohýbané části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] .....	91
Obrázek 49 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – podélný řez v ohýbané části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] .....	91
Obrázek 50 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – povrch v přímé části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová].....	92
Obrázek 51 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 180 dnech při zvětšení 20x – řez v přímé části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová].....	92
Obrázek 52 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 180 dnech při zvětšení 20x – přímý řez v ohýbané části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] .....	92
Obrázek 53 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 180 dnech při zvětšení 20x – podélný řez v ohýbané části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová].....	93
Obrázek 54 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 180 dnech při zvětšení 20x – povrch v přímé části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] .....	93
Obrázek 55 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 360 dnech při zvětšení 20x – řez v přímé části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová].....	94
Obrázek 56 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 360 dnech při zvětšení 20x – přímý řez v ohýbané části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] .....	94
Obrázek 57 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 360 dnech při zvětšení 20x – podélný řez v ohýbané části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová].....	94

Obrázek 58 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 360 dnech při zvětšení 20x – povrch v přímé části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] .....	94
Obrázek 59 Vzorek po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – řez v ohýbané části (uložený v alkalickém prostředí při 20 °C) [Aneta Blahová] .....	96
Obrázek 60 Elektronový mikroskop (SEM) TESCAN MIRA 3 [19] .....	96
Obrázek 61 Broušení vzorků (vlevo-jednotlivé brusné kotouče, vpravo-proces broušení vzorku) [Aneta Blahová] .....	97
Obrázek 62 Příprava vzorů ve vakuovací komoře [Aneta Blahová] .....	97
Obrázek 63 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – povrch v přímé části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] .....	98
Obrázek 64 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 90 dnech při zvětšení 20x – povrch v ohýbané části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] .....	98
Obrázek 65 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 180 dnech při zvětšení 20x – povrch v přímé části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] .....	99
Obrázek 66 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 180 dnech při zvětšení 20x – povrch v ohýbané části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] .....	99
Obrázek 67 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 360 dnech při zvětšení 20x – povrch v přímé části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] .....	100
Obrázek 68 Vzorky po vystavení agresivnímu prostředí po 360 dnech při zvětšení 20x – povrch v ohýbané části (zleva H <sub>2</sub> O při 20 °C, alkalické prostředí při 20 °C, alkalické prostředí při 40 °C) [Aneta Blahová] .....	100

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti FRP výztuží a ocelové výztuže [1] .....	13
Tabulka 5 Charakteristické vlastnosti termosetových pryskyřic [1] .....	16
Tabulka 6 Vypočítané hodnoty pro výztuže referenční, 30denní a 42denní .....	57
Tabulka 7 Pevnost v tahu a modul pružnosti pro vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 90 dní .....	59
Tabulka 8 Pevnost v tahu a modul pružnosti pro vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 180 dní .....	62
Tabulka 9 Pevnost v tahu a modul pružnosti pro vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 360 dní .....	65
Tabulka 10 Vyhodnocení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a pevnosti betonu v tlaku .....	70
Tabulka 11 Vyhodnocení pevnosti v příčném tahu .....	71
Tabulka 12 Vyhodnocení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a pevnosti betonu v tlaku .....	71
Tabulka 13 Vyhodnocení pevnosti v příčném tahu .....	71
Tabulka 14 Vyhodnocení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a pevnosti betonu v tlaku .....	71
Tabulka 15 Vyhodnocení pevnosti v příčném tahu .....	72
Tabulka 16 Vyhodnocení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a pevnosti betonu v tlaku .....	72
Tabulka 17 Vyhodnocení pevnosti v příčném tahu .....	72
Tabulka 18 Vyhodnocení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu a pevnosti betonu v tlaku .....	72
Tabulka 19 Vyhodnocení pevnosti v příčném tahu .....	73
Tabulka 20 Pevnost v tahu pro vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 90 dní .....	75
Tabulka 21 Pevnost v tahu pro vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 180 dní .....	79
Tabulka 22 Pevnost v tahu pro vzorky vystavené agresivnímu prostředí po dobu 360 dní .....	83

## Seznam grafů

Graf 1 Pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90 dní .....	59
Graf 2 Procentuální pokles pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90 dní .....	60
Graf 3 Modul pružnosti FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90 dní .....	60
Graf 4 Procentuální pokles modulu pružnosti u FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90 dní .....	61
Graf 5 Pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180 dní .....	62
Graf 6 Procentuální pokles pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180 dní .....	63
Graf 7 Modul pružnosti FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180 dní .....	63
Graf 8 Procentuální pokles modulu pružnosti u FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180 dní .....	64
Graf 9 Pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180, 360 dní .....	66
Graf 10 Procentuální pokles pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180, 360 dní .....	66
Graf 11 Modul pružnosti u FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180, 360 dní .....	67
Graf 12 Procentuální pokles modulu pružnosti u FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180, 360 dní .....	67
Graf 13 Objemová hmotnost betonových směsí .....	73
Graf 14 Pevnost v tlaku betonových směsí .....	73
Graf 15 Pevnost v příčném tahu betonových směsí .....	74
Graf 16 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 90 dní ve vodním prostředí při 20 °C .....	75
Graf 17 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 90 dní v alkalickém prostředí při 20 °C .....	76



Graf 18 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 90 dní v alkalickém prostředí při 40 °C .....	76
Graf 19 Pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90 dní .....	77
Graf 20 Procentuální pokles pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90 dní .....	77
Graf 21 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 180 dní ve vodním prostředí při 20 °C .....	79
Graf 22 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 180 dní v alkalickém prostředí při 20 °C .....	80
Graf 23 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 180 dní v alkalickém prostředí při 40 °C .....	80
Graf 24 Pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180 dní .....	81
Graf 25 Procentuální pokles pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180 dní .....	81
Graf 26 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 360 dní ve vodním prostředí při 20 °C .....	83
Graf 27 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 360 dní v alkalickém prostředí při 20 °C .....	84
Graf 28 Průběh síly v čase u vzorků vystavených 360 dní v alkalickém prostředí při 40 °C .....	84
Graf 29 Pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180, 360 dní .....	85
Graf 30 Procentuální pokles pevnosti v tahu FRP výztuží – referenční a vystavené agresivnímu prostředí po dobu: 30, 42, 90, 180, 360 dní .....	85
Graf 31 Srovnání pevností v tlaku pro přímé a ohýbané výztuže – H <sub>2</sub> O při 20 °C	88
Graf 32 Srovnání pevností v tlaku pro přímé a ohýbané výztuže – alkalické prostředí při 20 °C .....	88
Graf 33 Srovnání pevností v tlaku pro přímé a ohýbané výztuže – alkalické prostředí při 40 °C .....	89