



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

**VLASTNOSTI KOMPOZITŮ S POLYMERNÍ
MATICÍ A DLOUHOVLÁKNOVOU VÝZTUŽÍ**

USE OF FRP COMPOSITES AS REINFORCING MATERIAL FOR CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

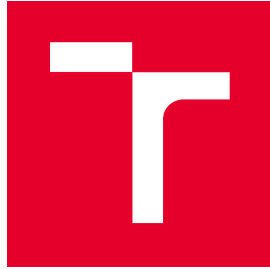
Bc. Denisa Kratochvílová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Denisa Kratochvílová
Název	Vlastnosti kompozitů s polymerní maticí a dlouhovláknovou výztuží
Vedoucí práce	doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

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

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

PODKLADY A LITERATURA

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

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

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

Sborníky z tuzemských a zahraničních konferencí (2013-2018), České a zahraniční technické normy, Internetové zdroje (např. databáze Web of Science, Scopus).

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

FRP materiály (kompozitní materiály s dlouhovláknovou výztuží a polymerní matricí) představují perspektivní skupinu materiálů pro speciální aplikace ve stavebnictví. Uplatnění nachází například jako výztuž ve formě výztužných prutů či jako externí výztuž ve formě lamel, případně tkanin. Další široká skupina výrobků představuje různé profily a prvky pro konstrukce např. schodišť, pochůzných roštů a nosných konstrukcí. FRP materiály používané jako výztuž do betonu mají kromě dobrých pevnostních charakteristik nesporné výhody zejména z hlediska odolnosti vůči korozi a vysoké trvanlivosti v agresivních prostředích. Důležitým faktorem pro správnou funkci výztuže je zajištění dobrého spolupůsobení výztuže a betonu.

V teoretické části diplomové práce popište způsob výroby FRP výztužných prutů. Definujte materiály pro výrobu FRP výztuží. Proveďte rešerši informací z oblasti problematiky soudržnosti FRP výztuže s betonem (zejména z databází Web of Science, Scopus). Zaměřte se na faktory ovlivňující soudržnost FRP výztuže a betonu. Popište degradační vlivy prostředí, které mohou ovlivnit soudržnost FRP výztuže a betonu.

V experimentální části diplomové práce definujte možné postupy pro ověření soudržnosti FRP výztuže a betonu. Navrhněte a realizujte experiment ověření soudržnosti FRP výztuží a betonu. Dokumentujete způsob porušení systému FRP výztuž a beton (fotodokumentace, sledování pomocí optického mikroskopu).

Doporučený rozsah min. 80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Jelikož mají FRP kompozity vysoké pevnosti v tahu ve směru vláken a dobré trvanlivosti, jsou stále častěji využívány na opravy, modernizaci a rekonstrukci betonových konstrukcí. V praxi však přichází riziko předčasného oddělování FRP výztuže od betonu. Tomu lze zabránit vhodným výběrem použitých vláken a matrice a vhodným tvarem výztuže. Vlastnostmi materiálů a soudržností FRP výztuže s betonem se zabývá i tato diplomová práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompozitní materiál, FRP kompozit, vlákna, matrice, výztuž, beton, recyklace, porozita, soudržnost, rozhraní

ABSTRACT

Because FRP composites have high fiber strength and good durability, they are increasingly used for repairs, modernisation and reconstruction of concrete structures. In practice, however there is a risk of premature separation of FRP reinforcement from concrete. This can be avoided by appropriate selecting the fibers and the matrix and the appropriate shape of the reinforcement. The actual materials and consistency of FRP reinforcement with concrete are also covered by this diploma thesis.

KEYWORDS

Composite material, FRP composite, fibres, matrix, reinforcement, concrete, recycling, porosity, cohesion, interface

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Denisa Kratochvílová *Vlastnosti kompozitů s polymerní matricí a dlouhovláknovou výztuží*. Brno, 2018. 72 s., 6 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Vlastnosti kompozitů s polymerní matricí a dlouhvláknovou výztuží* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 17. 12. 2018

Bc. Denisa Kratochvílová

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vlastnosti kompozitů s polymerní matricí a dlouhovláknovou výztuží* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17. 12. 2018

Bc. Denisa Kratochvílová

autor práce

Poděkování

Děkuji své vedoucí diplomové práce doc. Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za odborné vedení, nedocenitelné rady a pomoc při zpracování této diplomové práce. Déle bych chtěla poděkovat Ing. Ondřeji Janušovi za odbornou pomoc při laboratorních zkouškách a cenné rady při zpracování experimentální části diplomové práce.

Obsah

Úvod.....	3
I TEORETICKÁ ČÁST	4
1. FRP KOMPOZITNÍ MATERIÁLY.....	4
1.1. Výztužná vlákna pro FRP kompozitní materiály	4
1.2. Polymerní matrice pro FRP materiály.....	10
2. VYBRANÉ ZPŮSOBY VÝROBY FRP KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	12
2.1. Pultruze	12
2.2. Lití do formy	13
2.3. Ruční laminování.....	13
2.4. SMC, BMC.....	14
3. FRP PRO VYZTUŽOVÁNÍ BETONU.....	15
3.1. Výroba FRP kompozitních výztuží.....	15
3.2. Použití kompozitních výztuží do betonu	16
3.3. FRP jako předpjatá výztuž do betonu	17
3.4. Ztráta celistvosti FRP kompozitní výztuže	18
4. SOUDRŽNOST FRP KOMPOZITŮ S BETONEM.....	22
4.1. Soudržnost FRP kompozitních lamel s betonem	22
4.2. Soudržnost FRP vnitřních výztuží s betonem	22
5. POROZITA FRP.....	27
5.1. Metody pro zjišťování pórovitosti FRP materiálů	27
6. RECYKLACE FRP KOMPOZITŮ.....	34
II EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	37
7. METODIKA PRÁCE	37
8. SLEDOVÁNÍ PÓROVÉ STRUKTURY GFRP VÝZTUŽÍ.....	38
8.1. Porozimetrie GFRP výztuží.....	38
8.2. Sledování obsahu pórů pomocí plynové adsorpční analýzy BET.....	43
9. OVĚŘOVÁNÍ SOUDRŽNOSTI GRFP VÝZTUŽÍ S BETONEM – CYKLICKÉ ZATĚŽOVÁNÍ NOSNÍKŮ S GFRP VÝZTUŽÍ	44
9.1. Příprava zkušebních vzorků	44
9.2. Vlastnosti použitých materiálů.....	44
9.3. Postup výroby zkušebních vzorků	45
9.4. Vlastnosti betonu pro výrobu nosníků s GFRP výztuží	47
9.5. Cyklické zatěžování betonových nosníků s GFRP výztuží	48
10. SLEDOVÁNÍ STRUKTURY GFRP KOMPOZITNÍCH VÝZTUŽÍ.....	54
10.1. Sledování struktury GFRP výztuží po zkoušce cyklického zatěžování betonových nosníků..	55

10.2. Sledování kontaktní zóny beton – GFRP výztuž	57
10.3. Sledování změn struktury GFRP výztuží po působení vysokých teplot	61
11. ZÁVĚR.....	71
12. POUŽITÁ LITERATURA.....	73
13. SEZNAM TABULEK.....	1
14. SEZNAM OBRÁZKŮ.....	2
15. PŘÍLOHY.....	6
15.1. Příloha 1.....	6

Úvod

Výroba a aplikace FRP kompozitů ve stavebnictví je jedním z rychle se rozvíjejících oborů. FRP kompozity se vyrábí z vláken zalitých do kompozitní matrice. Nosníky z kompozitního materiálu jsou na rozdíl od ocelových nosníků lehčí a také odolnější vlhkosti a vnějším vlivům. Jsou anizotropní a nehomogenní. Vláknem v kompozitu určují jeho mechanické vlastnosti a matrice pak určuje fyzikálně chemickou odolnost vůči vlivům prostředí. Díky nízké hmotnosti mají kompozitní stavební výrobky nižší náklady na dopravu a vykládku na stavbě než ocelové prvky. Dále k manipulaci většinou nevyžadují speciální zvedací mechanismy a rychleji se montují. Z FRP kompozitů lze také vyrábět tyčové výztuže do betonových bloků. Tyčovina je tvořena provazcem vláken a polymerní matricí a může být navíc ovinuta vláknem či opatřena posypem pro lepší soudržnost při zabudování do betonu. Na rozdíl od ocelových tyčových výztužných prvků neobsahuje kompozitní výztuž žádné kovové části, a proto nepodléhá korozním vlivům ani působení magnetického pole či bludných proudů. Nevýhodou kompozitních prvků oproti ocelovým prvkům je nižší únosnost při působení vysokých teplot a také nesporně vysoká pořizovací cena. Proti působení vysokých teplot lze však kompozitní materiály chránit například betonem nebo intumescentními nátěry a vysoká pořizovací cena je kompenzována nižšími náklady na ochranu kompozitů v průběhu jejich životnosti.

I Teoretická část

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na vlastnosti jednotlivých složek FRP kompozitů a na výrobu a trvanlivost FRP kompozitů. Podrobněji jsou popisována skleněná vlákna a vlastnosti GFRP kompozitů z důvodu jejich použití v experimentální části. Také jsou zde rozebrány jednotlivé zkoušky prováděné na FRP kompozitech, kterými se následně zabývá experimentální část.

1. FRP kompozitní materiály

Mechanické chování FRP kompozitů je specifické tím, že jsou anizotropní a nehomogenní. Vlákna určují mechanické vlastnosti, jako je modul pružnosti či pevnost a matrice určuje fyzikálně chemickou odolnost vůči vlivům prostředí.

1.1. Výztužná vlákna pro FRP kompozitní materiály

1.1.1. Skleněná vlákna

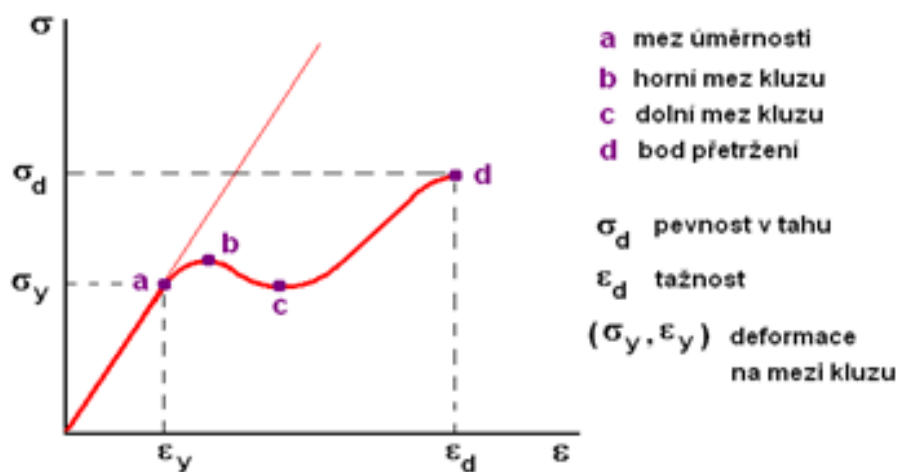
Výchozím materiálem pro výrobu skleněných vláken je sklo.

Historické prameny o vzniku a vývoji skla se velice liší. Pravděpodobně tedy vznikalo nezávisle na sobě na několika místech současně. Vývoj sahá až do 5. tisíciletí př. n. l. v oblasti dnešní Sýrie. V Egyptě jsou pak první prameny zaznamenávající použití skla až ze 4. tisíciletí př. n. l., kde vzniklo jako vedlejší produkt keramické glazury. Od 4. Století n. l. se začíná objevovat barevné sklo ve formě natavených hadových vláken. Od 14. Století se pak poprvé využívá tabulového skla a od 90. let 20. stol. i skleněných vláken jako výztuže do betonu. [4]

Základní surovinou pro výrobu skla jsou sklářské písky s (60 - 80) % SiO_2 . Další složky používané pro jeho výrobu jsou nerostné či chemicky připravené suroviny obsahující CaO , K_2O a Na_2O . Těmito surovinami jsou například vápenec, jíly, kyzové výpalky či soda. Určitým podílem vsázky je také drcené odpadní sklo, které může být i recyklované. Používají se také pomocné příměsi, jako například barviva. Nejčastěji se sklářský kmen taví za teploty (1450 - 1550) °C, křemenné sklo pak kolem 2000 °C. Sklo je tuhý roztok

kovových oxidů v oxidu křemičitém. Tento proces je velmi energeticky náročný, z důvodu tavení v diskontinuálních tavicích agregátech o výkonu až 700 t/den a chlazení v chladících pecích. Ovšem toto není jediná potřebná energie pro zpracování skla. Další energie je potřeba na pohon strojů a zařízení. Při chlazení dochází ke zvýšení viskozity roztoku, a tím k zabránění pohybu molekul a ke krystalizaci křemičitých sloučenin. [5]

Sklo se stejně jako skleněné krystalické látky vyznačuje dobrou trvanlivostí, nevodivostí, recyklovatelností, malou tepelnou vodivostí, dobrou chemickou odolností a odolností proti prosakování vody. Je to transparentní materiál s vysokou pevností v tlaku a ohybu, ale malou a kolísající pevností v tahu. Jeho vlastnosti, jako jsou způsob výroby, mikrostruktura materiálu, tvary a rozměry zkušebních vzorků, kvalita povrchu skla, velikost a druh přiloženého zatížení, změna teploty, charakter prostředí a rychlost zatěžování vzorků jsou však ovlivnitelné faktory. Za normální teploty se sklo při malém krátkodobém zatížení chová jako pružná látka, jejíž průběh napětí je řízen Hookovým zákonem. Modul pružnosti v tlaku se pohybuje kolem 70 000 MPa. [3]



Obr. 1 - Grafické znázornění průběhu napětí skla [3]

Skleněné vlákno je amorfní materiál, který má ve všech směrech struktury stejné vlastnosti. Čerstvě vytažená vlákna jsou ohrožena na pevnosti v tahu kvůli možným negativním vlivům. Tyto vlivy jsou například vzdušná vlhkost či poškození povrchu vzájemným proplétáním vláken. Pevnost může těmito vlivy snížena až o 50 %. Proti mechanickému poškození povrchu jsou vlákna

lubrikována a opatřena vazebnými prostředky. Vazebné prostředky (většinou organické silany či speciální epoxidové pryskyřice) se přidávají pro lepší adhezi polymeru k vláknům. Lubrikace je provedena ještě před sdružením vláken do pramene. [2]

Je mnoho způsobů, jak lze pomocí skleněných vláken vyztužovat betonovou matici. Jedním z nich je krátkovláknová výztuž, kterou nazýváme mikrovlákna. Tato vlákna jsou vyráběna z alkalirezistentního skla s velmi vysokou chemickou odolností a vysokou pevností v tahu (až 3500 MPa). Vlákna mají speciální povrchovou úpravu rozplavitelnou po kontaktu s vodou. Po zamísení s matricí jsou vlákna zcela rozptýlena a brání tak všemi směry proti smršťovacím trhlinám při zrání betonu a malt a to i za předpokladu nestejněměrného vysušování. Ve vyzrálém betonu zlepšují trvanlivost díky vysokému modulu pružnosti a zároveň nesnižují pevnost v tlaku. Mohou však zvyšovat pevnosti v tahu. Skleněná vlákna mají přibližně stejnou objemovou hmotnost jako čerstvý beton a díky tomu není jejich rozptýlení ovlivněno segregací. Mohou se používat do malt a betonových potěrů již od tl. 5 mm. [1]

Dalším typem je výztuž dlouhovláknová. Kompozit ve vlákněné formě má tím větší pevnost, čím tenčí vlákno je. Jeho pevnost je mnohem vyšší, než pevná látka ze stejného materiálu o stejném průměru, což je dáno velikostí přirozených defektů, které jsou v menších materiálech také menší. Dlouhá vlákna zpevňují kompozit pouze ve směru jejich uložení, ale rovnoměrně po celé jejich délce. Proto lze říci, že i délka vláken závisí na míře pevnosti kompozitu. Čím delší je vlákno, tím má kompozit větší pevnost v tahu. Matrice pak chrání vlastní vlákna před vnějšími vlivy a stabilizuje jejich polohu. Dlouhá vlákna se vyrábí obvykle v tloušťce (5 - 20) μm . Tenčí se nevyrábí z důvodu horšího prosycení matricí v příliš tenkých prvcích. Vlákna se dodávají ve formě navinutí na válcovité cívky (rovingy) nebo formou textilií. [2]

1.1.2. Čedičová vlákna

Bazalt neboli čedič je nejhojnější výlevná magmatická hornina vyskytující se na povrchu Země, Měsíce a pravděpodobně i jiných těles Sluneční Soustavy. Je to jemnozrnná šedočerná hornina složená z plagioklasů a pyroxenů. Obě tyto skupiny jsou bohaté na vápník. [10]

Vlákna z čediče se začala vyrábět především díky jejich nízké ceně a dobrým mechanickým vlastnostem ve vysokých teplotách. Tato vlákna jsou relativně novinkou, kterou se vědečtí pracovníci zabývají poslední desetiletí.

Spředená vlákna se získávají roztavením vybrané předem upravené čedičové skály podobnou technologií, jaká se používá pro tavení skla. Roztavený čedič steče do jednoho nebo více pouzder se spoustou otvorů. Z těchto otvorů se odlučují jednotlivá vlákna, která jsou napínána na válec. Ve výrobním procesu není potřeba použití přísad či sloučenin, což má za následek ekonomický a ekologický zisk.

Čedič jako magmatická výlevná hornina je velmi specifická a z důvodu jejího vylévání a tuhnutí přes různé minerály má i různé chemické složení. Díky tomu mají i výsledná vlákna odlišné mechanické a fyzikální vlastnosti. Pozitivní vlastnosti čedičových vláken jsou především dobré zvukově-izolační vlastnosti, odolnost vůči zvýšeným teplotám a chemikáliím, a také malá absorpce vody. Tato vlákna se též vyznačují vysokými mechanickými pevnostmi a připojíme-li jejich nízkou cenu, pak mají vysoký potenciál nahradit vlákna skleněná. [7]

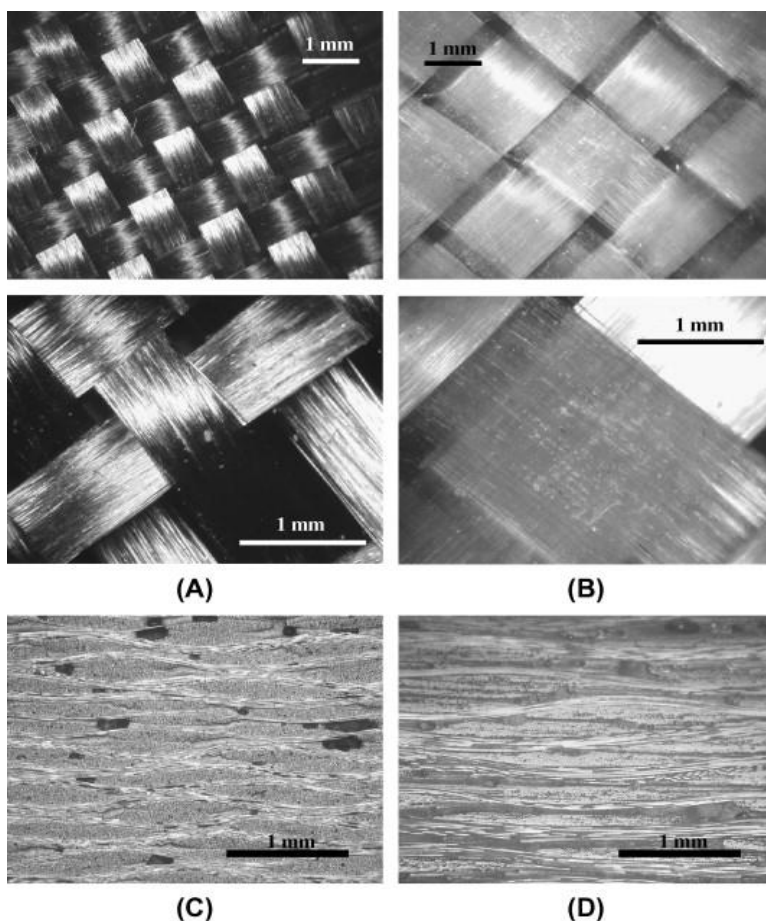
Pro použití čedičových vláken do FRP výztuží mají vysoký potenciál v kombinaci s epoxidovou pryskyřicí, polypropylenem či fenolformaldehydovou pryskyřicí. U kompozitních látek se zkoumá především rozhraní vlákno-matrice. Při této zkoušce byly prokázány rozdílné vlastnosti než při použití skleněných vláken. Čedičová vlákna s matricí vykazují vyšší pevnosti v tahu, tahu za ohybu i ve smyku, lepší odolnost v alkalickém prostředí, ale vykazují také menší odolnost vůči solím a jiným rozpustným látkám a větší absorpci vlhkosti. Vlákna nejsou toxická (ani ta kratší než 6 μm), nehoří a při styku s chemickými látkami nevytváří zdraví škodlivé reakce. Proto se čedičová vlákna jako FRP kompozit hodí pro použití v automobilovém či leteckém průmyslu, na výrobu lodí, i v chemickém průmyslu. [7]

V následující tabulce jsou srovnány vlastnosti kompozitů z čedičových a skleněných vláken. Vzorky byly podrobeny zkouškám tahu za ohybu a tlaku, dále bylo sledováno prodloužení při přetržení, moduly pružnosti a maximální teploty použití. Uvedené výsledky jsou průměrné hodnoty pěti a více testů. Zkoušky ve skutečnosti odhalily až o 42% vyšší pevnosti čedičových

kompozitů. Moduly pružnosti jsou pak vyšší jen zhruba o 16% než u skleněných kompozitů. [7]

Tab. 1 - Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [7]

Mechanické vlastnosti	Čedičové vlákno	Skleněné vlákno
Průměr vlákna [μm]	17	7
Hustota [kg/m^3]	2,8	2,54
Pevnost v tahu [MPa]	4800	3200
Modul pružnosti [GPa]	90	70
Prodloužení při přetržení [%]	3,15	4,0
Maximální teplota použití [$^{\circ}\text{C}$]	650	460



Obr. 2 - Porovnání kompozitu z čedičových a skleněných vláken

A – čedičová vlákna

B – skleněná vlákna

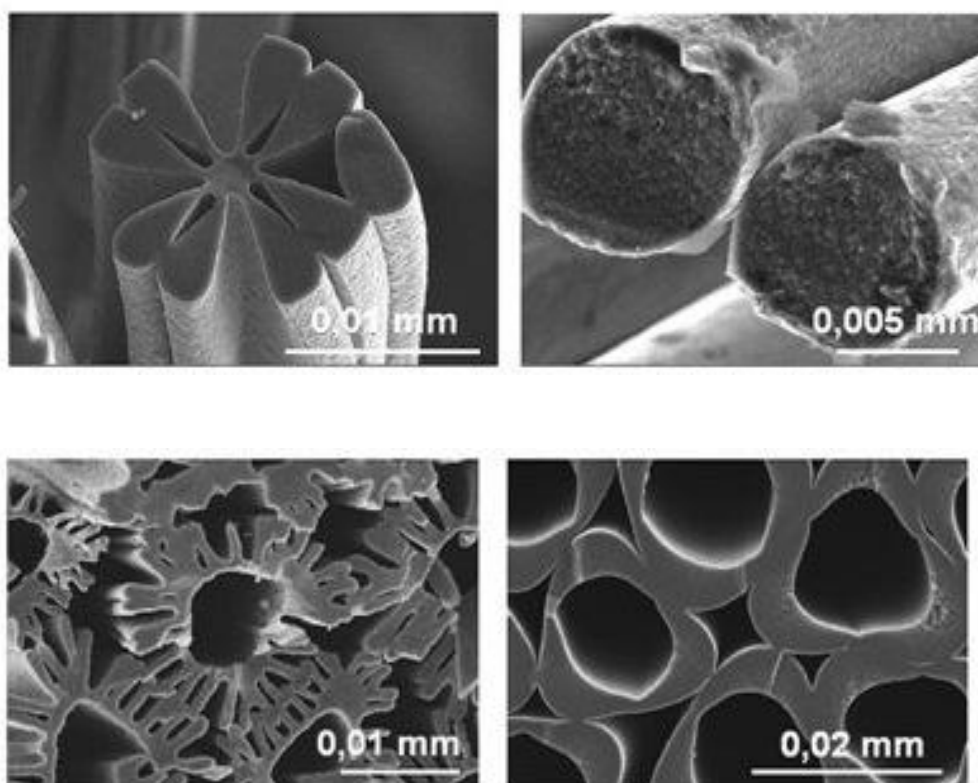
C – čedičová vlákna zalitá matricí

D – skleněná vlákna zalitá matricí [7]

1.1.3. Uhlíková vlákna

Uhlíkové vlákno je druh vlákna obsahující uhlík v různých modifikacích. Takové je například dlouhé a tenké (\varnothing cca 5 - 8 μm) karbonové vlákno. Atomy uhlíku jsou ve vláknu spojeny v krystaly paralelně k dlouhé ose. Díky tomu vyniká vlákno velmi vysokou pevností v tahu. [6]

V průmyslu se tato vlákna používají nejen jako výztuž do betonu, ale i na konstrukce trupů letadel a lodí, rotorů generátorů, částí karoserií či na výrobu sportovního náčiní. [6]



Obr. 3 - Struktura uhlíkových vláken [6]

Výroba probíhá v pěti krocích:

- 1. Příprava prekurzoru** je úprava výchozího materiálu zvlákněním. Ovlivňuje strukturu a pevnost uhlíkových vláken, které jsou pak louženy na požadovanou jemnost.
- 2. Stabilizace** je potřebná pro teplotně stabilní zesílení struktury z dlouhých vláken. Provádí se zahřátím na 200 - 450 °C po dobu 20 - 30 minut, čímž sbírá vlákno kyslíkové molekuly ze vzduchu a tím dojde k přerovnání jeho

atomové struktury. Při stabilizaci vzniká ve vláknech také vlastní teplo, které musíme kontrolovat z důvodu přehřívání.

3. **Karbonizace** je převod prekurzoru na uhlíková vlákna. Probíhá v inertní atmosféře při teplotě 1000 - 2000 °C, což způsobí rozkmitání atomů ve vláknech tak, že je většina neuhlíkových atomů odstraněna. Na konci je ve vláknech až 95 % uhlíku.
4. **Grafitizace** není nutně nezbytná, ale vznikají při ní grafitová vlákna a dochází tak ke zvýšení množství uhlíku až na více než 99 %. Provádí se také v inertní atmosféře, za teploty 2400 - 3000 °C.
5. **Povrchová úprava** se provádí mírnou oxidací pro lepší navázání epoxidových a jiných matric. Okysličuje se plyny (vzduch, oxid uhličitý, ozon) nebo ponořováním do kapalin (chlornan sodný, kyselina dusičná, atp.). [6]

1.2. Polymerní matrice pro FRP materiály

Celostvost kompozitních materiálů zajišťuje matrice, do které jsou vlákna kompozitu zalita. Materiálové vlastnosti vláken a matrice by měly být v souladu, aby se dosáhlo požadovaných optimálních vlastností kompozitu jako celku. Matrice tak spojuje vlákna, zprostředkovává zatížení vláken v místě vnějšího zatížení, přemostuje možné trhliny ve vláknech a vytváří nejen funkční, ale také estetický povrch prvku.[22]

Nejpoužívanější matricí pro FRP kompozity je pryskyřice. Často je kombinována s plnidly a přísadami, v takových případech klasifikujeme pryskyřici dle její molekulární struktury jako termosetovou nebo termoplastickou. [19]

Termosetové pryskyřice jsou například epoxidové, polyesterové nebo vinylesterové. Tyto pryskyřice jsou při výrobě náchylné na nevratné reakce. V jejich molekulárních řetězcích jsou tvořeny trvalé křížové vazby. Termosety zůstávají v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jejich odolnost vůči namáhání vysokými teplotami. V konstrukčních aplikacích FRP kompozitů tyto termosetové pryskyřice převládají. [22][19]

Termoplastické pryskyřice naopak při výrobě netrpí žádnými pozorovatelnými chemickými změnami a mohou tak být snadno převedeny zpět

na původní monomer. Tyto tuhé pryskyřice po zahřátí nad kritickou teplotu měknou a tečou. Po ochlazení pak opět tuhnou. Velká viskozita při výrobě kompozitů může způsobit vznik defektů, jako jsou bublinky, nesmočené prameny výztužných vláken atp. Výhodou termoplastických pryskyřic je vysoká tažnost. Termoplastové pryskyřice převládají u plněných plastů a částicových kompozitů. Termoplastické pryskyřice jsou například polyethylenové, polyuretanové, polypropylenové či polyvinylchloridové pryskyřice. [19][22]

Při výrobě se do pryskyřice přidávají ke zlepšení vlastností přísady jako například retardéry ke zlepšení požárních vlastností, stabilizátory odolnosti vůči UV záření či zvýšení elektrické vodivosti. [19]

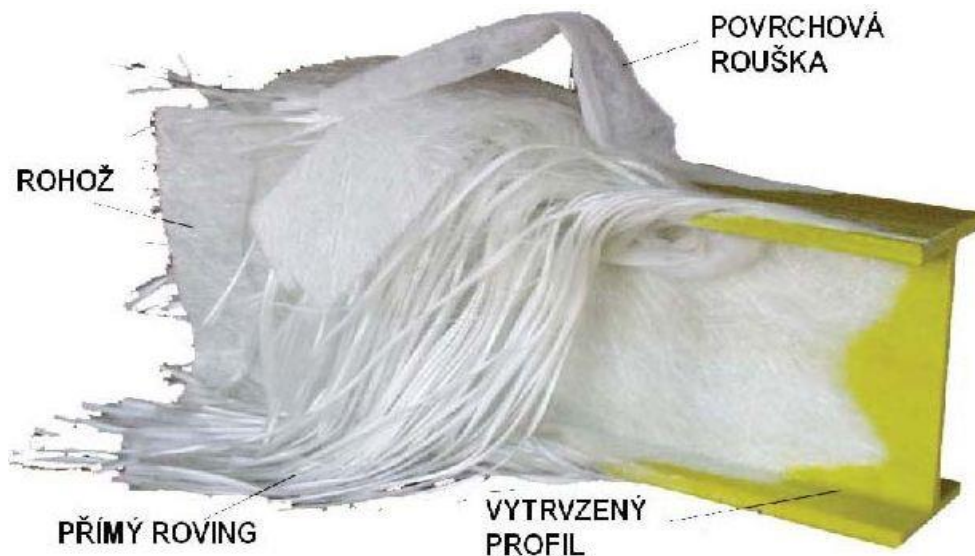
2. Vybrané způsoby výroby FRP kompozitních materiálů

Vlastní spojení vlákna a matrice závisí především na vhodně zvolené kombinaci těchto materiálů. U kompozitních materiálů s polymerní matricí se používá buď tlakové vytlačování (extruze) nebo tažení (pultruze). Nejjednodušší technologií je pak ruční ukládání, které dále dělíme na techniku mokrého ukládání (wet lay-up) a techniku předimpregnace (pre-preg). Při mokřém ukládání je vlákno smáčeno kapalnou matricí přímo ve formě buď štětcem, nebo stříkací pistolí. Pryskyřice je těsně před aplikací smíchána s tvrdidlem. U této metody se nejlépe uplatňují vlákna ve formě rohoží. U technologie předimpregnace je vlákno předem impregnováno tekutou matricí s tvrdidlem u dodavatele. K finálnímu vytvrzení dochází v autoklávu za zvýšené teploty a tlaku u konečného výrobce. Tato metoda bývá obvykle používána na dlouhovláknovou výztuž, náhodně uspořádaná krátká vlákna či na tkané rohože.[22]

2.1. Pultruze

Pultruze je proces výroby vláknou vyztužených pryskyřic různých tvarů a délek. Tažení kompozitního materiálu je kontinuální přes vyhřívanou ocelovou formu pomocí tažného zařízení. Skleněná vlákna v rovingu a rohožích vstupují do srovnávacího zařízení pro rovnoměrné rozmístění výztuže a správné umístění rohoží. Následně jsou smáčeny ve směsi pryskyřice, plniva, barviva, katalyzátoru a různých přísadách. Po smáčecí lázni putuje výrobek do předtvarovací formy, ve které se vytlačí z profilu přebytečná matrice a výrobek pomalu nabývá finální podoby. Zároveň vstupuje do vytvrzovací vyhřívané formy, kde se v průběhu termosetické reakce profil vytvrzuje. Na výstupu je profil podávacím zařízením tažen rychlostí 30-150 cm za minutu a řezán na požadované délky. [21]

Profily jsou na povrchu vyztuženy netkanou polyesterovou textilní rouškou, která ve spojení s matricí chrání skelnou výztuž před vniknutím chemikálií či UV záření a také chrání poškozený kompozit před vyčníváním výztuže. Linka je navíc schopna i ovíjení. Technologií pultruze se dostáváme až na 70 % podílu vláken v objemu kompozitu. [21]



Obr. 4 - Materiály vstupující do výroby FRP kompozitu vyrobeného pultruzí [21]

2.2. Lití do formy

Litím do formy se vyrábí kompozitní rošty, které jsou vyztuženy křížem protaženými vlákny stojinami roštu. Vlákna se postupně impregnují požadovanou pryskyřicí. Po zaplnění se forma ohřívá a za působení chemické reakce dochází k vytvrzení roštu. Díky použití kontinuálních vláken dochází po zatížení výrobku k rozložení sil do celého roštu. Další výhodou jsou pak stejné vlastnosti v obou osách roštu. Lité rošty se vyrábí ve velkých rozměrech a následně jsou řezány na požadované velikosti. [21]

2.3. Ruční laminování

Ruční laminace kompozitních prvků má více technologií. Jednou z nich je ruční kladení. Tato technologie spočívá v kladení vrstev pryskyřice a rohoží skleněné vyztuže do formy. Vyztužnou rohož lze kombinovat i s rovingem. Ručním kladením se vyrábí především tvarově složité prvky, které jsou používány jen v malém množství. Ručním laminováním se dostáváme na 20 % podílu vláken v objemu kompozitu. [21]

Dalším typem efektivní technologie ruční laminace je stříkání. Stříkací aparaturou se nanáší směs pryskyřice a krátkých skleněných vláken na formu či přímo na požadovaný povrch. Stříkací technologií vyrábíme velké díly a opravujeme povrchově poškozené výrobky z různých materiálů (většinou z betonu či kovu). [21]

2.4. SMC, BMC

Zkratka SMC je převzata z angličtiny (Sheet Moulding Compound) a v doslovném překladu znamená „složený litý plech“. Kompozitní materiál vyráběný touto technologií je složen z termosetické pryskyřice a sekaných skleněných vláken. Vyrábí se roztíráním pryskyřice v tenké vrstvě na plastovou fólii. Pás prochází přes sekací zařízení, ze kterého jsou na pryskyřici rovnoměrně rozprostřena nasekaná vlákna a ta jsou znovu překryta vrstvou pryskyřice na plastové fólii. Plát následně prochází systémem válců, mezi kterými je pás tlakem zhutněn, a vlákna jsou zcela prosycena pryskyřicí. Po zhutnění je plát buď navíjen na cívku, nebo kladen do bloků. Z plátů lze vyrobit díly různých tvarů a velikostí. Nařezané pláty se na sebe skládají a následně se v lisu, za působení teploty a tlaku, tvarují a tvrdnou. Technologií SMC se dostáváme na 15-65 % podílu vláken v objemu kompozitu. [21]

Další z angličtiny převzatou materiálovou zkratkou je BMC (Bulk Moulding Compound) a v doslovném překladu znamená „hromadné lití“. Vyrábí se mísením skleněných vláken s termosetickou pryskyřicí, minerálním plnivem a různými přísadami. Směs se lisováním či vstřikováním, a za působení tepla a tlaku, formuje a vytvrzuje. Technologií lisování se dostáváme na 40 % podílu vláken v objemu kompozitu. [21]

3. FRP pro vyztužování betonu

Ročně se po celém světě vynakládají obrovské náklady na sanace a na zesílení betonových konstrukcí. Technologický vývoj a výzkum v oblasti zlepšení mechanického chování a trvanlivosti betonu vedl k vývoji kompozitní výztuže pro konstrukční účely. [8] [13]

3.1. Výroba FRP kompozitních výztuží



Obr. 5 - Linka na výrobu FRP kompozitních výztuží, Prefa Kompozity a.s. [21]

Kompozitní FRP výztuž se vyrábí pultruzí s ovíjením, pro vyšší soudržnost s okolním betonem se často používá povrchová úprava křemičitým pískem. Obsah vláken ve výztuži se pohybuje mezi 75 až 80 %. Kompozitní výztuž lze v nevytvrzeném stavu (ve výrobě) ohýbat dle požadavků zákazníka. Výztuže lze také vázat do sítí. [21]

3.2. Použití kompozitních výztuží do betonu

Kompozitní výztuž určená do betonových konstrukcí je tvořena nosnými jednosměrně orientovanými dlouhými vlákny a pojivem z polymerní matrice. Vlákna se používají skleněná, uhlíková či kombinace obou. [25]



Obr. 6 - GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), C-GFRP (Carbon-Glass Fiber Reinforced Polymer) a CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) výztuž do betonu [25]

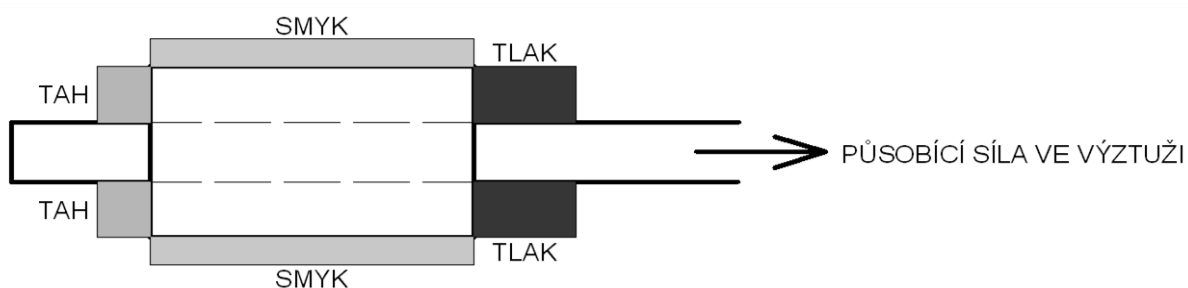
FRP výztuže mohou mít oproti ocelovým výrazně vyšší tahové pevnosti, nepodléhají korozi ani vlivům magnetického pole či bludných proudů a jsou nevodivé. Díky těmto vlastnostem nemusíme při použití FRP výztužných prvků dodržovat krycí vrstvu a dosáhneme tak výrazně tenčích prvků. Mezi negativní vlastnosti FRP výztuže patří především pokles mechanických charakteristik, které jsou v průběhu životnosti konstrukce ovlivňovány působením pH betonu. Dále mají oproti ocelovým prvkům nižší odolnost vůči působení vysokých teplot a nižší modul pružnosti, který snižuje výslednou tuhost konstrukce. [25]

FRP kompozitní výztuž je odolná agresivním vlivům v chemických provozech a čistírnách odpadních vod, proto se skvěle hodí pro aplikaci v chemickém průmyslu a v kombinaci s odolností korozivním vlivům i na základové konstrukce. Navíc jsou pro elektrickou a elektromagnetickou nevodivost vhodné v energetice a v místech, kde je potřebný přenos elektromagnetických signálů (mobilní telefony, televize, atp.). Dále jsou tepelně nevodivé a tak v konstrukci nedochází k tepelným mostům. U těchto způsobů použití je vyšší počáteční investice vyvážena levnější údržbou a delší životností konstrukce. [25]

Materiálové charakteristiky FRP výztuží jsou rozdílné ve směru vláken a kolmo na vlákna. Nosná vlákna jsou při namáhání ve směru vláken lineárně elastická s křehkým lomem při dosažení mezního napětí. FRP výztuž je určena primárně do konstrukcí namáhaných tahovým napětím a je nevhodná do konstrukcí namáhaných tlakem. Jmenovité průměry výztuží se pohybují mezi 5 a 18 mm, zvětšené o 2 mm z důvodu opískování. [25]

3.3. FRP jako předpjatá výztuž do betonu

Vzhledem k anizotropii FRP kompozitních materiálů a z toho vyplývající nízké pevnosti v tlaku ve směru kolmo na průběžná vlákna se FRP výztuž předepíná velice obtížně. [9]



Obr. 7 - Mechanismus kotvení předpínací výztuže s vyznačením působících sil [9]

Na chování a únosnost v kotevní oblasti předpjaté výztuže z FRP kompozitu mají vliv především rozměry a počty kotevních prvků. Standardně se pro kotvení předepjaté výztuže používají kuželíky s vroubkovaným povrchem. Tím

vzniká v kotvené předpínané výztuži výrazné příčné stlačení a zároveň podélný smyk a osový tah. Takovou kombinaci sil však nelze přenést do kompozitní výztuže. Proto byl vymyšlen kotvící systém, který vytváří dodatečné roznášecí plochy v kotevní oblasti výztuže a tím přenáší předpínací síly z výztuže do okolního betonu na výrazně kratší vzdálenosti. Tyto roznášecí plochy jsou tvořeny nalepením válečků, tvořených ze speciální vlákniny vyztužené zálivky, na výztuž. Průměr válečku a jeho délka je variabilní. Pro zvýšení únosnosti a bezpečnosti kotevního systému či pro snížení deformace výztuže v kotevní oblasti lze různé rozměry válečků kombinovat. [9]

Kotevní systém je tvořen výztuží před hlavou první kotvy, kotevními prvky a výztuží mezi kotevními prvky. Při návrhu kotevního systému je důležité omezit hodnotu maximálního posunu výztuže na začátku první kotvy. Přesná hodnota mezního stavu použitelnosti musí být určena přímo pro navrhovaný prvek. Vždy totiž záleží na rozponu daného prvku a na působícím zatížení. Vlivem posunu výztuže v kontaktu by mohlo dojít k velkým ztrátám předpětí. [9]

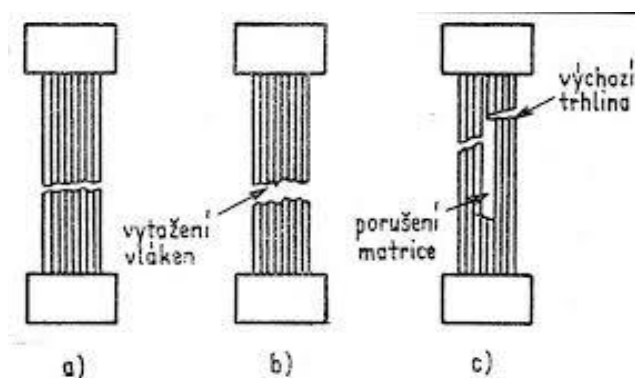
Vyvinutý systém kotvení neobsahuje žádné kovové části, proto zachovává výhody FRP výztuží a lze je tak vystavit i podmínkám, které kovové výztuže nebo jejich části zcela vylučují. [9]

3.4. Ztráta celistvosti FRP kompozitní výztuže

K vnitřnímu porušení celistvosti dochází u dlouhovláknových jednosměrných kompozitních materiálů dříve, než se objeví makroskopické příznaky. Mezi nejčastější příznaky porušení celistvosti patří v první řadě přetržení vláken, vznik mikrotrhlin v matrici či oddělení vláken od matrice. Vlastní mechanismy porušení celistvosti kompozitů závisí na způsobu namáhání.[22]

3.4.1. Podélné tahové namáhání

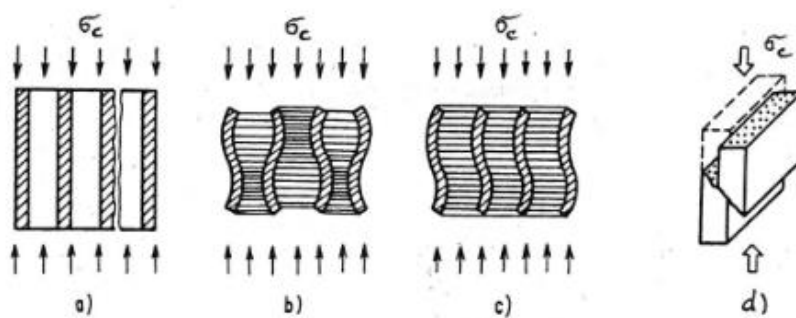
Již při malém zatížení dochází k prvnímu narušení celistvosti. U tahového namáhání dochází k porušení třemi různými mechanismy křehkého lomu. Křehký lom může být samotný, s vytažením vláken či s oddělením složek nebo porušením matrice.[22]



Obr. 8 - Mechanismy porušování dlouhvláknového kompozitu při podélném tahovém namáhání [23]

3.4.2. Podélné tlakové namáhání

Při podélném tlakovém namáhání pozorujeme 4 různé mechanismy porušení. Příčné tahové porušení, mikroprohnutí vláken s extenzní deformací či se smykovou deformací a smykové porušení. K mikroprohnutí dochází i v případech, kdy se matrice chová ještě lineárně pružně. Mechanismus mikroprohnutí vláken s extenzní deformací nastává při malém objemovém podílu vláken. Vazba mezi příčným přetvořením sousedních vláken v tomto mechanismu chybí. K porušení dochází v matrici v místě největšího tahového příčného namáhání. V mechanismu mikroprohnutí vláken se smykovou deformací nastává při velkém množství vláken v kompozitu. Dochází zde k soufázové deformaci vláken. To je důkaz existence vazby sousedních deformujících se vláken. [22]

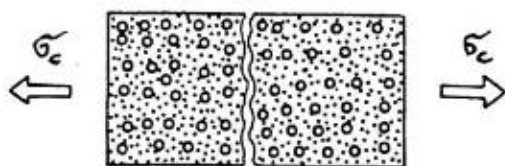


Obr. 9 - Způsoby porušení dlouhvláknových kompozitů při podélném tlakovém namáhání [23]

- a) Příčné tahové porušení
- b) Mikroprohnutí vláken s extenzní deformací
- c) Mikroprohnutí vláken se smykovou deformací
- d) Smykové porušování

3.4.3. Příčné tahové namáhání

Při příčném tahovém namáhání dochází k porušení koncentrace napětí v mezifázovém rozhraní vlákno-matrice a v matrici. Uplatňují se tři mechanismy porušování a to porušování matrice tahovým napětím, oddělování složek na mezifázovém rozhraní a štěpení vláken. Příčný lom probíhá v rovině maximálního hlavního napětí, která je kolmá na směr zatížení. [22]

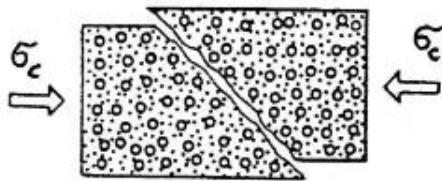


Obr. 10 - Porušení celistvosti dlouhvláknových kompozitů při příčném tahovém namáhání [23]

3.4.4. Příčné tlakové namáhání

U tlakového příčného namáhání dochází ke smykovému porušení matrice, které je doprovázeno vzájemným oddělováním složek či štěpením vláken.

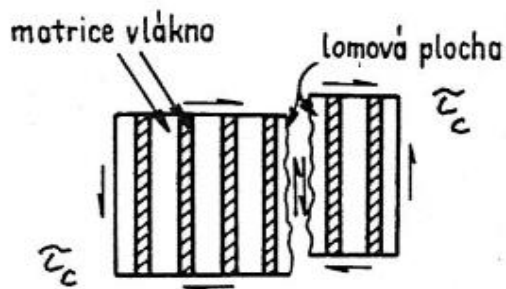
Rovina lomu odpovídá rovině maximálního smykového napětí a svírá s vnějším zatížením úhel 45° . Pokud se zamezí vzájemnému posuvu částí vzorku podle smykové roviny, jsou tahová i tlakové i tahové meze pevnosti stejné. [22]



Obr. 11 - Porušení celistvosti dlouhvláknových kompozitů při příčném tlakovém namáhání [23]

3.4.5. Smykové namáhání

U porušení celistvosti smykovým namáháním se uplatňují 3 mechanismy. Smykové porušování matrice, oddělování složek kompozitu nebo kombinace obou mechanismů. [22]



Obr. 12 - Porušení celistvosti dlouhvláknových kompozitů smykovým namáháním [23]

4. Soudržnost FRP kompozitů s betonem

4.1. Soudržnost FRP kompozitních lamel s betonem

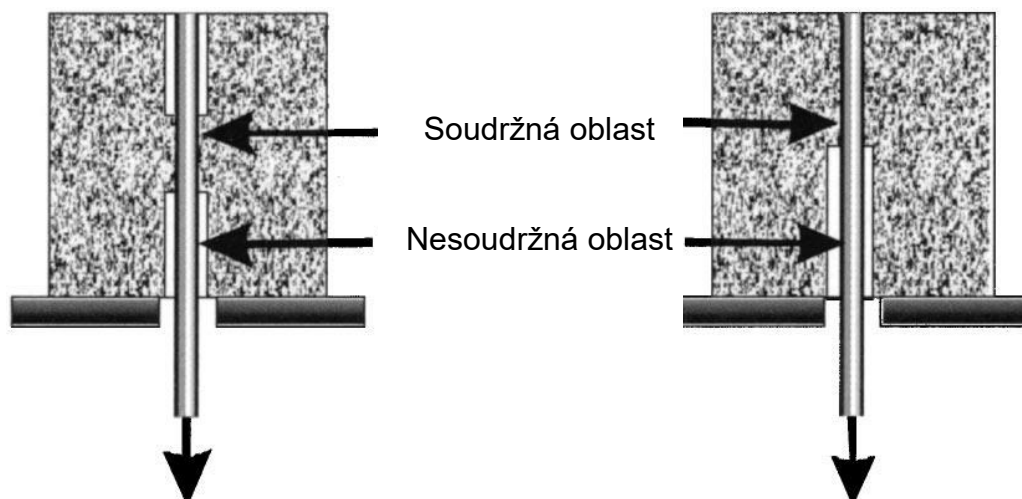
Díky vynikajícím tahovým pevnostem a vysoké trvanlivosti se FRP kompozity stále častěji používají při sanacích konstrukcí. Pozitivní vlastnosti FRP kompozitů však v některých případech nelze v praxi zcela využít z důvodu nízké soudržnosti na rozhraní FRP kompozit-beton.

Vývoj v konceptu modelů soudržných zón (CZM z anglického Cohesive zone model) poskytuje simulaci kombinovaného režimu poruch na rozhraní FRP-beton. Koncept aplikace CZM se provádí pomocí prvků rozhraní podél cesty potenciální trhliny. CZM je tím účinnější, čím více je srovnatelná pevnost sousedních materiálů. Vnitřní vlastnosti bimateriálních rozhraní jsou energie zlomu rozhraní a soudržná síla rozhraní. Energie zlomu rozhraní je definována jako celková práce lomu na jednotku plochy lomového rozhraní při stálém růstu trhliny. Znalosti těchto vlastností pomáhají při vhodném výběru materiálu, upřesňují parametry procesu selhání a pomáhají zlepšit životnost rozhraní. [23]

Rozeznáváme dva dominantní typy režimů selhání rozhraní a to selhání rozhraní lepidla a zpevnovaného betonu a kotevní trhliny v blízkosti vazby matrice a lepidla. Oba typy mají za následek konečné oddělení rozhraní, ale mechanismy porušení se liší. V režimu selhání rozhraní dochází k přechodu mezi oddělením lepidla a trhlínkami v betonu či matrici. Tento přechod závisí na parametrech rozhraní, jako je pevnost a kritická energie zlomu rozhraní či velikost spojitě pevnosti rozhraní a betonu. [24]

4.2. Soudržnost FRP vnitřních výztuží s betonem

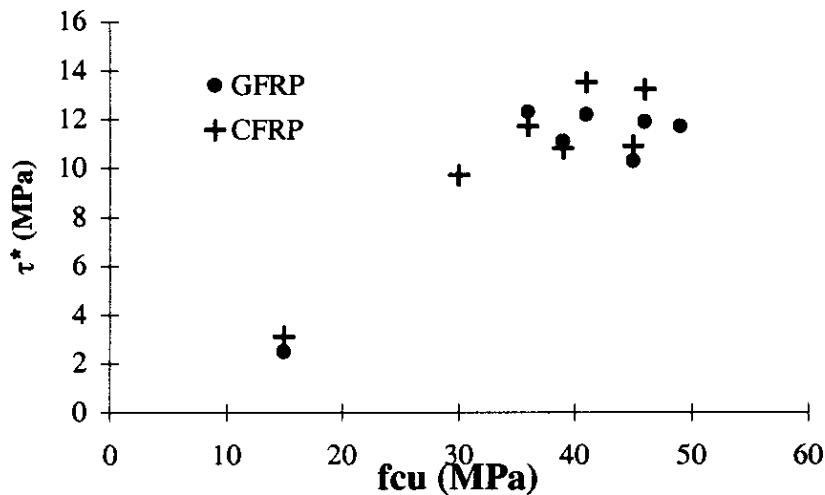
Soudržnost je klíčovým faktorem k zajištění spolupůsobení výztuže a betonu. Soudržnost je nutná k přenosu sil mezi výztuží a betonem. Dřívější výzkumy byly zaměřeny především na sledování soudržnosti betonové matrice s ocelovou výztuží či s výztuží potaženou epoxidem. V současné době se ukazuje nutnost zkoumat také spolupůsobení nekovových FRP výztužných prvků s betonovou matricí. [13]



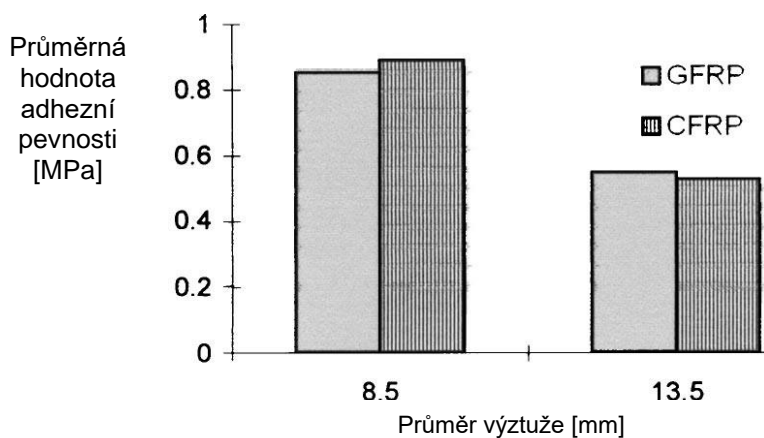
Obr. 13 - Soudržnost výztužných prvků s betonovým prostředím [13]

Nejčastěji používaná zkouška pro zjištění soudržnosti (zjištění pevnosti rozhraní výztuže s betonem) je trhací zkouška. Tato zkouška se používá k hodnocení soudržnosti mezi výztuží a betonovou matricí. Tato zkouška je ekonomičtější verzí zkoušky tahové. Rozdílem je, že při trhací zkoušce používáme vzorek zabetonovaný pouze z části. Z tohoto důvodu je však potřeba počítat s možným rozdílem mezi vazebnou silou zjištěnou při trhací zkoušce a při zkoušce tahové. Odolnost krycí vrstvy totiž určuje konečné zatížení při porušení. [13]

Na obrázku 12 jsou znázorněny dva způsoby uložení ocelové výztuže do betonové matrice, které se běžně používají pro trhací zkoušku. Při zabetonování výztuže až k hraně krychle často dochází k deformaci betonu právě na tomto konci krychle, což je považováno za prokluz výztuže, i když o klasický prokluz nejde. Upravená verze zkoušky spočívá ve spojení výztuže s betonovou matricí pouze ve střední části krychle či s koncovkou výztuže, která je s krychlí v kontaktu. Při výpočtech tažné síly se primární proměnné určí dle typu vlákna výztuže, pevnosti betonu, průměru, tvaru a povrchu tyčoviny a délky zapuštění a umístění zapuštění v betonové krychli. Tyto faktory však mají jiný vliv pro použití FRP výztužných prvků z důvodu silné anizotropie a jiných mechanických vlastností těchto komponentů oproti ocelovým. [13]

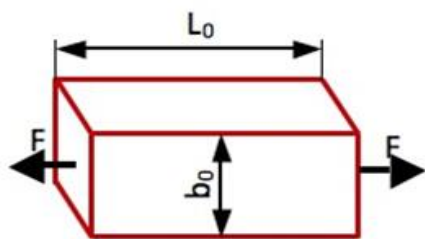


Obr. 14 - Závislost pevnosti v tlaku f_{cu} betonové matrice na velikosti průměrného zatížení T při vytažení GFRP a CFRP výztuže [13]

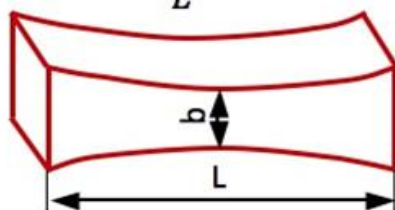


Obr. 15 - Závislost průměru FRP výztuže na pevnosti spoje s betonovou matricí [13]

V grafu na obr 13 můžeme sledovat závislost pevnosti v tlaku betonové matrice na velikosti zatížení při vytržení výztuže z krychle. Při pevnosti v tlaku nad 30 MPa se rozhraní porušení vazby vyskytuje na povrchu krychle. Při nižších pevnostech je pak hranice porušení uvnitř betonové matrice. Graf na obr. 14 ukazuje závislost průměru výztuže na velikosti zatížení při vytržení. Pozorujeme značný rozdíl pevností při zvyšujícím se průměru výztuže. Naopak žádný z uvedených grafů nepotvrdil rozdíl výsledků v závislosti na materiálu výztuže. [13]



$$\mu = \frac{\frac{b - b_0}{b}}{\frac{L - L_0}{L}} \leq 0,5$$

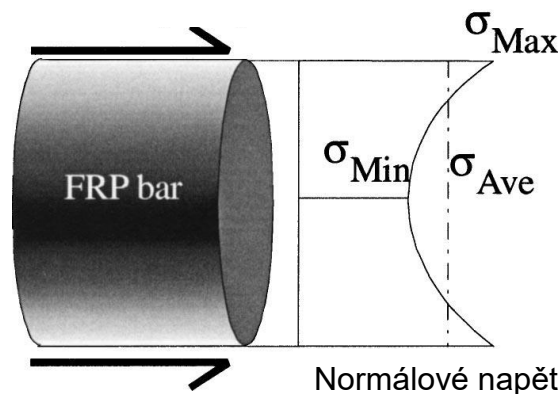


Obr. 16 - Poissonův efekt [13]

Nižší pevnost u vyšších průměrů výztuže je způsobena uvolněním lepicí vazby dříve, než dojde k vytržení výztuže. Za tuto nižší pevnost jsou zodpovědné především tři faktory a to délka uložení, Poissonův efekt a stříhová pevnost. Tyče s větším průměrem vyžadují větší délku uložení pro srovnatelnou soudržnost s matricí. Ovšem nadměrná délka uložení naopak soudržnost zase snižuje, jak je již zmíněno výše. Poissonův efekt může vést k mírnému poklesu průměru tyče v důsledku podélného namáhání. Pokles je tím větší, čím větší je průměr tyčoviny, což vede ke snížení třecích sil. [13]

Pevnost ve stříhu tyčí závisí především na smykové tuhosti pryskyřice FRP kompozitu a na pevnosti ve smyku na rozhraní vlákno-pryskyřice. Pokud je FRP výztuž potažena povrchovou vrstvou, může docházet k pohybu mezi jádrem a povrchovými vlákny, což vede k nerovnoměrnému rozložení sil v průřezu tyče (obr. 14). Tomuto efektu říkáme smykové zpoždění. Dochází ke zvýšení smykového napětí u povrchu tyče, který zabezpečuje pevnost spoje výztuže s matricí, zatímco vypočtené průměrné napětí je nižší. Z obrázku je patrné, že u vyšších průměrů výztuže bude tento rozdíl také vyšší a soudržnost s matricí pak menší. [13]

Normálové smykové napětí



Obr. 17 - Rozložení sil napětí ve smykovém zpoždění [13]

Soudržnost výztuže s matricí můžeme zvýšit použitím čtvercových průřezů tyčí (až o 25%) či kulaté tyčoviny s žebry nebo s navinutým vláknem. Vytvořené hrany vykazují takzvaný klínový efekt a tím brání prosmyku výztuže. Ke zlepšení soudržnosti výztuže s matricí vede také povrchová úprava v podobě posypu křemičitým pískem či lehká koroze na povrchu výztuže. Korozní vrstva však nesmí být v takové hloubce a stádiu, kdy se již začíná od zbytku výztuže odlupovat. Uvádí se optimální míra koroze kolem 5.4 % ($\pm 0,75$ mm). Posyp na povrchu výztuže se přidává již ve výrobě FRP výztuže a na povrchu tyče vytváří chemicky adhezní a mechanicky odolnější vrstvu (mechanická blokáce). [13][14]

5. Porozita FRP

Z výrobního procesu se vzduchové póry v kompozitním materiálu tvoří dvěma způsoby. Prvním je nedostatečná infiltrace vláknů a následné mechanické zachycení vzduchových bublin. Druhým způsobem je vyvolání prázdné dutinky uvolňováním prchavé látky z procesu vytvrzování. Póry v kompozitu mají negativní vliv především na podélné a příčné tahové, ohybové i smykové pevnosti, nárazové vlastnosti a únavové vlastnosti. [20]

Póry lze rozdělit na uzavřené, které jsou zcela izolované od jiných pórů a ovlivňují hustotu materiálu, jeho mechanickou pevnost a tepelnou vodivost, a na póry otevřené, které jsou kanály propojené s povrchem materiálu a ovlivňují materiálovou nasákavost, propustnost i jeho hustotu.

Póry v materiálech se vyznačují větší hloubkou než šířkou. Dle šířky se pak póry dělí na mikropóry (<2 nm), mezopóry (2-50 nm) a makropóry (>50 nm). [15] [16]. Póry ovlivňují fyzikální vlastnosti a chování materiálu v okolním prostředí. [16]. Ke stanovení distribuce velikosti pórů lze využít různé metody založené na odlišných principech měření. Například měření transportních vlastností při permeaci či difuzi, intruzi nesmáčeující kapalinou, sorpci plynu, kapilární kondenzaci, obrazovou analýzu a jiné. [17]

5.1. Metody pro zjišťování pórovitosti FRP materiálů

5.1.1. Stanovení pórovitosti FRP pomocí ultrazvuku

Jedna z nejčastějších nedestruktivních metod pro zjišťování obsahu pórů v kompozitu je ultrazvuková kontrola. Ta funguje na principu oslabení ultrazvukových vln při průchodu vzduchovým pórem. Ten ovlivní i akustickou impedanci v kompozitu. Pórovitost se pak vypočte ze vztahu

$$P_v = 100 - \rho_c \left(\frac{w_r}{\rho_r} + \frac{w_f}{\rho_f} \right),$$

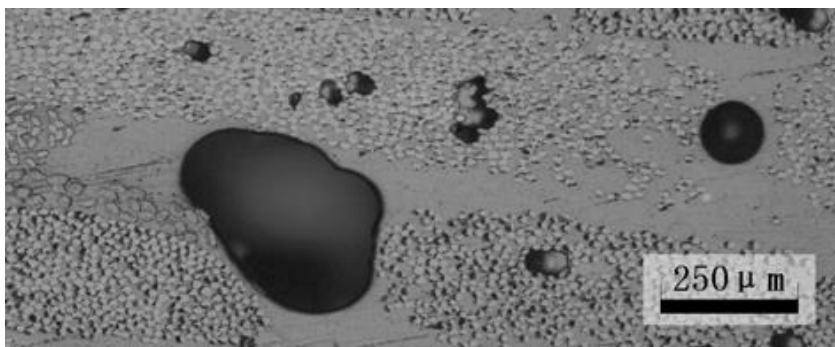
kde P_v je porozimetrie [%],

ρ_c hustota vzorku,

w_r a w_f jsou hmotnostní frakce pryskyřice a vlákna,

ρ_r a ρ_f je hustota pryskyřice a vlákna.

Většina velkých dutin se nachází v přebytečné pryskyřici, kde se vzduchové bubliny nemohou zcela vypudit. Malé vzduchové póry jsou pak nejčastěji v oblasti vláken, kde se vlákno nemůže infiltrovat. Na obr. 17 je patrné, že jsou všechny dutiny sférické či elipsoidní. [20]



Obr. 18 - Mikroskopické zachycení vzduchových pórů v kompozitu [20]

5.1.2. Měření transportních vlastností – propustnost

Propustnost je schopnost porézního materiálu přenášet tekutinu. Transport je zajištěn propojenými otevřenými póry mikrostruktury materiálu za působení určitého tlaku. Tím se zabývá i studie Katze a Thompsona, která usnadňuje předvídání propustnosti materiálu pro tekutiny. Katz a Thompson představili dva výpočty absolutní propustnosti (k) za použití dat z kapilární křivky injekce rtuť. V prvním výpočtu je zahrnut vodivostní poměr σ/σ_0 . Data rtuťové porozimetrie se používají k určení charakteristické délky otevřených pórů (L_C). [16]

$$k = 1/226(L_C)^2 \sigma/\sigma_0$$

Druhá rovnice představuje odhad vodivostního poměru (σ/σ_0) získaného ze stejných údajů, jako propustnost (k). Tato rovnice vyžaduje kromě délky pórů (L_C) také hodnotu délky maximální vodivosti (L_{max}) a zlomek celkové pórovitosti (ϕ) při maximální délce vodivosti ($S(L_{max})$). [16]

$$k = (1/89) \cdot (L_{max})^2 \cdot (L_{max} / L_C) \cdot \phi S(L_{max})$$

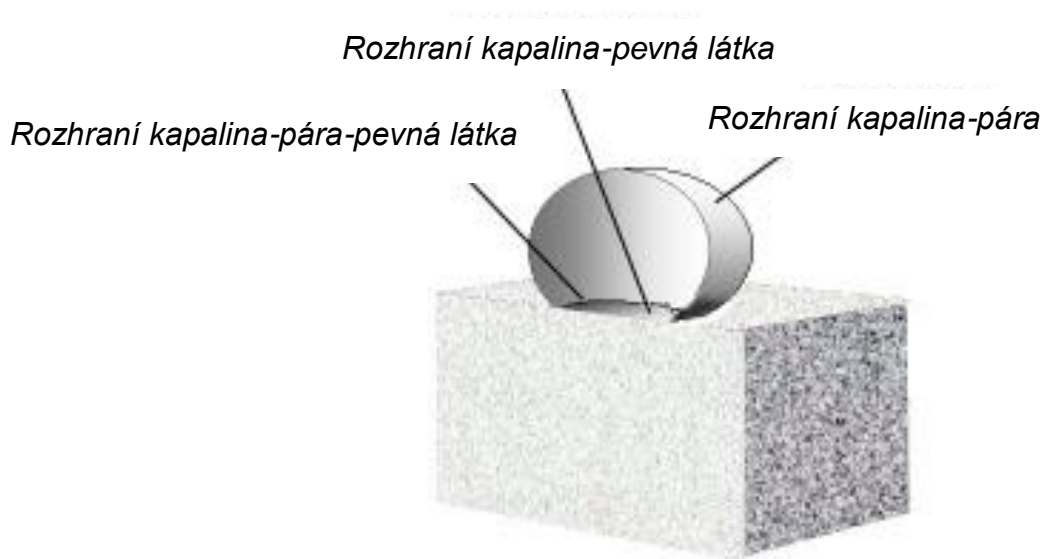
Při zvyšování tlaků je rtuť vtlačena do pórů o stále menším průměru až do hladiny kritického tlaku, při kterém dochází k rozptylování vzorku rtuť. Průměr L_C značí stupnici přenosové délky a ovládá velikost permeability vzorku. Pro získání charakteristické délky L_C kritického tlaku se tlak určuje v inflexním bodě rostoucí křivky pronikání rtuť. Inflexní bod stanovili Katz a Thompson mezi bodem rozptylování vzorku a bodem extrakce. Tento bod je nazýván bodem prahového tlaku (P_t). Hodnota délky L_C je vypočtena z Washburnovy rovnice a předpokládáme známý vodivostní poměr (σ/σ_0). [16]

$$D = -\frac{4\gamma\cos\Theta}{P}$$

Druhá forma rovnice, ve které se odhaduje vodivostní poměr (σ/σ_0), určuje kumulativní objem V_t při prahovém tlaku P_t , poté se odčítá objem V_t při každém tlaku v datové řadě od prahového tlaku po maximální tlak. V závislosti na průměru pórů se následně vypočte čistý objem ($V_c - V_t$). Průměr pórů odpovídající maximální hodnotě y je L_{max} , kumulativní objem rtuť při tomto průměru je $V_{L_{max}}$. Frakce $S(L_{max})$ se vypočte jako poměr $V_{L_{max}}/V_t$. [16]

5.1.3. Intruze nesmáčeující kapalinou – rtuťová porozimetrie

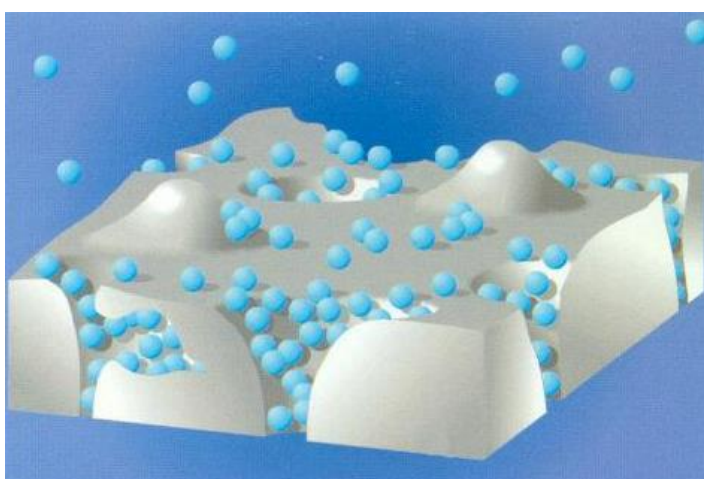
Rtuť je pro většinu materiálu nesmáčivá kapalina, která svírá s povrchem úhel $>90^\circ$. Proto se do otevřených pórů materiálu musí vpravit působením vnějšího tlaku. Pro větší póry stačí menší tlaky a naopak čím menší póry, tím musí být vynaložen větší tlak. Tyto tlaky jsou v průběhu zkoušky neustále sledovány. Čím přesnější je sledování tlaků, tím přesnější budou údaje o velikosti pórů. Metodou rtuťové porozimetrie lze identifikovat póry o velikosti od 0,003 μm až do 360 μm v průměru. [16]



Obr. 19 - Průřez kapkou nesmáčivé kapaliny na pevném povrchu [17]

5.1.4. Sorpce plynu – BET analýza

Vlastností povrchů pevných látek je tendence přitahovat molekuly plynů prostředí, ve kterém jsou látky uloženy. Tomuto procesu přitahování molekul se říká adsorpce plynu. Když uvedeme pevnou látku objemu do kontaktu s plynem v uzavřeném sledovaném prostoru, plyn se zmenší a na povrchu tuhé látky dojde k jeho zhuštění. [15][18]

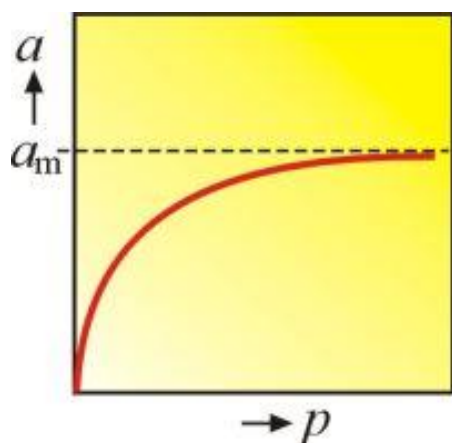


Obr. 20 - Adsorpce molekul plynu na povrchu adsorbentu [15]

Na povrchu adsorbentu (pevné látky) dochází k adsorpční rovnováze s adsorbátem (použitým plynem) za rovnovážného tlaku plynu. Molekula plynu je k povrchu adsorbentu adsorbována (přilne). Opačný jev, kdy je molekula plynu z povrchu odebírána, se nazývá desorpce. [15][18]

Adsorpce poskytuje informace o adsorbentu, jako je jeho specifická plocha povrchu či distribuce šířek pórů a jejich objem. Měří se množství plynu, který se adsorbuje za dané teploty a tlaku na povrch vzorku. Touto metodou se zjišťují pouze otevřené póry. Nezjistíme ale informace o vnitřních uzavřených pórech, které také ovlivňují materiálové vlastnosti adsorbentu. Z vypočteného povrchu adsorbátu lze vytvořit experimentální křivku, tzv. adsorpční izotermu, udávající závislost objemu adsorbovaného plynu na jeho rovnovážném tlaku za konstantní teploty. Dle interakční energie mezi plynem a měřenou látkou se adsorpce dělí na fyzikální a chemickou, tzv. fyzisorpci a chemisorpci. [15][18]

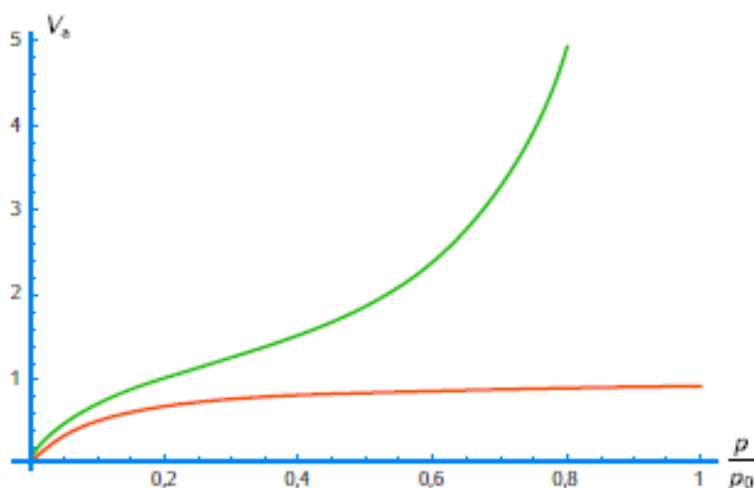
Jednodušší rovnici izotermu pro plyny adsorbované na pevné látky, která vyhovuje v některých případech jednovrstvé adsorpci, odvodil v roce 1916 Irving Langmuir. Při jejím odvození předpokládal jednovrstvé adsorbované molekuly a rovnocennou adsorpci všech míst povrchu adsorbentu. Zároveň pak uvažoval rovnovážnou adsorpci a desorpci molekul plynu. Ve většině případů je však na povrchu adsorbentu jistá nepravidelnost, adsorbované molekuly nejsou zcela inertní a mechanismus adsorpce není vždy stejný pro první i poslední adsorbovanou molekulu. A hlavně mají molekuly tendenci se vázat na monovrstvu. Langmuirova adsorpční izoterma je obvykle dobrá v případech chemisorpce. [15]



Obr. 21 - Langmuirova adsorpční izoterma [15]

V případech Fyzisorpce je naopak lepší takzvaná BET izoterma. Jak již bylo zmíněno, v praxi často molekuly plynu adsorbují do monovrstev. Izotermu pro tento děj zformovali roku 1938 Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett a Edward Teller. Teorie, popisující tuto izotermu, zkráceně BET teorie, je základem analytické metody pro měření specifické plochy povrchu pevných látek. Pro využití této metody vznikla také mezinárodní norma ISO 9277;1995 – Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption using the BET method, v překladu Stanovení specifické plochy povrchu pevných látek adsorpcí plynu metodou BET. [15]

BET teorie rozšiřuje Langmuirovu teorii o předpoklad, že molekuly plynů fyzisorbují na pevnou látku ve vrstvách, že lze aplikovat Langmuirovu teorii na každou adsorbovanou vrstvu a že adsorpční vrstvy mezi sebou neinteragují.[15]



Obr. 22 - Průběh Langmuirovy (červená) a BET (zelená) izoterm [15]

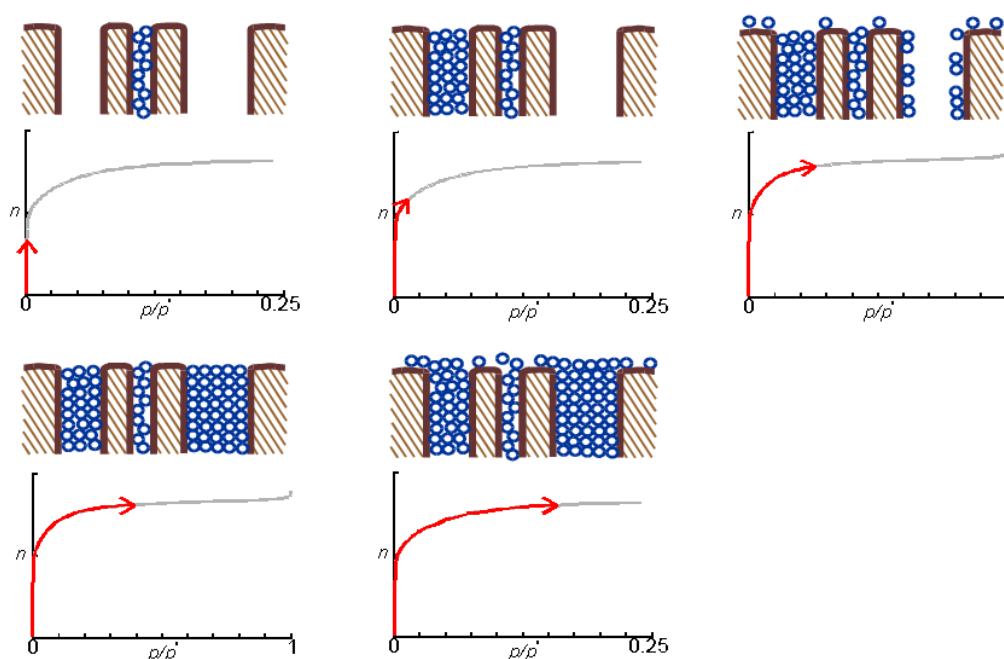
O správnosti měření nevyovídá samotná linearita BET izotermu, jejíž rozsah nastává dle různých materiálů za různých tlaků, ale také linearita části při $\frac{n_a}{n_m} \approx 1$, kde n_a je objem adsorbovaného plynu a n_m objem plynu v monovrstvě. BET analýza nefunguje, pokud je posun počátku záporný. [15]

Vysoká hodnota interakce adsorbent-adsorbát může indikovat existenci mikropórů. Nejčastější měření se provádí dusíkem, který vykazuje dostatečnou přesnost adsorpce pro dobré určení kapacity monovrstvy BET analýzou. Langmuirova izoterma tak odpovídá kompletnímu pokrytí povrchu

monovrstvou. Přechod z adsorpční monovrstvy do adsorpční multivrstvy pak nastává ve střední lineární části izotermy. Rozsah a umístění lineární části BET izotermy závisí na pracovní teplotě a na adsorpčním systému adsorbent-adsorbát. [15]

5.1.5. Kapilární kondenzace

Stav rovnováhy fází kapalina-plyn v omezených prostorech se nazývá kapilární kondenzace. Dochází k ní v případech, kdy se již tvoří multivrstva. Do pórů porézního či práškového vzorku jsou molekuly plynu vtahovány větší silou a plyn zde kondenzuje dříve než na jejím povrchu. [15] [18]



Obr. 23 - Adsorpce plynu a tvorba izotermy na mikroporézním vzorku [15]

6. Recyklace FRP kompozitů

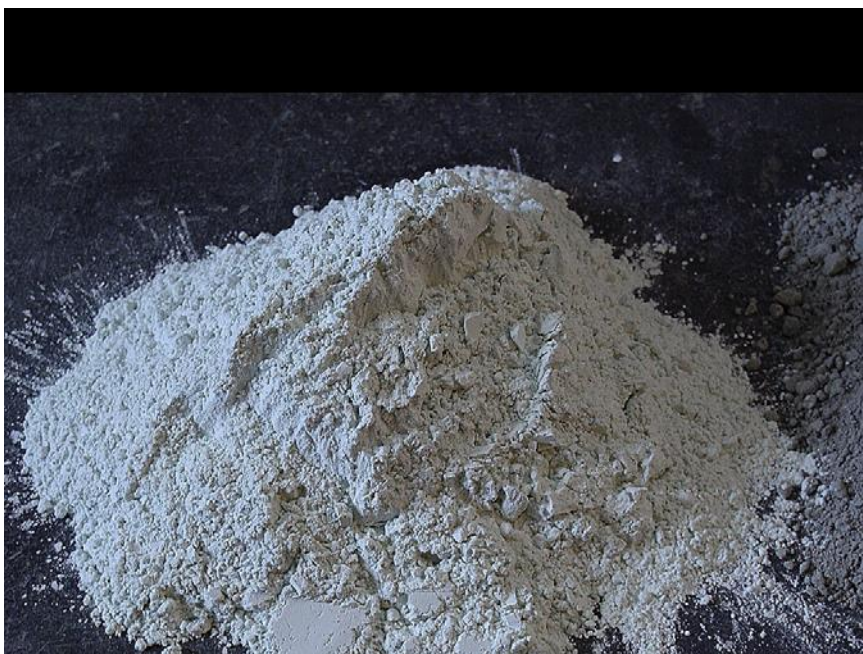
Odpad ze stavební výroby a jeho znovu použitelnost je jednou z důležitých otázek dnešní doby. Odpad z výroby FRP kompozitů z termoplastických pryskyřic, pokud není znečištěn, lze znovu roztavit a použít. Naopak odpad z výroby FRP kompozitů z termosetových pryskyřic nelze znovu přetavit, proto jsou často tyto odpady odváženy na skládku a to i přes obrovský dopad na životní prostředí. Termosetové pryskyřice se vzhledem k jejich nízké viskozitě používají častěji, jelikož umožňují rychlejší výrobu, mají lepší adhezní vlastnosti k vláknům a zaručují lepší mechanické vlastnosti kompozitu. Pro jejich nerecyklovatelnost jsou termosetové kompozity nákladnější než termoplastové. Některé evropské legislativy regulují množství tohoto odpadu na skládkách a snižují vlivy na životní prostředí a lidské zdraví způsobené spalováním odpadů. [19]

Organické materiály obecně mají vysoký výhřevný výkon, proto mohou být používány jako zdroj energie. Podle Pickeringa a Bersona mají termosetové pryskyřice výhřevnost zhruba 30 000 kJ/kg (výsledek z roku 2002). Hlavním problémem je však v toxických emisích FRP kompozitů, které mají tendenci přežít spalovací proces, a je proto jejich spalování nákladnější. [19]

Existují dvě technické metody recyklace FRP kompozitů. První je tepelná metoda, která využívá teplo k rozkladu odpadu na jednotlivé suroviny a energii a druhá je mechanická metoda, spočívající v rozmělnění odpadu, čímž omezuje jeho velikost. Mechanická metoda zahrnuje řezání, drcení a broušení. V první fázi se používají řezací či drtící mlýny k rozbití původního materiálu na kusy o velikosti 50 x 100 mm. Dále se používají kladivové mlýny k broušení těchto kusů na částice do 50 μm . Nakonec se materiál pomocí sady cyklonů a sítí dělí na frakce do 0,5 mm a nad 0,5 mm. Obě frakce se pak mohou znovu využít jako plnivo či jako výztuž nových kompozitů. [19]

Tepelná metoda odděluje vláknitou výztuž od polymerní matrice. To umožňuje znovu použití původních složek kompozitu. I tato metoda se dělí na dva procesy. První je technika tepelného procesu ve fluidním loži a druhé jsou procesy pyrolýzy. Obě techniky spočívají v zahřívání kompozitu na dostatečnou teplotu pro vypaření polymerní matrice a regeneraci vláken a plniv. Současně během procesu kondenzují plyny z odpařování polymeru, které tak vytváří

palivo pro samotný ohřev. Vysoké teploty se však musí hlídat, aby se nepoškodila vlákna recyklovaného kompozitu. Zahřívání ve fluidním loži na teploty 450-650 °C způsobuje snížení pevnosti v tahu skleněných vláken o 50 až 90 % a uhlíkových vláken o 20%. [19]



Obr. 24 - Odpad z mechanické metody recyklace FRP kompozitů [19]

Většina výrobků FRP je vyráběna pro daný účel, proto je jejich znovupoužití velice komplikované. I když je nová aplikace podobná staré, nelze přesně určit zbytkové mechanické vlastnosti a zohlednit stupeň degradace prostředím. [19]

Drobný odpad z procesu drcení, stejně jako z tepelného procesu je pak možné znovu aplikovat jako plnivo nových FRP kompozitů. Nahrazují tak například uhličitán vápenatý v sypkých (BMC) a lisovaných (SMC) hmotách. Ztráta mechanických vlastností je při použití 20% recyklovaného plniva jen zhruba 10%. Nový recyklovaný kompozit je levnější, má i nižší hmotnost, ale k propojení složek je zapotřebí více pryskyřice. Z experimentu Petersona a Nilssona vyplývá, že při nahrazení 10% uhličitánu vápenatého recyklovanou složkou, dochází ke snížení ohybového modulu, ale pevnost v ohybu se mírně zvyšuje. Při vyšším poměru náhrady uhličitánu je však ohybová pevnost až o 50% nižší. [19]

Nahrazením části vláken nového FRP kompozitu recyklovanými vlákny získanými z tepelného procesu má také negativní dopad na mechanické

vlastnosti nového výrobku. Snížení pevností způsobuje slabší spojení mezi recyklovanými vlákny a novou polymerní matricí. [19]

Největší potenciál využití odpadů z výroby a recyklace FRP kompozitů je ve stavitelství. V silničním stavitelství je doporučeno množství odpadu 1% z celkové hmotnosti asfaltových směsí. V betonových směsích mohou FRP odpady nahrazovat část kameniva. Materiál získaný mechanickým zpracováním pouze z drtících mlýnů (kusy o velikosti 50 – 100 mm) však nemusí být vždy vhodnou náhradou hrubého kameniva, jelikož většina recyklací získaných kompozitních složek má převládající jeden rozměr, což může v betonu působit anizotropně. Tato skutečnost způsobuje kolísající výsledné pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu. Nahrazení jemného kameniva jemným práškem z drcení FRP kompozitů má pozitivní vlastnosti jak na mechanické vlastnosti, tak i na trvanlivost výsledného betonu. Kombinace náhrady jemného i hrubého kameniva různými frakcemi odpadního FRP kompozitu pak u ztvrdlého betonu zlepšují trvanlivost, ale zhoršují mechanické vlastnosti. Částice FRP kompozitů také zhoršují zpracovatelnost betonové směsi s pevným hmotnostním poměrem voda / cement. [19]

II Experimentální část

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na ověření soudržnosti GFRP výztuže s betonem. Byl navržen postup a následně bylo realizováno experimentální ověření soudržnosti GFRP výztuže s betonem. Byla vyrobena zkušební tělesa, byly stanoveny vlastnosti betonu a vlastnosti použité GFRP výztuže. Kromě mechanických vlastností byla sledována porozita GFRP výztuží a vliv působení vysokých teplot na GFRP výztuže. Provedené experimenty jsou doplněny fotodokumentací a snímky z optického mikroskopu Keyence VHX-950F.

7. Metodika práce

Pro experimentální ověření soudržnosti GFRP výztuže s betonem byly použity kompozitní výztuže GFRP vyrobené ze skleněných E-CR vláken a matrice z epoxidové pryskyřice. Poměr vlákno:matrice je 80:20. Výztuž je při výrobě ovinuta nylonovým vláskem a opískována křemičitým pískem. Průměr testovaných výztuží byl 14 mm. Byly zkoumány 2 typy výztuží, pro experimenty byly již při výrobě barevně odlišeny – matrice byla probarvena šedým práškovým pigmentem.

Sledování soudržnosti výztuže s betonem bylo provedeno zkouškou cyklického zatěžování betonových nosníků se zabetonovanou GFRP výztuží.

Dále bylo provedeno sledování pórové struktury GFRP výztuží. Oba typy výztuží měly stejné složení, teoreticky tedy obsahovaly stejné množství výztužné fáze. Přesto byl zjištěn při experimentálním ověřování pevnosti GFRP výztuží v tahu rozdíl mezi těmito dvěma sledovanými sériemi výztuží. Proto byla sledována pórová struktura GFRP výztuží za účelem zjištění obsahu pórů v kompozitu. Rozdílná pórovitost by mohla být příčinou rozdílných pevností kompozitních výztuží v tahu. Sledování pórové struktury GFRP výztuží bylo provedeno pomocí rtuťové porozimetrie a pomocí plynové adsorpční analýzy BET.

Byl sledován vliv působení vysokých teplot na GFRP výztuž. Zatěžování bylo provedeno v peci s elektrickým vytápěním s nárůstem 10 °C za min. Působení teploty bylo po dobu 30 minut.

Byla provedena fotodokumentace zkoušek a byla sledována struktura GFRP kompozitních výztuží po provedených zkouškách pomocí optického mikroskopu.

8. Sledování pórové struktury GFRP výztuží

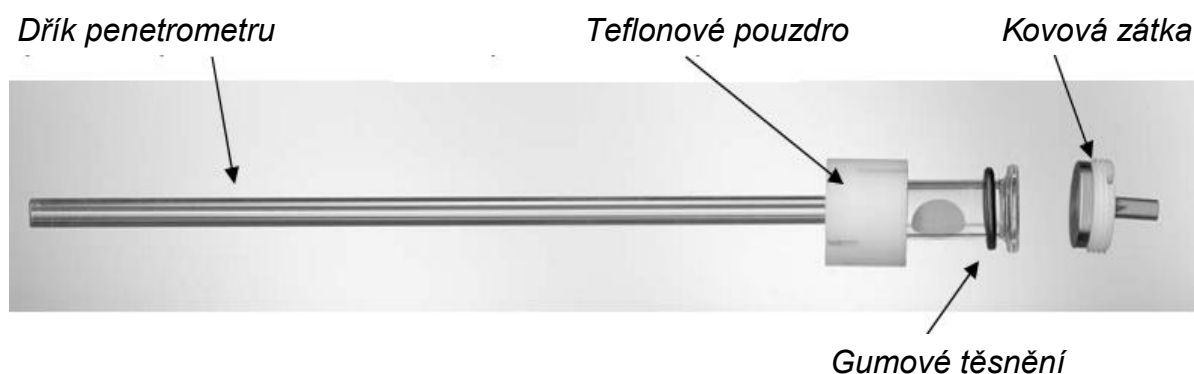
8.1. Porozimetrie GFRP výztuží

Pro stanovení obsahu a rozložení pórů v kompozitní GFRP výztuži byla použita metoda rtuťové porozimetrie. Metoda rtuťové porozimetrie je jednou z nejužitečnějších metod kvantitativního zkoumání porézní struktury pevných vzorků. Metoda je založena na zvyšování tlaku nesmáčivé intruzní kapaliny a postupném zaplňování pórů od největších po nejmenší. Výsledný obsah pórů je roven rozdílu mezi původním objemem rtuti a objemem rtuti po provedení zkoušky. Metoda poskytuje informace o velikosti pórů (distribuci objemu), objemové hustotě a specifickém povrchu většiny porézních pevných látek. Cílem této zkoušky bylo zjistit procentuální zastoupení různých velikostí pórů ve struktuře dvou typů GFRP výztuže. Vzorky byly barevně odlišeny – označení GFRP červená a GFRP šedá. Naměřená data jsou uvedena v příloze 1.

K měření byl použit rtuťový porozimetr Pascal 240 Series od firmy Thermo Scientific. Tento porozimetr je složen ze tří částí, které se liší úkolem a zamýšleným rozsahem velikosti pórů. Pascal 140 připravuje vzorek pro analýzu a provádí nízkotlakovou porozimetrii z vakua do 400 kPa (4 μ m velkých pórů). Model Pascal 240 pracuje do maximálního tlaku 200 MPa, což umožňuje průnik rtuti až do oblasti mezopórů. Model Pascal 440 dosáhne tlaku až 400 MPa, což umožňuje měření do oblasti mikropórů. Nejmenší stanovitelné póry jsou velikosti 3 nm, tato metoda tedy umožňuje stanovení celé distribuce makro i mezopórů. I přes takto vysoké tlaky však některé materiály zůstávají neporušené. Nicméně v některých případech lze získat přesnější informace o struktuře materiálu jeho rozkladem.

Zkoušený vzorek se vloží do penetrometru. K zásobníku s penetrometrem je připojen skleněný kapilární dířek, který slouží jako zásobník rtuti během analýzy. Po odstranění vázané vlhkosti ze vzorku se zásobník kapilárou zaplní po okraj

rtutí tak, aby se z penetrometru vytěsnil veškerý vzduch. Změří se počáteční objem vzorku při nejnižším dosaženém tlaku. Následně je vyvíjen a postupně zvyšován tlak a měřen pokles hladiny rtuti. Tlak na rtuť v kapiláře se vyvíjí plynem (vzduchem) či kapalinou s menší hustotou, než je hustota rtuti. Při nízkotlakém měření je zapotřebí použití externí vakuové pumpy. Skleněný dřík se chová jako elektrický izolant, rtuť uvnitř je elektrický vodič a kov na povrchu kapiláry je také elektrický vodič. Kombinace dvou elektrických vodičů oddělených elektrickým izolátorem vytváří kondenzátor s jedinou proměnnou v podobě rtuti vnikající do vzorku či zpátky do kapiláry při snížení vyvíjeného tlaku. Hodnota kapacity dříku je monitorována kapacitním detektorem, který vytváří elektrický signál. Měření kapacity se se znalostí průměru kapiláry přeměňuje na objemové měření. Objem rtuti potřebný pro vyplnění všech přístupných pórů je roven celkovému objemu pórů. [16][17]



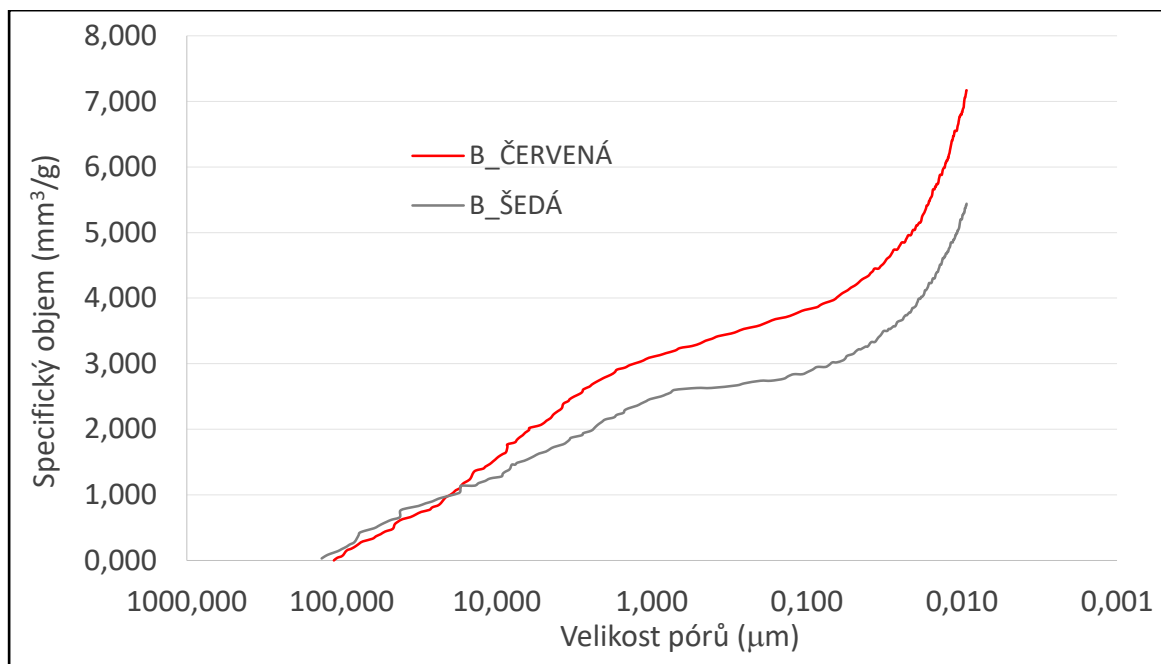
Obr. 25 - Penetrometr [16]

Tab. 2 - Výsledky rtuťové porozimetre vzorků GRFP výztuží

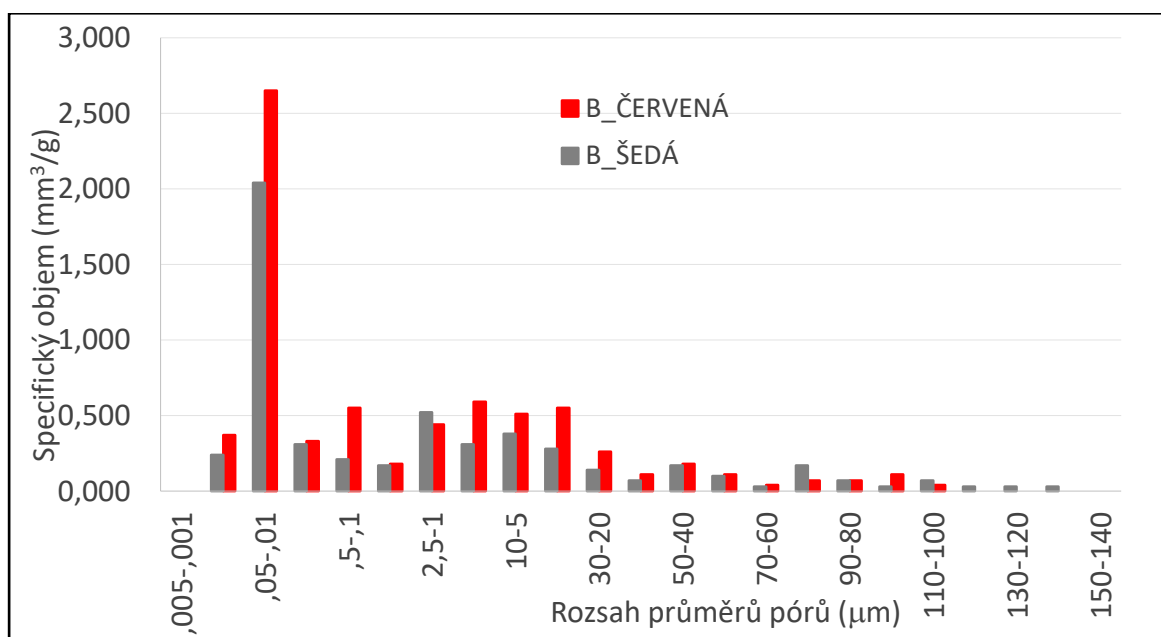
Výsledky porozimetre	GFRP červená	GFRP šedá
Celkový kumulativní objem [$\frac{mm^3}{g}$]	7,1707	5,441
Celkový specifický povrch [$\frac{m^2}{g}$]	0,831	0,622
Průměrný průměr pórů [μ]	0,012383	0,01028
Celková porozita [%]	1,4852	1,1611
Sypná hustota [$\frac{g}{cm^3}$]	2,07127	2,13403
Zdánlivá hustota [$\frac{g}{cm^3}$]	2,1025	2,1591

Tab. 3 - Distribuce velikosti pórů vzorků GFRP výztuže

DISTRIBUCE VELIKOSTI PÓRŮ GFRP červená				DISTRIBUCE VELIKOSTI PÓRŮ GFRP šedá			
Rozsah průměrů pórů	Specifický objem	Relativní objem	Relativní objem	Rozsah průměrů pórů	Specifický objem	Relativní objem	Relativní objem
(μm)	(mm^3/g)	(mm^3/g)	(%)	(μm)	(mm^3/g)	(mm^3/g)	(%)
150-140	0,000	0,000	0,000	150-140	0,000	0,000	0,000
140-130	0,000	0,000	0,000	140-130	0,030	0,030	0,640
130-120	0,000	0,000	0,000	130-120	0,070	0,030	0,640
120-110	0,000	0,000	0,000	120-110	0,100	0,030	0,640
110-100	0,040	0,040	0,510	110-100	0,170	0,070	1,270
100-90	0,150	0,110	1,540	100-90	0,210	0,030	0,640
90-80	0,220	0,070	1,030	90-80	0,280	0,070	1,270
80-70	0,290	0,070	1,030	80-70	0,450	0,170	3,180
70-60	0,330	0,040	0,510	70-60	0,490	0,030	0,640
60-50	0,440	0,110	1,540	60-50	0,590	0,100	1,910
50-40	0,630	0,180	2,560	50-40	0,760	0,170	3,180
40-30	0,740	0,110	1,540	40-30	0,830	0,070	1,270
30-20	0,990	0,260	3,590	30-20	0,970	0,140	2,550
20-10	1,540	0,550	7,690	20-10	1,250	0,280	5,100
10-5	2,060	0,510	7,180	10-5	1,630	0,380	7,010
5-2,5	2,650	0,590	8,210	5-2,5	1,940	0,310	5,730
2,5-1	3,090	0,440	6,150	2,5-1	2,460	0,520	9,550
1-0,5	3,270	0,180	2,560	1-0,5	2,630	0,170	3,180
0,5-0,1	3,820	0,550	7,690	0,5-0,1	2,840	0,210	3,820
0,1-0,05	4,160	0,330	4,620	0,1-0,05	3,150	0,310	5,730
0,05-0,01	6,800	2,650	36,920	0,05-0,01	5,200	2,040	37,580
0,01-0,005	7,170	0,370	5,130	0,01-0,005	5,440	0,240	4,460
0,005-0,001	7,170	0,000	0,000	0,005-0,001	5,440	0,000	0,000



A)



B)

Obr. 26 - A) Graf znázornění objemového zastoupení jednotlivých velikostí pórů

B) Graf znázornění objemového zastoupení stanovených rozsahů pórů

Sledované GFRP výztuže měly odlišné pevnosti v tahu. Pevnost v tahu výztuže GFRP šedá byla 750 MPa, pevnost v tahu výztuže GFRP červená byla 870 MPa. Obě série výztuží byly vyrobeny stejným způsobem, zastoupení vláken a matrice bylo dle receptury shodné. Navzdory předpokladům, že by šedá GFRP výztuž mohla mít nižší tahové pevnosti z důvodu vyššího objemu pórů, byl stanoven naopak vyšší objem pórů u GRFP červené výztuže.

Červená GFRP výztuž má vyšší kumulativní objem pórů a jejich celkový specifický povrch. Celková porozita 1,4852 % ani kumulativní objem $7,1707 \frac{mm^3}{g}$ neměly vliv na mechanické vlastnosti výztuže. Šedá GRFP výztuž má celkovou porozitu 1,1611 % a kumulativní objem $5,441 \frac{mm^3}{g}$. Největší specifický objem u obou zkoumaných výztuží mají póry velikostního rozmezí 0,1-0,5 μm . Tyto póry se mohou v epoxidové matrici vyskytovat z procesu smáčení skleněné výztuže pryskyřicí. Epoxidová pryskyřice má vysokou hustotu ($1,9 \frac{kg}{dm^3}$) a tak póry, které jsou navázány k výztužným skelným vláknům, jsou při smáčení vláken jen obtížně z matrice vypuzovány.

8.2. Sledování obsahu pórů pomocí plynové adsorpční analýzy BET

Jako další doplňují metoda pro stanovení obsahu pórů v GFRP výztuží byla použita metoda plynové analýzy BET. Stanovení bylo provedeno přístrojem Nova 3200e pro plynovou adsorpční analýzu BET. Přístroj slouží ke zjišťování vlastností porézních a práškových materiálů. Přístroj umožňuje stanovení měrného povrchu, velikosti pórů a adsorpčních a desorpčních křivek. Vzorky GFRP byly pro toto stanovení rozrušeny na velikost částic cca 1 mm. Výsledky získané pomocí plynové analýzy BET ale neměly vypovídající hodnotu. Metoda BET se ukázala v tomto případě pro stanovení pórů ve vzorcích GFRP jako nevhodná.

9. Ověřování soudržnosti GRFP výztuží s betonem – cyklické zatěžování nosníků s GFRP výztuží

Pro ověření soudržnosti GFRP výztuže s betonem byla vyrobena betonová zkušební tělesa, kde ve středu těles byla umístěna kompozitní GRPF výztuž. Byly stanoveny vlastnosti betonu a vlastnosti použité GFRP výztuže.

9.1. Příprava zkušebních vzorků

Tab. 4 - Receptura betonu pro zkoušky soudržnosti GRFP výztuže a betonu

Složka	Množství na 1 m ³ [kg]
Hrubé drcené kamenivo 4-8, Želešice	800
Hrubé drcené kamenivo 8-11, Želešice	800
Jemné drcené kamenivo 0-4, Hrušovany	1090
Cement CEM I 42,5 R Mokrá	400
Voda z vodovodního řadu	150
Plastifikační přísada Addiment FM 350	4

9.2. Vlastnosti použitých materiálů

Hrubé drcené kamenivo Želešice je anorganický přírodní materiál těžený v lomu a drcený čelistovými a kulovými mlýny. Horninou je amfibolit z východní části metabazitové zóny brněnského masivu relativní hustoty $2900 \frac{kg}{m^3}$. Hornina je slabě metamorfovaná z bazických efuziv. Je zelenošedé barvy místy s hedvábným leskem a s rovnoběžnou vláknitou strukturou. Typickým produktem nacházejícím se v amfibolitu je sloupečkovitý černý amfibol.

Jemné drcené kamenivo Hrušovany je také anorganický přírodní materiál získaným těžbou a následným drcením či mletím. Kamenivo se těží v pískovně v Hrušovanech u Brna a třídí se zde na dvou třídících linkách POWERSCREEN a to na typu COMMANDER 408 a CHIEFTAIN 1400. Hornina je relativní hustoty $2550 \frac{kg}{m^3}$.

Na místo určení je kamenivo dopravováno nákladními automobily, vagony či loděmi. Prostory jsou zbavené veškerých nečistot a cizorodého materiálu a

jsou zabezpečené proti znečištění během přepravy, mísení či dalšímu drcení frakcí, nebo k segregaci zrn.

Cement CEM I 42,5 R, Mokrý patří k hydraulickým pojivům obsahujícím portlandský jemně mletý slínek s rychlým a vysokým vývinem hydratačního tepla. Pevnost v tlaku po smísení s vodou je po 7 dnech (53 ± 2) MPa a po 28 dnech (60 ± 3) MPa. Cement je balený do pytlů s polyetylenovou vložkou po 25 kg. Počátek tuhnutí cementu bez přísad se pohybuje kolem 184 min a konec tuhnutí kolem 241 min. Měrná hmotnost cementu z Mokrý je $3110 \frac{kg}{m^3}$. Cement musí být skladován tak, aby nepřišel do kontaktu s vodou či vysokou relativní vlhkostí a to po dobu maximálně 90 dnů.

Plastifikační přísada Addiment FM 350 je přísada redukující potřebnou vodu pro dosažení požadované konzistence betonové směsi, zlepšující zpracovatelnost směsi při zachování množství vody a ovlivňující počáteční i konečné pevnosti betonu. Plastifikačního efektu je docíleno povrchovou aktivitou plastifikátoru, který se ve vodném roztoku adsorbuje na tuhé částice cementu. Jsou složeny z molekul s dlouhými řetězci zakončenými silně polární skupinou, které vytváří na povrchu zrn elektrickou dvojvrstvu zabezpečující odpuzování zrn cementu. Plastifikační přísada SIKAFLEX FM 350 je na bázi modifikovaného lignosulfonátu a neobsahuje žádné látky, které by se za běžných či předvídatelných podmínek uvolňovaly do okolního prostředí. Doporučuje se dávkování 0,2 - 0,9 % z hmotnosti cementu a redukuje záměsovou vodu o 5 – 10 %.

9.3. Postup výroby zkušebních vzorků

Míchání betonu probíhalo v laboratorní míchačce s nuceným oběhem. Hrubé kamenivo a cement byly nasypány do míchacího zařízení a smíseny. Bez vypínání míchacího zařízení byla postupně přidávána voda a s posledním zbytkem vody i plastifikační přísada.

Konzistence betonu stanovená metodou sednutí kužele byla S5.



Obr. 27 - Čerstvý beton pro výrobu nosníků

Vzorky kompozitní výztuže byly zabetonovány do nosníků rozměrů 150 x 240 x 600 mm. Výztuž procházela ve spodní části nosníků. Zkušební těleso pro zkoušku cyklického zatěžování sestávalo ze dvou nosníků rozměrů 150 x 240 x 600 mm spojených prutovou kompozitní GFRP výztuží.

Dále byly vyrobeny vzorky pro stanovení pevnosti betonu v tlaku a pro stanovení pevnosti betonu v tahu ohybem.



Obr. 28 - Nosníky se zabetonovanou GFRP kompozitní výztuží

Po 28 dnech byly provedeny zkoušky pevnosti betonu v tlaku na krychlích o hraně 150 mm a byly provedeny zkoušky zatěžování nosníků 150 x 240 x 600 mm s GRFP výztuží. Nosníky byly zatěžovány v lisu nejprve rovnoměrně se zvyšujícím tlakem až do maximální síly při porušení nosníku. Po zjištění průměrné maximální síly v porušení byly 4 nosníky s výztuží vystaveny cyklickému zatížení. Zatěžování probíhalo od 5% do 50% průměrné maximální síly v porušení tahem za ohybu.

9.4. Vlastnosti betonu pro výrobu nosníků s GRFP výztuží

Po namíchání betonové směsi byla stanovena konzistence čerstvého betonu metodou sednutí kužele. Zkouška byla provedena dle ČSN EN 12350 – 2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím.

Podstatou zkoušky je naplnění Abramsova kužele čerstvým betonem ve 3 vrstvách. Každá vrstva je zhutněna 25 vpichy propichovací tyčí. Následně se kužel zvedne kolmo k podložce a změří se vzdálenost, o kterou poklesl betonový kužel oproti výšce komolého zkušební kužele. Dle této vzdálenosti se betonová směs zařadí do třídy konzistence dle tabulky 5.

Tab. 5 - Třídy konzistence u zkoušky sednutím

třída konzistence	sednutí kužele [mm]
S1	10 – 40
S2	50 – 90
S3	100 – 150
S4	160 – 210
S5	≥ 220

Konzistence čerstvého zkoušeného betonu byla S5.

Bylo provedeno stanovení pevnosti betonu v tlaku podle ČSN EN 12390–5 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

Zkušební tělesa o hraně 150 mm byla umístěna do lisu kolmo na směr ukládání betonu a rovnoměrně zatěžováno do porušení. Následně byla vypočtena pevnost betonu v tlaku dle vzorce

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kde

f_c ... pevnost v tlaku [MPa]

F ... maximální zatížení při porušení [N]

A_c ... průřezová plocha zkušební vzorku [mm²]

Výsledná pevnost v tlaku byla stanovena aritmetickým průměrem ze 3 hodnot s přesností na 0,1 MPa.

Pevnost betonu v tlaku po 28 dnech byla 34,1 MPa.

Dále byla stanovena objemová hmotnost ztvrdlého betonu dle ČSN EN 12390-7 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

Zkušební těleso se zváží s přesností na 0,1 % hmotnosti tělesa a určí se objem vypočtením ze změřených skutečných rozměrů. Objemová hmotnost je pak vypočtena ze vzorce

$$D_{zB} = \frac{m}{V}$$

kde

D_{zB} ... Objemová hmotnost ztvrdlého betonu [$\frac{kg}{m^3}$]

m ... hmotnost zkušební tělesa [Kg]

V ... objem vzorku [m³]

Objemová hmotnost ztvrdlého betonu se zaokrouhlí na nejbližších vyšších 10 $\frac{kg}{m^3}$. Výsledná objemová hmotnost ztvrdlého betonu po 28 dnech byla vypočtena ze 4 vzorků a byla 2290 $\frac{kg}{m^3}$.

9.5. Cyklické zatěžování betonových nosníků s GFRP výztuží

Zkouška cyklického zatěžování byla provedena na betonových nosnících vyztužených GFRP kompozitní výztuží. Dva betonové nosníky rozměru 150 x 240 x 600 mm byly vyztuženy GFRP výztuží, která procházela ve spodní části průřezu nosníku. Nosníky byly uloženy na podpory a vystaveny postupnému

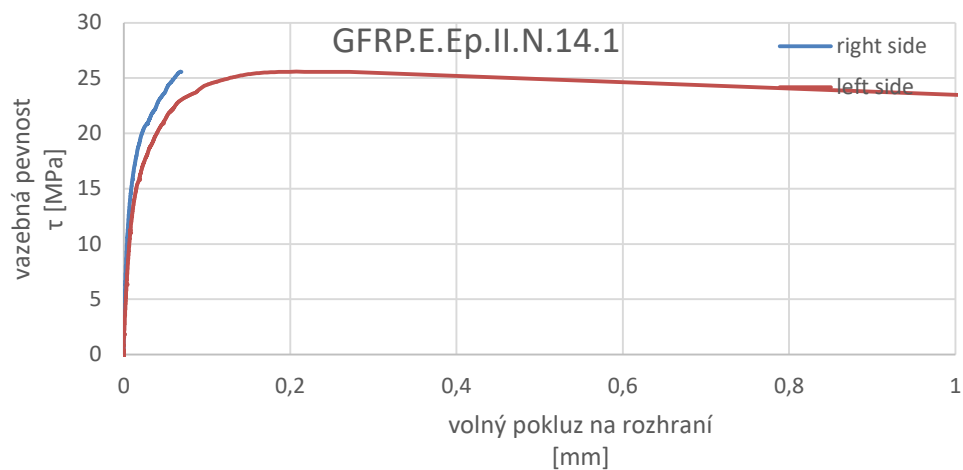
zatěžování silou od 5 % do 50 % maximálního únosného zatížení a znovu odlehčeny na 5 %. Takto byl nosník zatěžován a odlehčován až do porušení. Výsledná pevnost cyklického zatěžování je odečtena z grafu.



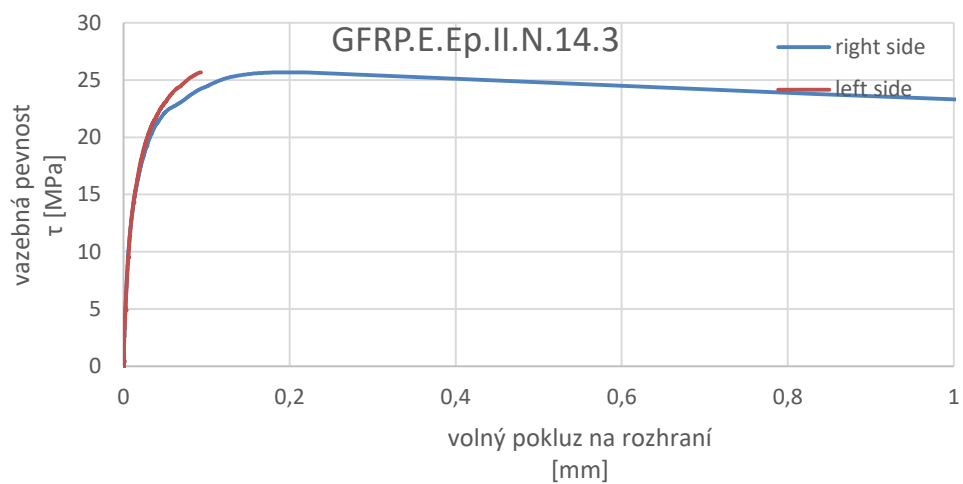
Obr. 29 - Upevnění nosníku do zařízení pro zkoušku cyklickým zatěžováním



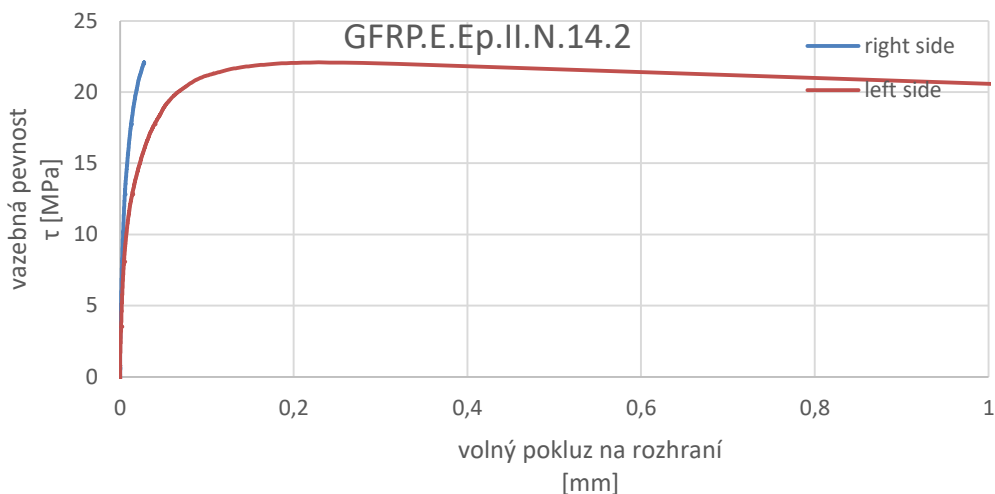
Obr. 30 - Porušení nosníku s GFRP kompozitní výztuží po zkoušce cyklickým zatěžováním



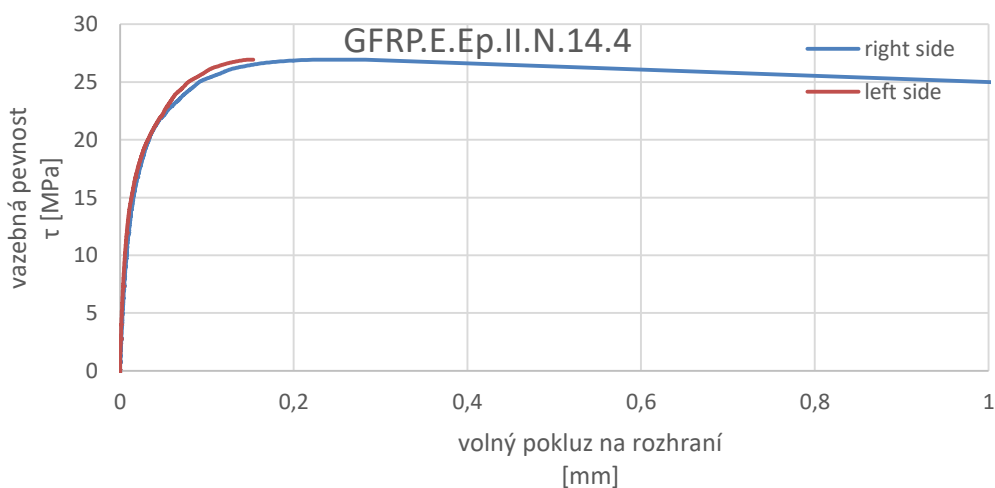
Obr. 31 - Graf pevnosti v tahu za ohybu s volným pokluzem prvního zatěžovaného vzorku



Obr. 32 - Graf pevnosti v tahu za ohybu s volným pokluzem druhého zatěžovaného vzorku



Obr. 33 - Graf pevnosti v tahu za ohybu s volným pokluzem třetího zatěžovaného vzorku



Obr. 34 - Graf pevnosti v tahu za ohybu s volným pokluzem čtvrtého zatěžovaného vzorku

Z grafů na výše uvedených obrázcích je patrné, že pevnosti v tahu za ohybu betonových nosníků jsou nesouměrné. To je způsobeno pravděpodobně z důvodu nevhodného způsobu betonáže. Z přiložených fotografií jsou patrné kaverny a vzduchové póry v matici ztvrdlého betonu. Tyto nehomogenity mohly zapříčinit rozdíly ve výsledcích tahové zkoušky. Ze stejného důvodu může být i viditelný rozdíl ve třetím grafu volného pokluzu, kde je výsledná vazebná pevnost kompozitní GFRP výztuže s nosníkem zhruba o 3 MPa nižší než u zbývajících třech nosníků. Vyloučením nevhodného vzorku můžeme

z grafu vyčíst průměrnou únosnost v cyklickém zatěžování (jinak známou jako dynamická pevnost) 26 MPa s poklesem na 1 mm pokluzu zhruba o 2 MPa.

Nosník se po cyklickém zatěžování ve většině případů porušil ve výztuži v místě uvnitř bloku, ale mimo spoj výztuže s betonem, jak je patrné z obrázků č. 35 a 36



Obr. 35 - Detail porušení FRP kompozitní výztuže v betonovém bloku po zkoušce cyklickým zatěžováním – porušení výztuže



Obr. 36 - Způsob porušení FRP kompozitní výztuže v betonovém bloku po zkoušce cyklickým zatěžováním – vytažení výztuže

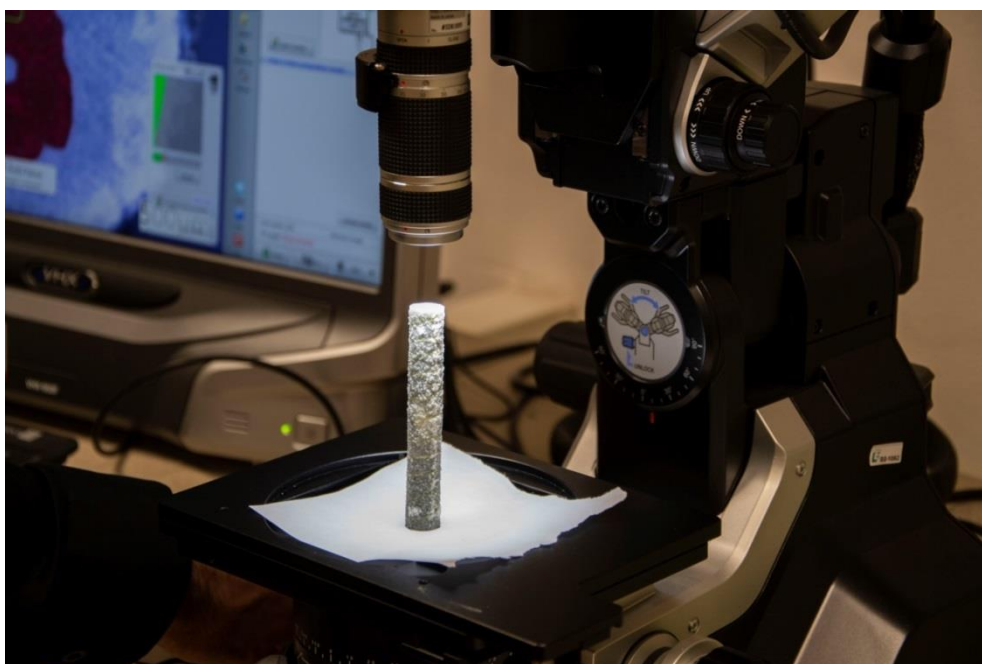


Obr. 37 - Trhlina v betonovém nosníku v blízkosti GFRP výztuže po zkoušce cyklickým zatěžováním

10. Sledování struktury GFRP kompozitních výztuží

Sledování struktury GFRP kompozitních výztuží bylo provedeno na vzorcích výztuže po cyklickém zatěžování a na vzorcích výztuže po vystavení působení vysokých teplot.

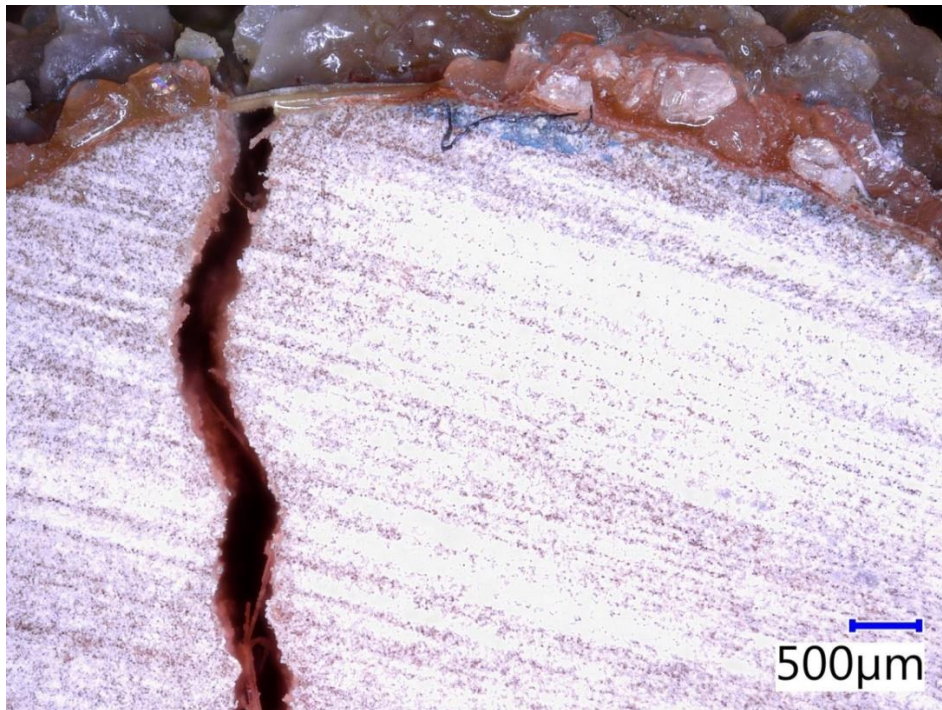
GFRP výztuže byly šetrně rozřezány na vzorky o maximální délce 8 cm. Sledování bylo provedeno optickým mikroskopem Keyence VHX-950F. Tento mikroskop umožňuje pořízení 3D snímků a nahrávání videa v reálném čase. Mikroskop Keyence umožňuje zvětšení 20-200x.



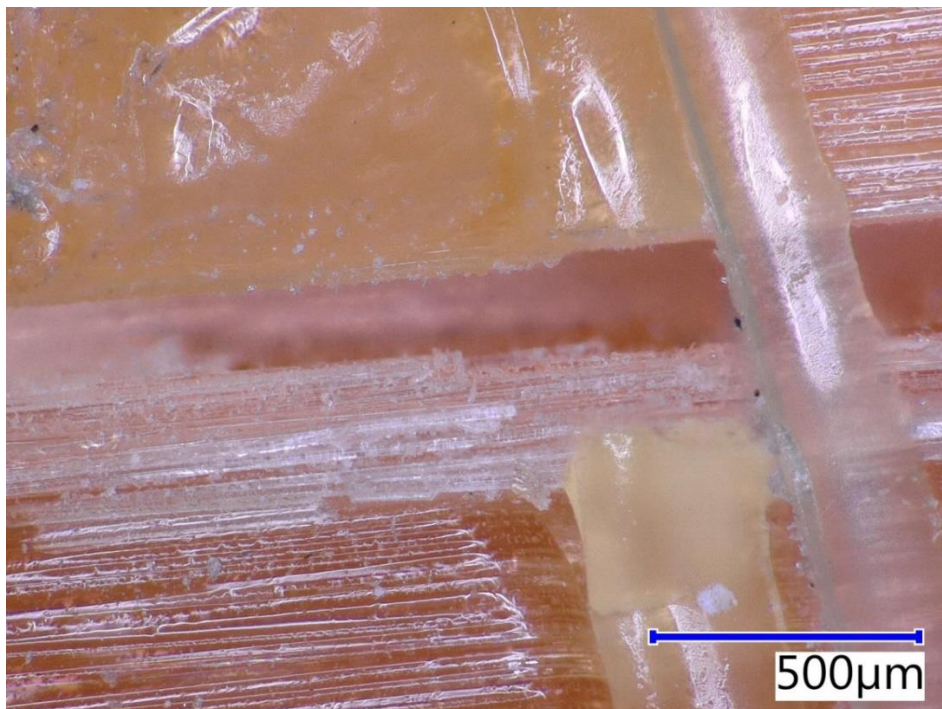
Obr. 38 - Umístění vzorku GFRP výztuže při sledování optickým mikroskopem Keyence VHX-950F

10.1. Sledování struktury GFRP výztuží po zkoušce cyklického zatěžování betonových nosníků

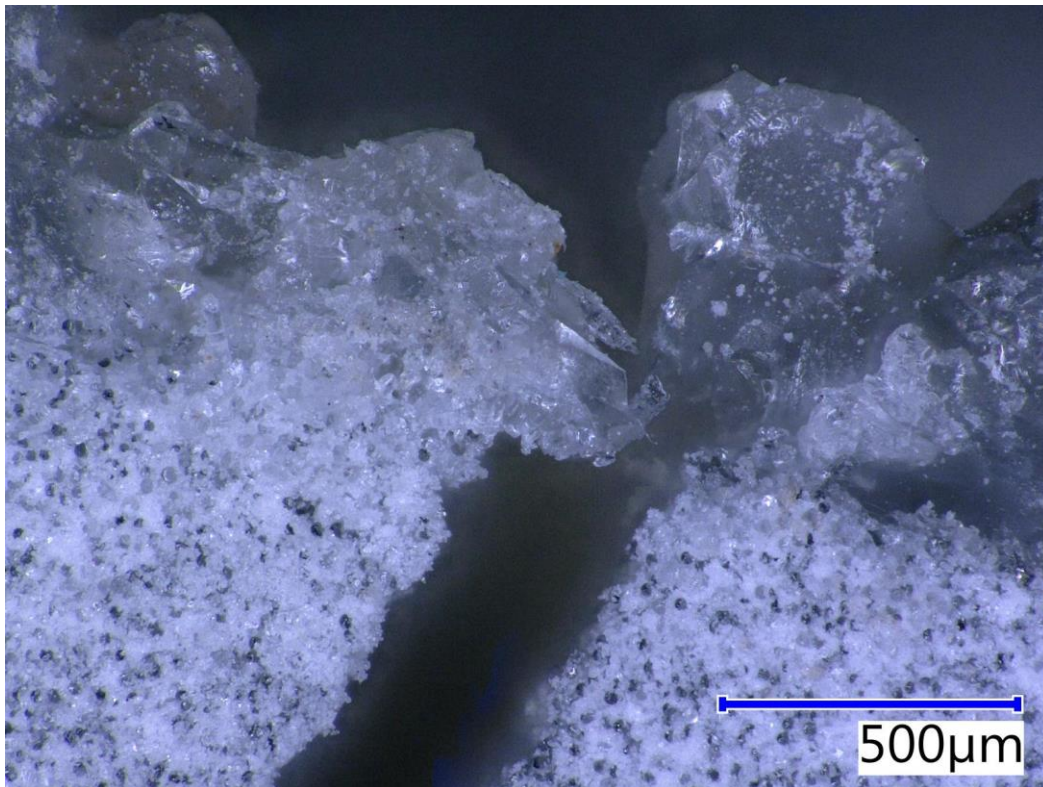
10.1.1. GFRP výztuž po cyklickém zatěžování



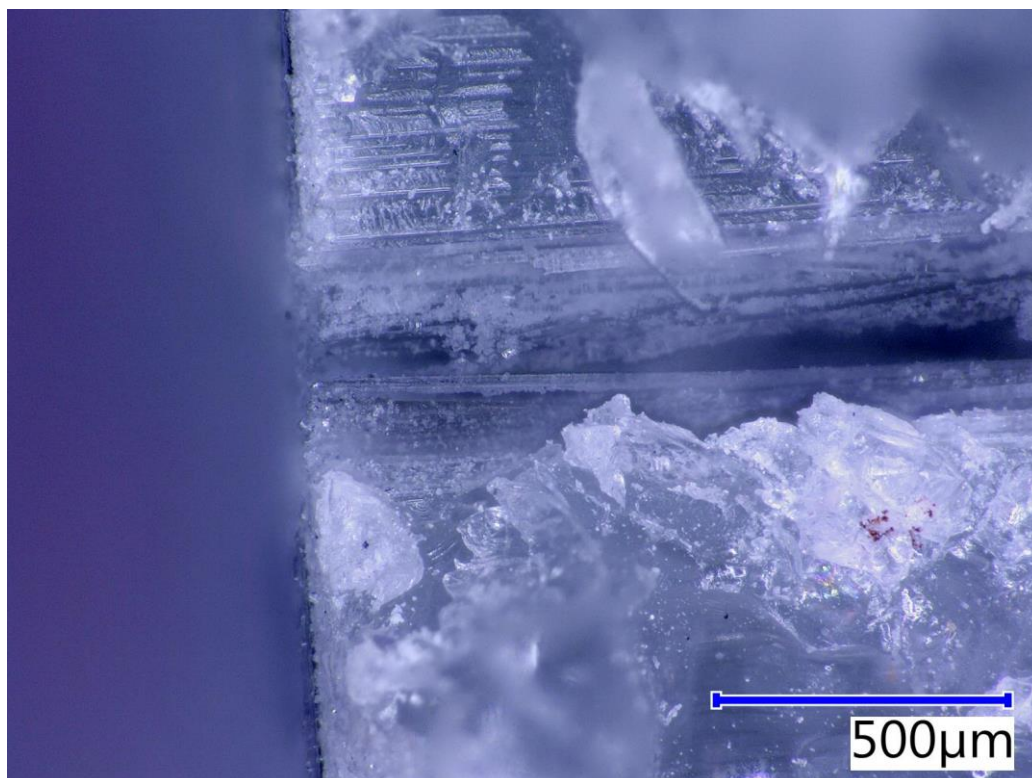
Obr. 39 - Trhlina v GFRP výztuži, skleněná vlákna v trhlíně výztuže



Obr. 40 - Skleněná vlákna v GFRP výztuži, opískování křemičitým pískem po obvodu výztuže, ovinutí nilonovým vlascem napříč trhlinou



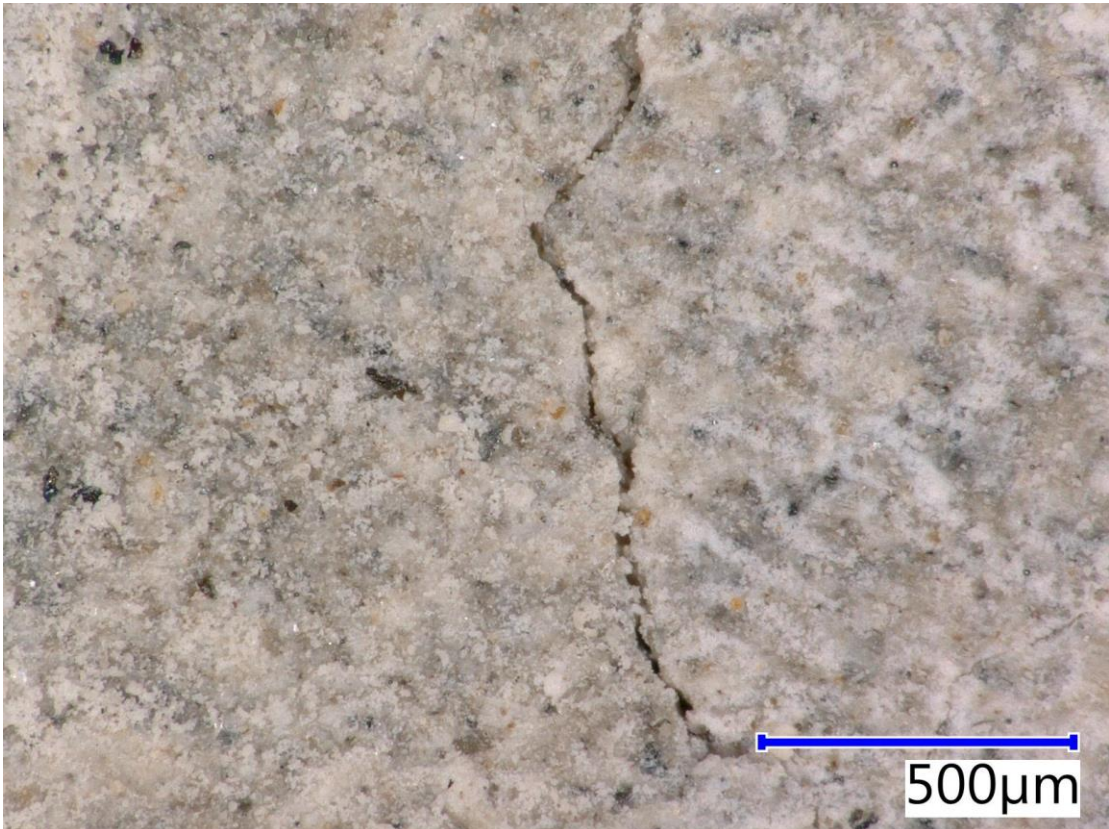
Obr. 41 - GFRP výztuž, skleněná vlákna a opískování křemičitým pískem po obvodu výztuže, trhlina na průřezu výztuže



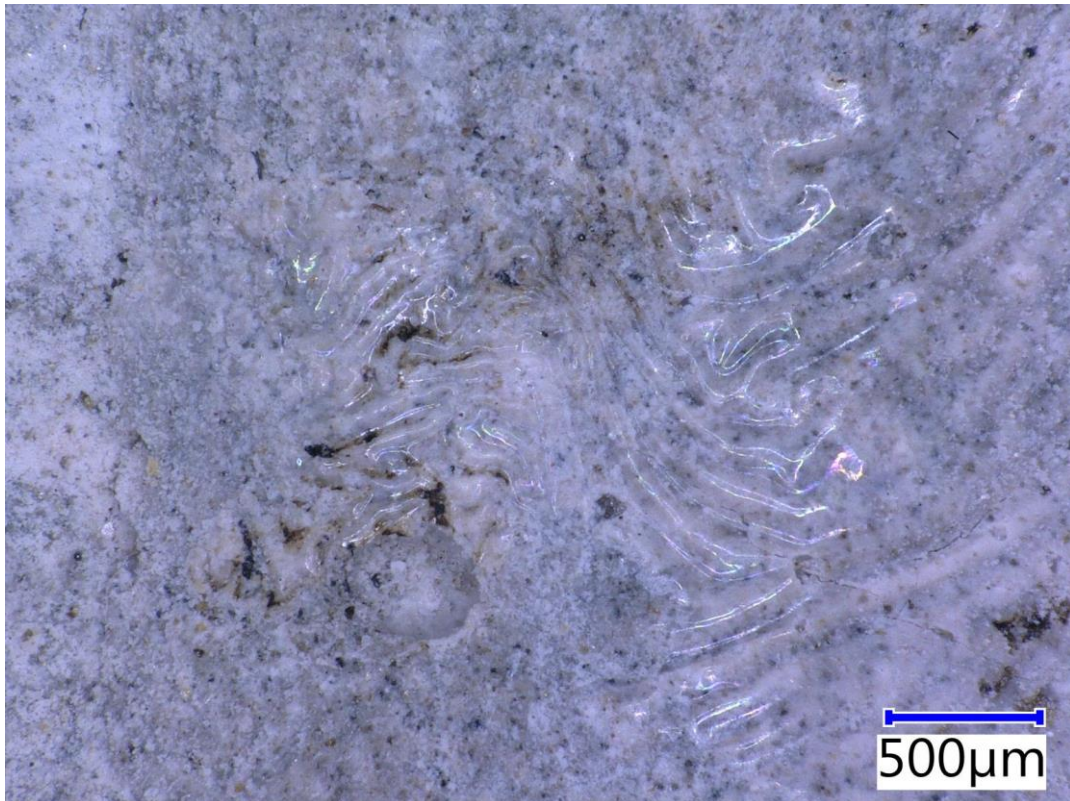
Obr. 42 - GFRP výztuž, skleněná vlákna a opískování křemičitým pískem, trhlina podílně se směrem vláken

10.2. Sledování kontaktní zóny beton – GFRP výztuž

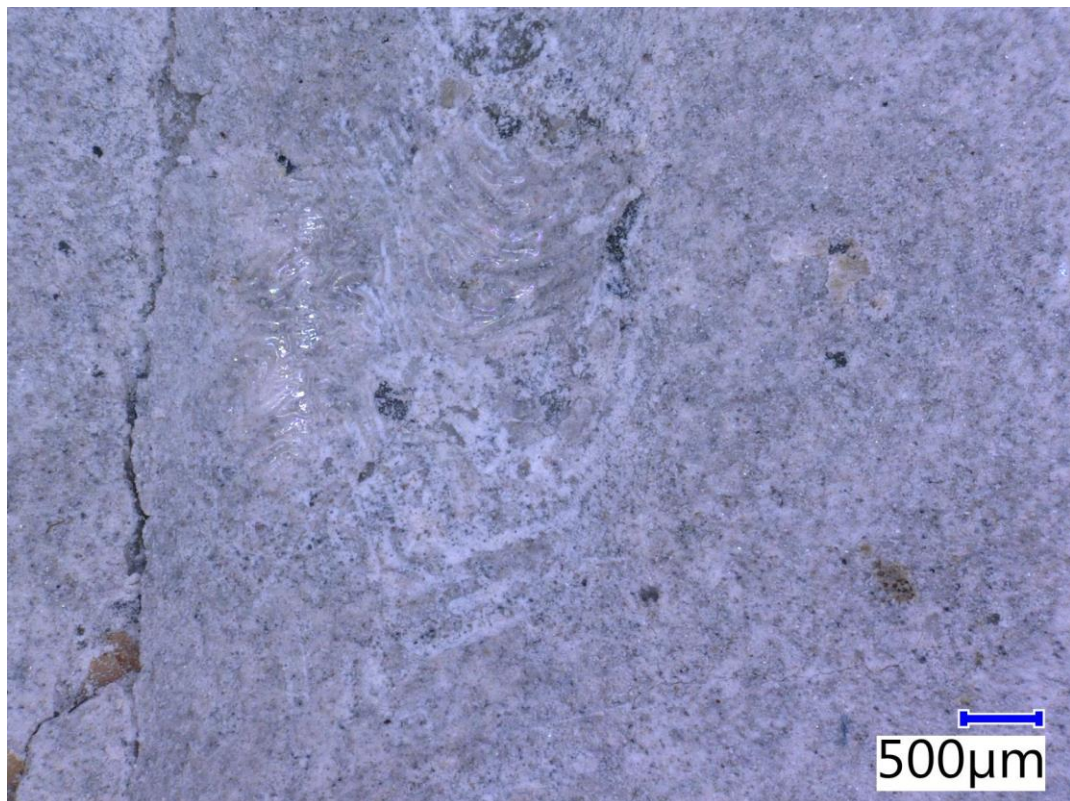
10.2.1. Betonový nosník po zkoušce cyklického zatěžování



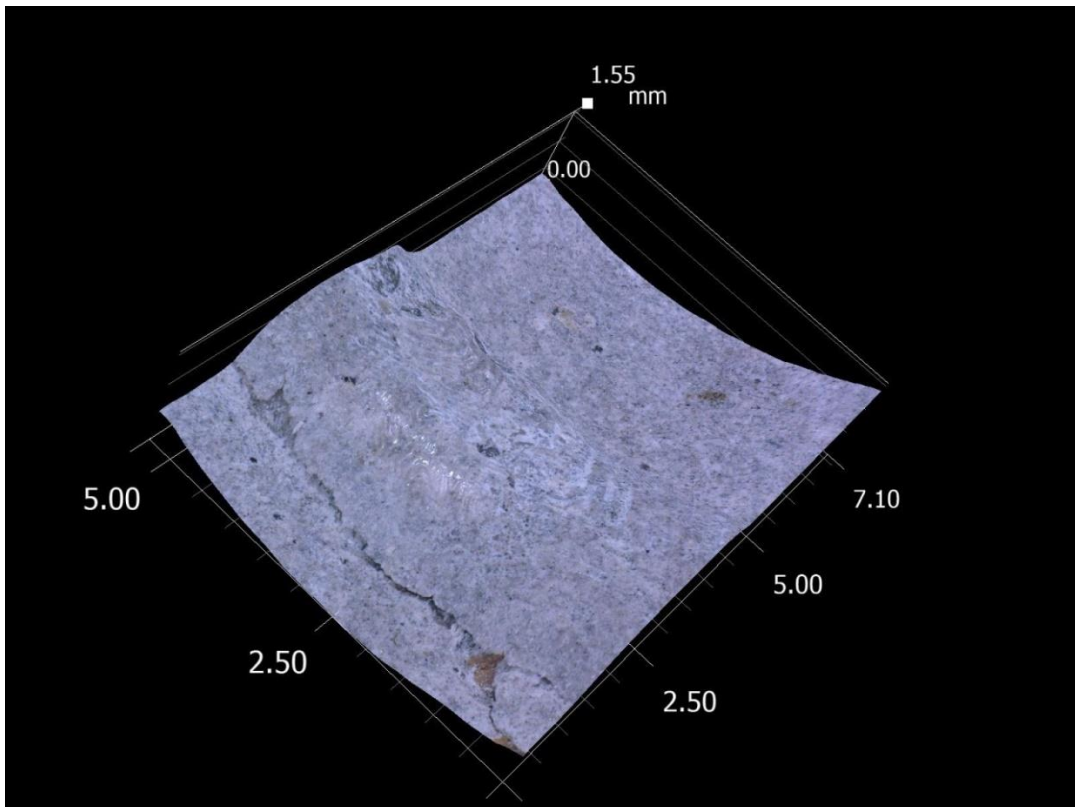
Obr. 43 - Otisk GFRP výztuže v betonu, trhlina na otisku GFRP výztuže v betonovém bloku



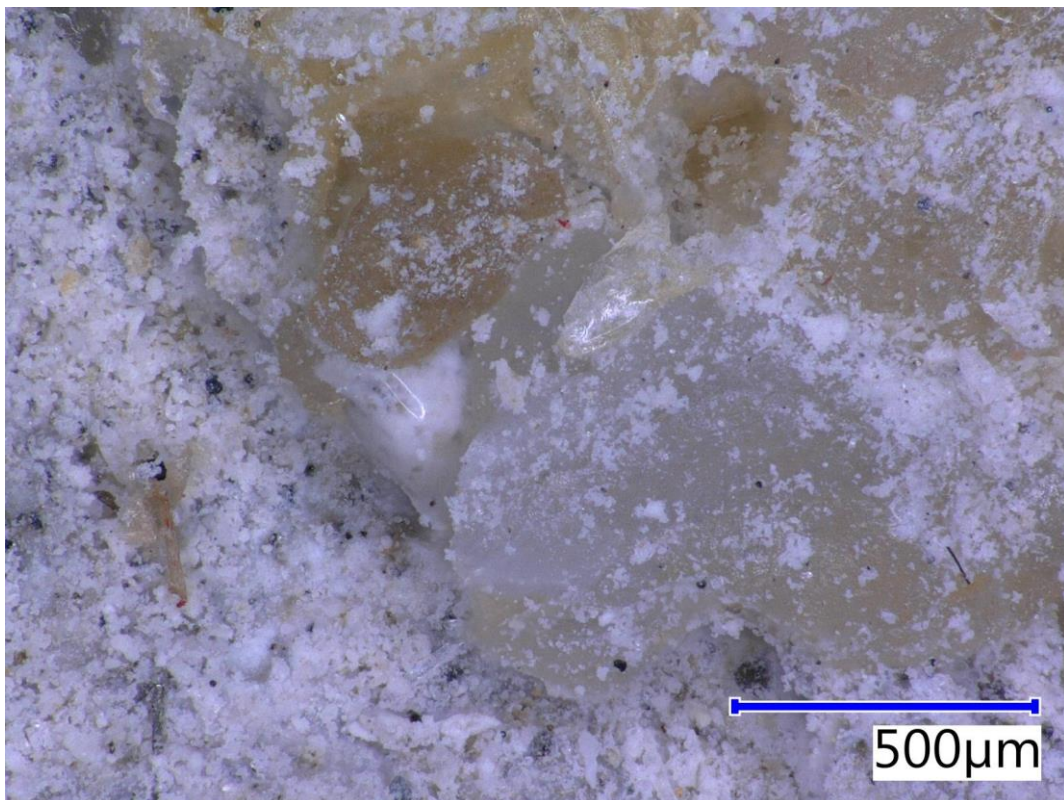
Obr. 44 - Detail betonového nosníku po cyklickém zatěžování, stopy pryskyřice na otisku GFRP kompozitní výztuže v betonovém bloku



Obr. 45 - Detail betonového nosníku po cyklickém zatěžování, trhлина na rozhraní otisku žebra GFRP kompozitní výztuže v betonovém bloku



Obr. 46 - 3D pohled na trhlinu na rozhraní otisku žebra GFRP kompozitní výztuže v betonovém bloku



Obr. 47 - Zbytek křemičitého písku na otisku žebra GFRP kompozitní výztuže v betonovém bloku

10.2.2. GFRP výztuž s betonem po zkoušce cyklického zatěžování



Obr. 48 - Beton na GFRP kompozitní výztuži po zkoušce cyklického namáhání



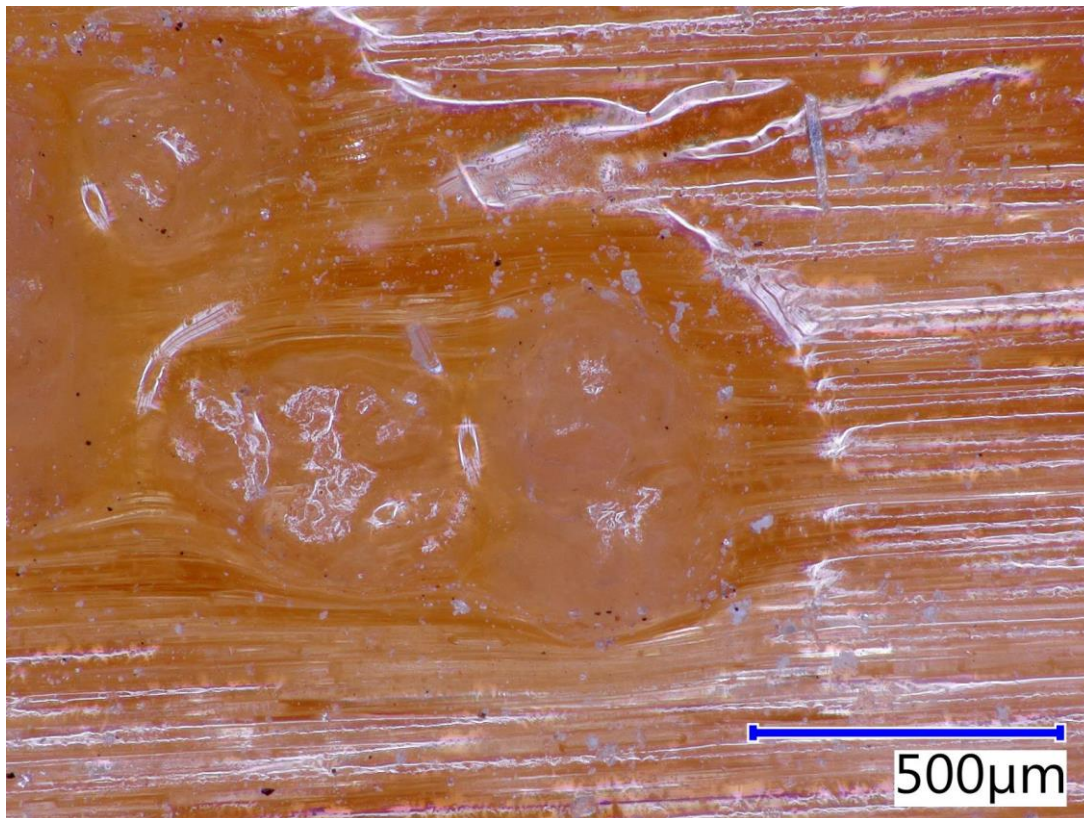
Obr. 49 - 3D pohled na GFRP kompozitní výztuž s betonem

Snímky z optického mikroskopu umožňují sledovat detaily porušení výztuže. Na snímcích je patrné, že i po provedení zkoušky cyklického zatěžování zůstává na GFRP kompozitní výztuži opískování. Na snímcích lze sledovat dobrou soudržnost GFRP výztuže a betonu, beton zůstává na části GFRP výztuže i po provedení mechanického namáhání, nebylo patrné oddělení vrstev nebo delaminace GFRP výztuže.

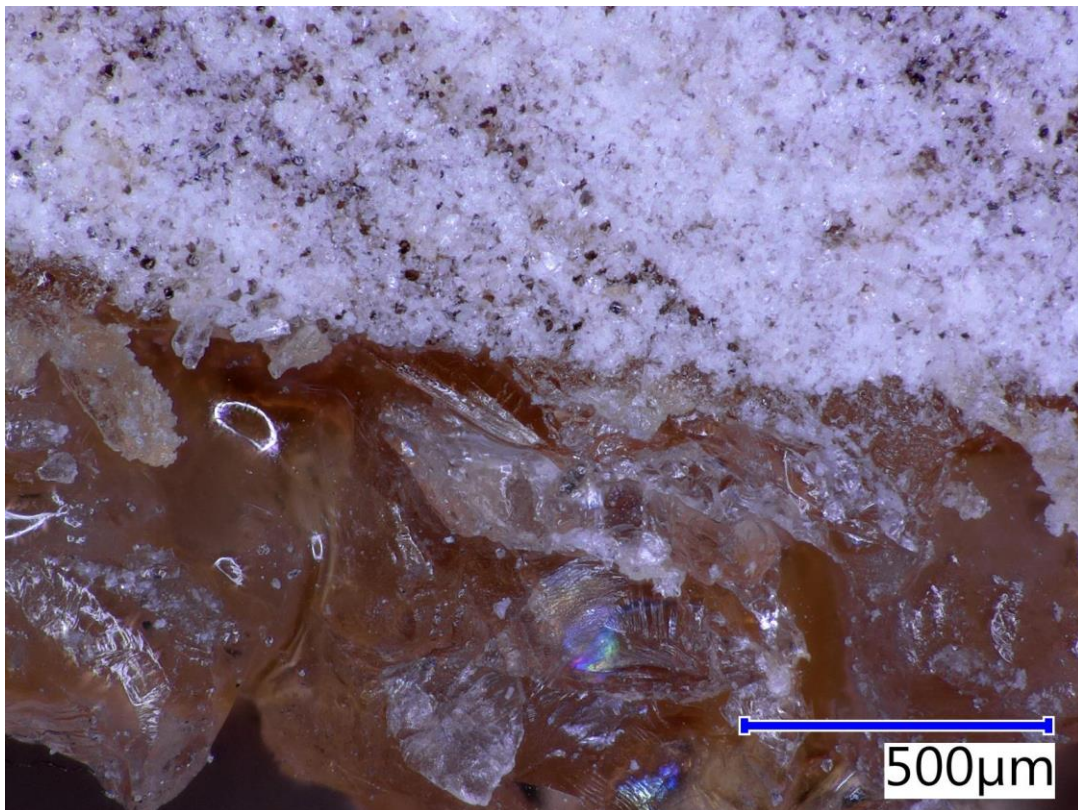
10.3. Sledování změn struktury GFRP výztuží po působení vysokých teplot

Při působení vysokých teplot dochází u FRP kompozitů ke změně mechanických vlastností. Již při zvýšení teploty na 80 °C klesá únosnost až o 70 %. Z tohoto důvodu není použití samotných FRP profilů a FRP externích výztužných systémů vhodné do konstrukcí, kde je hlavním požadavkem požární odolnost. Pokud je FRP kompozit použit jako výztuž v betonu, beton zamezí přístupu kyslíku a FRP výztuž nemůže hořet, polymerní matrice ale začne vlivem vysokých teplot měknout.

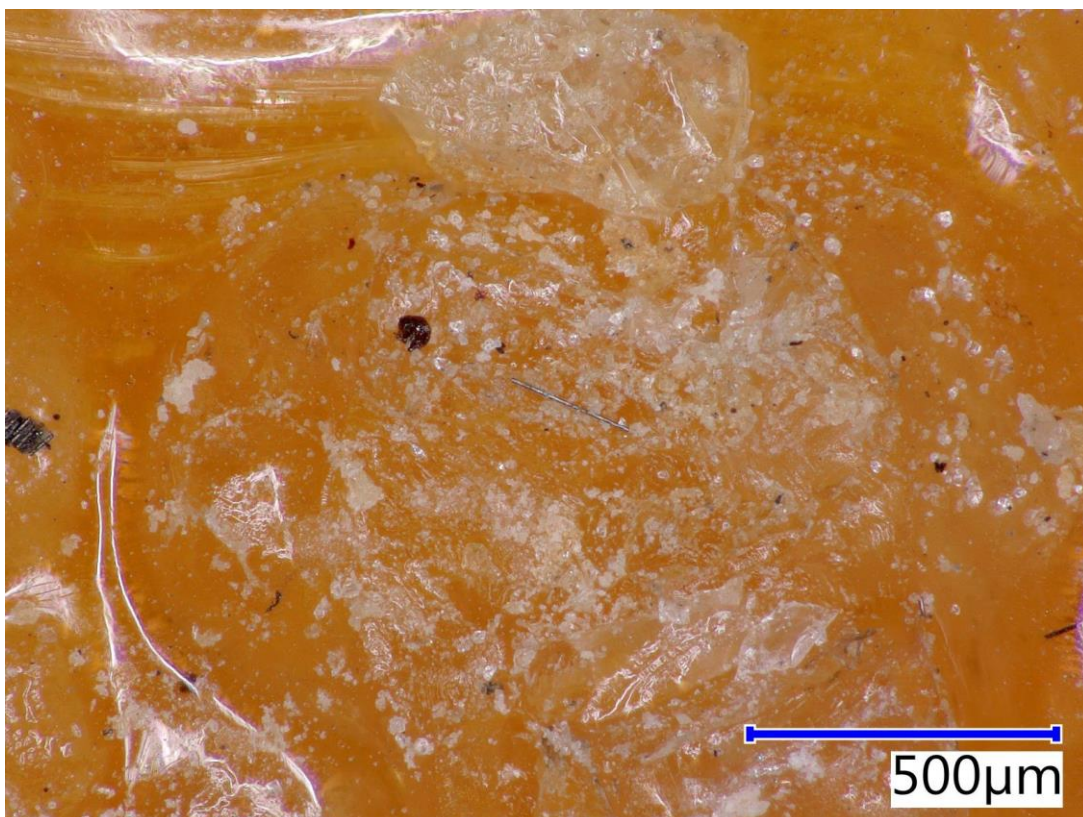
Vzorky GFRP kompozitů byly vystaveny teplotám 200 °C, 400 °C, 600 °C a 800 °C. Zatěžování probíhalo v peci s elektrickým vytápěním. Nárůst teploty byl 10 °C za minutu, výdrž na požadované teplotě byla 30 minut.



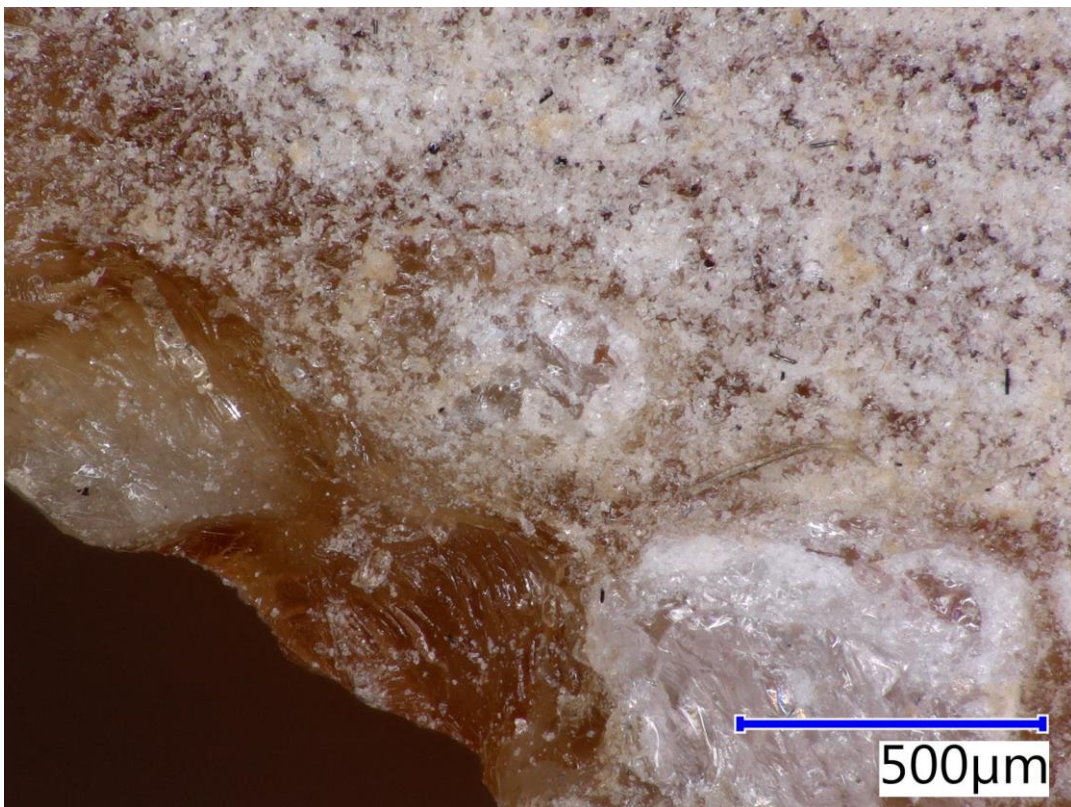
Obr. 50 - Povrch GFRP kompozitní výztuže při teplotě 20 °C. Pohled podélně se směrem vláken.



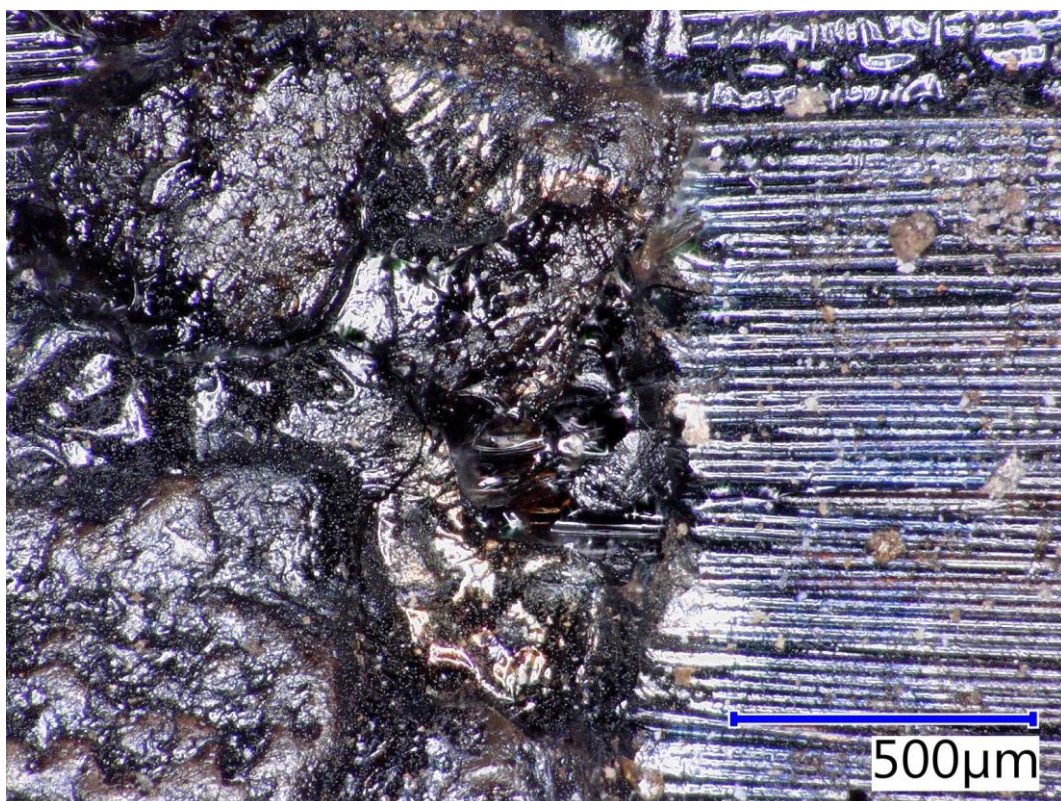
Obr. 51 - Skleněná vlákna a opískování křemičitým pískem na průřezu GFRP kompozitní výztuže při teplotě 20 °C



Obr. 52 - Povrch GFRP kompozitní výztuže po působení teploty 200 °C, pohled podélně ve směru vláken



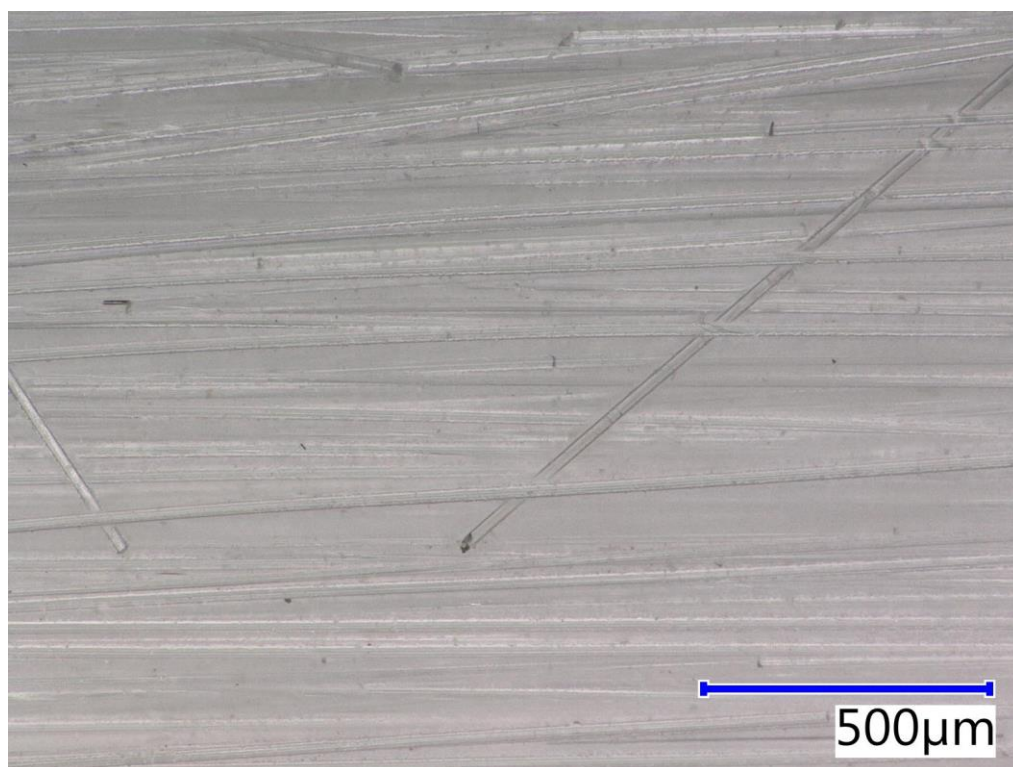
Obr. 53 - Vlákna a křemičité opískování na průřezu GFRP kompozitní výztuže po působení teploty 200 °C, pohled kolmo na směr vláken



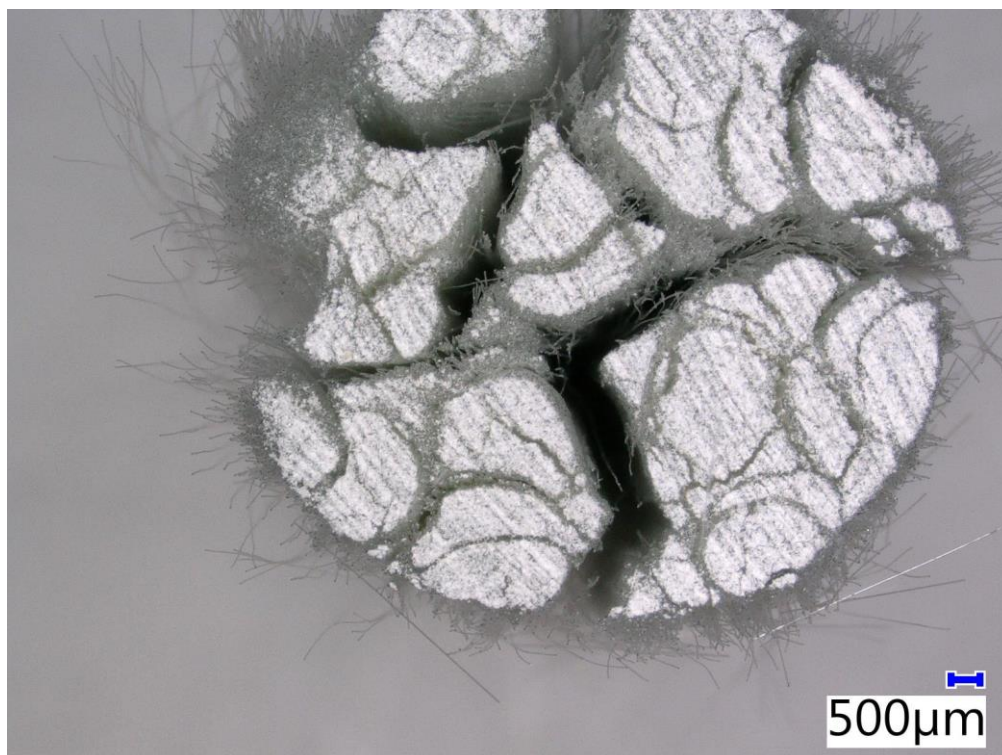
Obr. 54 - Opískování a částečně odhalená vlákna na GFRP kompozitní výztuži po působení teploty 400 °C



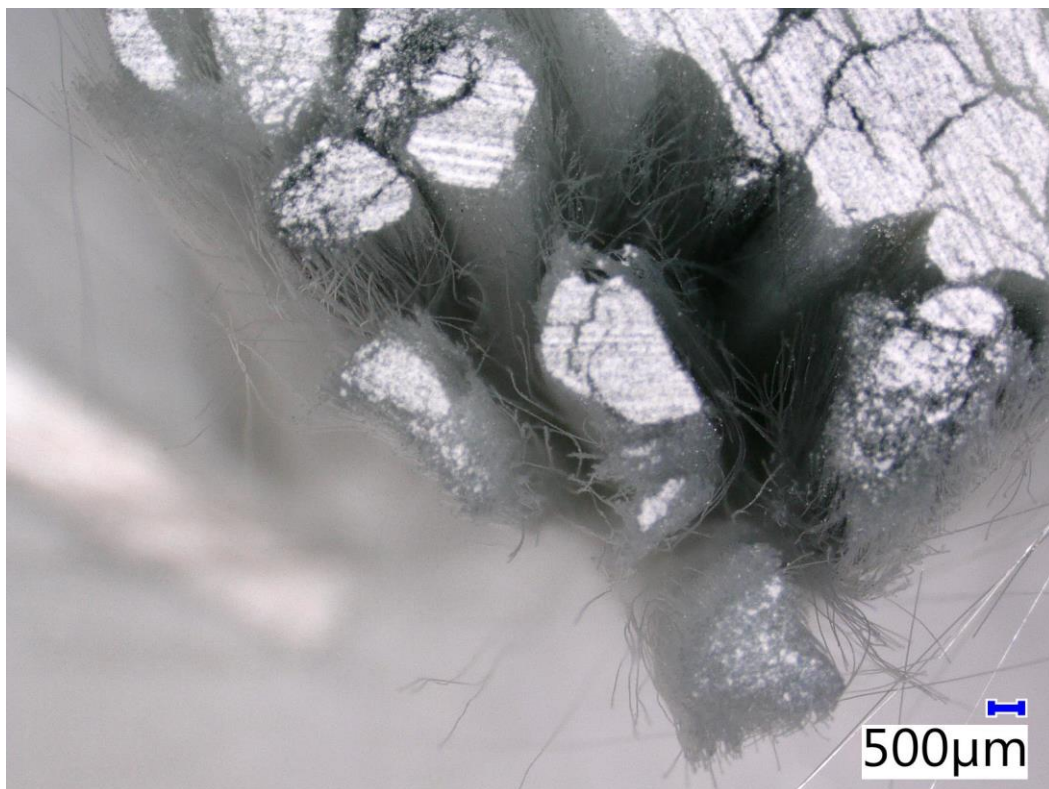
Obr. 55 - Pohled kolmo na směr vláken, vlákna a křemičité opískování na průřezu GFRP kompozitní výztuže po působení teploty 400 °C



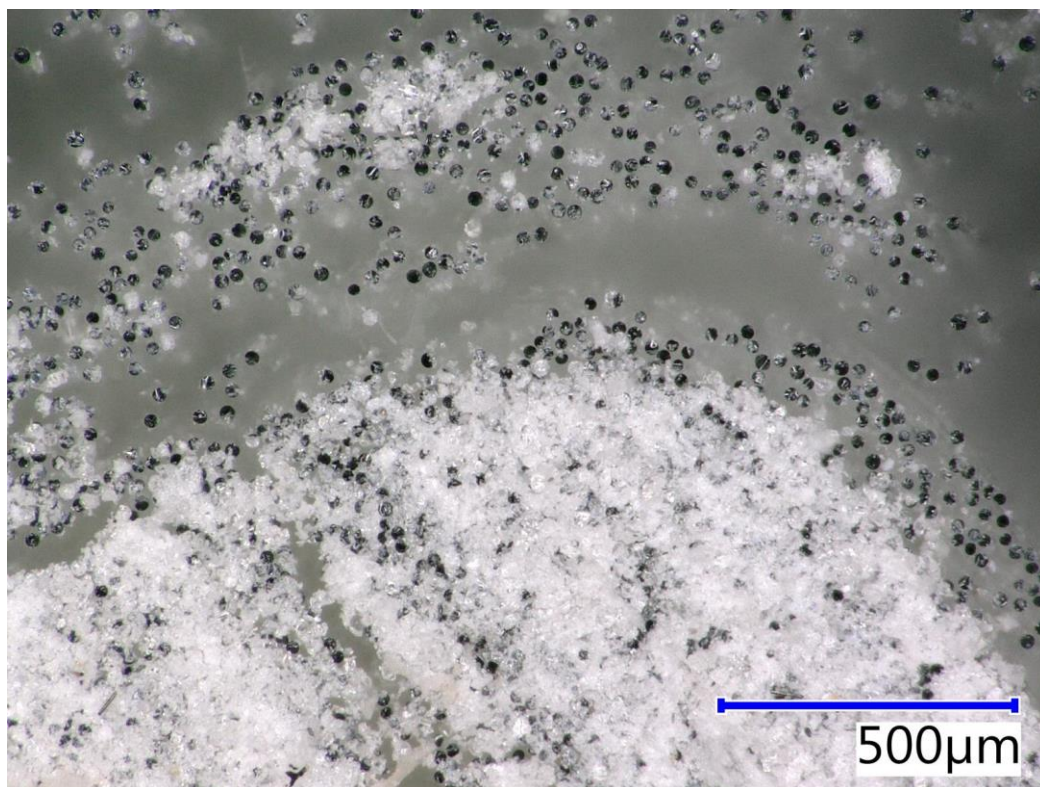
Obr. 56 - Odhalená skleněná vlákna GFRP kompozitní výztuži, výztuž po působení teploty 600 °C, epoxidová matrice je vytavená. Pohled ve směru vláken.



Obr. 57 - Vlákna na průřezu GFRP kompozitní výztuže, výztuž po působení teploty 600 °C. Epoxidová matrice je vytavená. Opískování křemičitým pískem je oddělené.



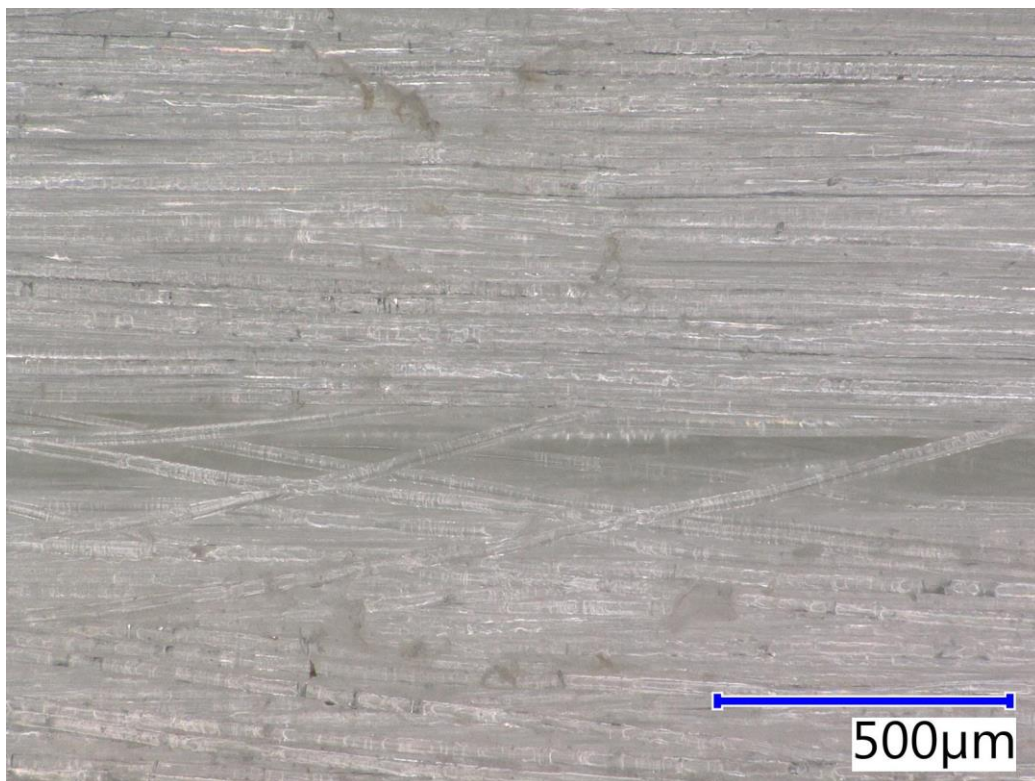
Obr. 58 - Vlákna na průřezu GFRP kompozitní výztuže, výztuž po působení teploty 600 °C. Epoxidová matrice je vytavená. Opískování křemičitým pískem je oddělené.



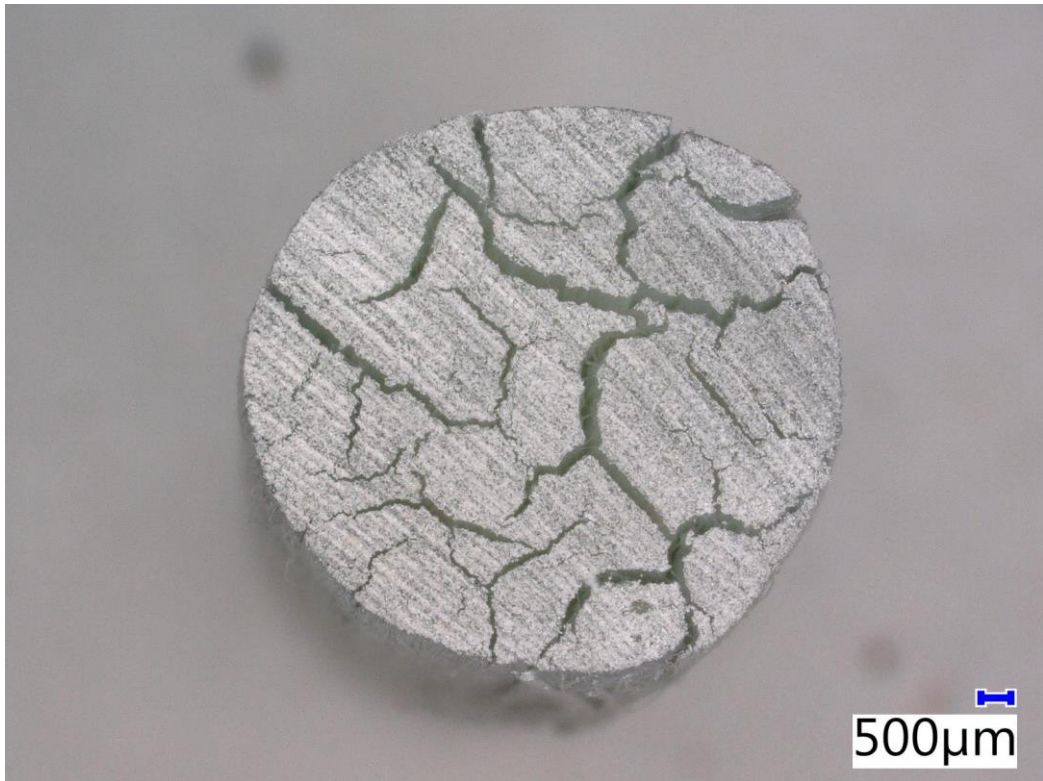
Obr. 59 - Vlákna na průřezu GFRP kompozitní výztuže po působení teploty 600 °C



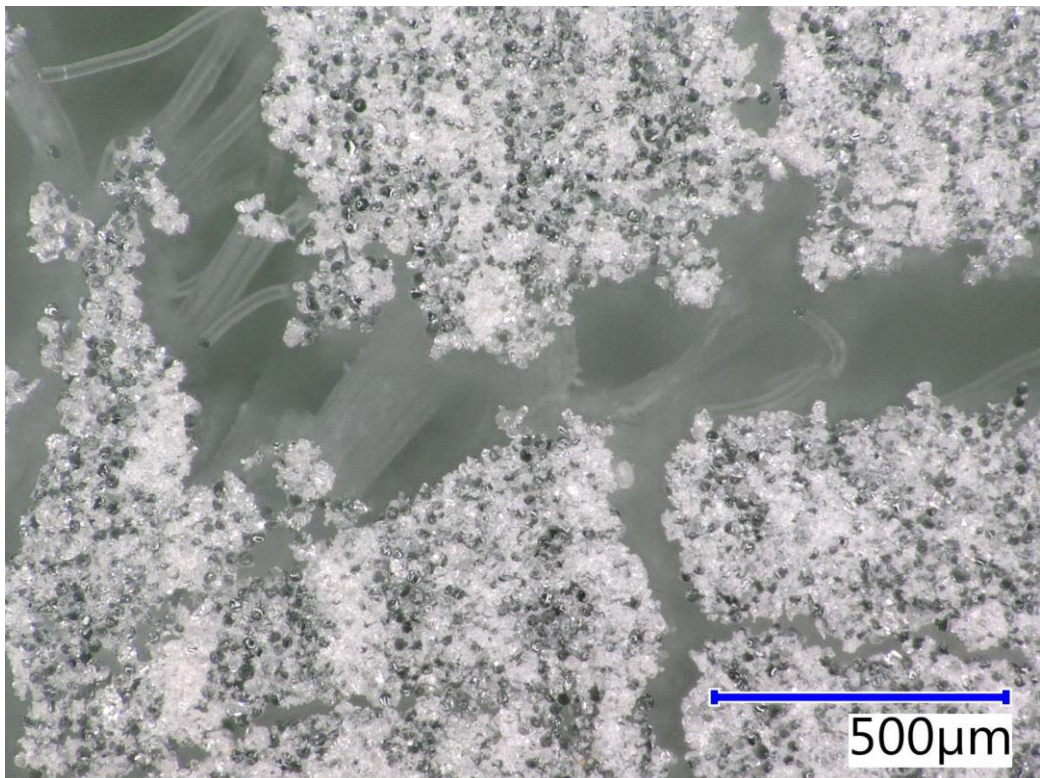
Obr. 60 - Opískování křemičitým pískem odloučené z GFRP výztuže po působení teploty 600 °C



Obr. 61 - GFRP výztuž po působení teploty 800 °C, epoxidová matrice je vytavená, skleněná vlákna jsou odhalena, je zachováno původní uspořádání vláken. Opískování je odloučené.



Obr. 62 - Pohled na průřez GFRP výztuže kolmo na vlákna. Vlákna a částečně zachované opískování křemičitým pískem (v dolní části průřezu). GFRP kompozitní výztuž po působení 800 °C.



Obr. 63 - Vlákna a křemičité opískování na povrchu GFRP kompozitní výztuže. GFRP kompozitní výztuž po působení teploty 800 °C.



Obr. 64 - Opískování křemičitým pískem odloučené z GFRP výztuže po působení teploty 800 °C.

Na obrázku 50 je patrné, že vzorky kompozitní výztuže mají místy vadu nedokonalého opískování. Tato vada vznikla pravděpodobně při výrobě. Při působení teploty 200 °C po dobu 30 min s teplotním nárůstem 10 °C za minutu nebyly na vzorcích GFRP výztuže patrné změny. Na těchto vzorcích nebyla zaznamenána deformace vláken ani tečení epoxidové pryskyřice. Na vzorcích GFRP výztuže vystavených teplotě 400 °C je patrná degradace epoxidové pryskyřice, pryskyřice je zčernalá. Na vzorcích vystavených teplotě 600 °C a 800 °C je patrné shoření a odpaření velké části pryskyřice, ale vlákna stále drží svůj tvar. Výztuž však není kompaktní z důvodu odpařené pryskyřice a shoření nylonového ovinutí. Z důvodu odpaření pryskyřice se od vzorků odloučilo křemičité opískování.

11. Závěr

Experimentální část diplomové práce byla zaměřena na sledování vlastností GFRP výztuží a na ověření soudržnosti GFRP výztuže s betonem.

Byly testovány GFRP vyrobené kompozitní výztuže ze skleněných E-CR vláken, matrice byla epoxidové pryskyřice. GFRP výztuže byly vyrobeny metodou pultruze s ovíjením. Poměr vlákno:matrice byl 80:20, po obvodu byla výztuž ovinuta nylonovým vlascem a opískována křemičitým pískem.

Bylo provedeno experimentální ověření soudržnosti GFRP výztuže s betonem. GFRP výztužné pruty o průměru 14 mm byly zabetonované do soustavy dvou nosníků rozměrů 150 x 240 x 600 mm. Soustava nosníků byla cyklicky zatěžována a byla zaznamenána síla při porušení, pevnost v tahu za ohybu a byl sledován způsob porušení nosníků a GFRP výztuže. Po zabetonování kompozitní výztuže do betonových bloků a vystavení zkoušce cyklického zatěžování byla výsledná pevnost v tahu za ohybu soustavy nosníků 26 MPa s poklesem na 1 mm pokluzu zhruba o 2 MPa. Výztuž se porušila ve většině případech uvnitř betonového bloku, což znamená, že došlo dříve k porušení na rozhraní výztuže a betonu než k porušení samotné výztuže.

Pomocí optického mikroskopu Keyence VHX-950F byly sledovány detaily porušení výztuže. Na snímcích je patrné, že i po provedení zkoušky cyklického zatěžování zůstává na GFRP kompozitní výztuží opískování. Na snímcích lze sledovat dobrou soudržnost GFRP výztuže a betonu, beton zůstává na části GFRP výztuže i po provedení mechanického namáhání, nebylo patrné oddělení vrstev nebo delaminace GFRP výztuže.

Byly testovány dva typy GFRP výztuží. Oba typy výztuží měly stejné složení, teoreticky tedy obsahovaly stejné množství výztužné fáze, ale při experimentálním ověřování pevnosti GFRP výztuží v tahu byl zjištěn rozdíl mezi těmito dvěma sledovanými sériemi výztuží. Předpokládaná příčina rozdílných pevností v tahu byla různá pórovitost GFRP výztuží. Proto byla sledována pórová struktura GFRP výztuží za účelem zjištění obsahu pórů v kompozitu. Sledování pórové struktury GFRP výztuží bylo provedeno pomocí rtuťové porozimetrie. Tento předpoklad se ale nepotvrdil. Naopak výztuž s nižší pevností v tahu (GFRP šedá, 750 MPa) obsahovala vyšší množství pórů. Celková porozita GFRP červené výztuže (pevnost v tahu 870 MPa) byla


1,4852 % a celkový kumulativní objem pórů $7,1707 \frac{mm^3}{g}$. GFRP šedá výztuž měla celkovou porozitu 1,1611 % a kumulativní objem pórů $5,441 \frac{mm^3}{g}$. Tyto rozdíly jsou velmi malé a nejsou příčinou rozdílných pevností výztuže. Šedá GFRP výztuž byla již při výrobě probarvena v celém průřezu přidáním šedého práškového pigmentu. V teoretické části v kapitole 16 Recyklace FRP kompozitů se můžeme dočíst o negativním vlivu přídavku již malého množství práškového materiálu jako plniva do matrice kompozitu. Pro další výzkum proto doporučuji prozkoumat tuto teorii jako možnou příčinu nižších pevností GFRP probarvené výztuže.

Nakonec byl ověřován vliv působení vysokých teplot na GFRP výztuže. Sledování změn bylo provedeno pomocí optického mikroskopu Keyence VHX-950F. Vzorky GFRP výztuže byly vystaveny působení teplot 200 °C, 400 °C, 600 °C a 800 °C, vždy po dobu 30 min, s teplotním nárůstem 10 °C za minutu. Při působení 200 °C nebyly na vzorcích GFRP výztuže patrné změny, nebyla zaznamenána deformace vláken ani tečení epoxidové pryskyřice. Při teplotě 400 °C byla patrná degradace epoxidové pryskyřice, pryskyřice je zčernalá, při teplotách 600 °C a 800 °C je patrné shoření a odpaření velké části pryskyřice, ale vlákna zůstala neporušená a stále zachovávala tvar výztuže. Dále navrhuji odzkoušet tahové pevnosti samotných skleněných vláken a vláken z GFRP výztuže vystavené 600 °C a 800 °C pro porovnání úbytku pevnosti vláken po vyhoření matrice.

12. Použitá literatura

- [1] SKLOCEMENT BENEŠ; Sekaná skleněná vlákna Anti-Crak, plošná výztuž; Ostrava; 2017; dostupné z: <http://www.sklocement.cz/sklenena-vlakna-cem-fil/mikrovlakna-plosna-vyztuz-anti-crak/>
- [2] ČVUT, UMI; Kompozitní materiály [online]; Praha; 2014; dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/files/6_kompozitni-materialy
- [3] SÁZOVSKÝ, M.; Vlastnosti skla; GlassGuru; Brno; 2015.
- [4] POPOVIČ, Š.; Výroba a zpracování plochého skla; Grada Publishing as; 2009.
- [5] ASOCIACE SKLÁŘSKÉHO A KERAMICKÉHO PRŮMYSLU ČR; Jak se sklo vyrábí; 2017; dostupné z: <http://www.askpccr.cz/o-skle/jak-se-sklo-vyrabi/>
- [6] KORDCARBON; Uhlíkové vlákno; 2017; dostupné z: <http://www.kordcarbon.cz/o-nas>
- [7] LOPRESTO, V.; LEONE, C.; DE IORIO, I.; Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic; Composites Part B: Engineering; 2011
- [8] FLORE, D.; Investigation of the high and very high cycle fatigue behaviour of continuous fibre reinforced plastics by conventional and ultrasonic fatigue testing; Composites Science and Technology; 2017
- [9] LANÍKOVÁ, I.; Kotvení předpjaté frp výztuže pro betonové konstrukce; Sborník příspěvků konference Expert Forensic Science, Brno 2012; Vysoké učení technické v Brně; Ústav soudního inženýrství; Brno; 2012.

- [10] PETRÁNEK, J.; Geologická encyklopedie; dostupné z:
<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?bazalt>; 2007.
- [11] Scheffler, C.; Förster, T.; Mäder, E.; Heinrich, G.; Hempel, S.; Mechtcherine, V. Aging of alkali-resistant glass and basalt fibers in alkaline solutions: Evaluation of the failure stress by Weibull distribution function; Journal of Non-Crystalline Solids; 2009.
- [12] Sandstrom, R. J.; Bond Performances of FRP Rebars-Reinforced Concrete; A Thesis presented to the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Civil and Environmental Engineering; 2011
- [13] Achillides, Z.; Bond Behavior of Fiber Reinforced Polymer Bars Under Direct Pullout Conditions.; Journal of Composites for Construction, march/april; 2004
- [14] Aiello, M. A., Leone, M. and Pecce, M.; Bond of Performances of FRP Rebars-Reinforced Concrete; Journal of Materials in civil Engineering, march; 2007
- [15] Pechoušek, J.; Měření plochy povrchu pevných látek a určování jejich porozity metodou sorpce plynu; Centrum výzkumu nanomateriálů, Přírodovědecká fakulta, Universita Palackého v Olomouci; 2010; dostupné z:
<https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/ostatni/BET.pdf>
- [16] Webb, P. A.; An Introduction To The Physical Characterization Of Materials By Mercury Intrusion Porosimetry with Emphasis On Reduction And Presentation of Experimental Data; Micromeritics Instrument Corp., Norcross, Georgia; january 2001

- [17] Dudák, M., Václavík, M.; Rtuřová porozimetrie; Vysoká škola Chemickotechnická; Fakulta chemická; 2011; dostupné z: <https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/RP.pdf?redirected>
- [18] Rouquerol, F., Rouquerol, J., and Sing K.; Adsorption by Powders and Porous; Principles, Methodology and Applications; France; 1999
- [19] Correia, J. R., Almeida, N. M., Figueira, J. R.; Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures; Journal of Cleaner Production; Department of Civil Engineering and Architecture, Instituto Superior Técnico/ICIST, Technical University of Lisbon; Portugal; 2011
- [20] Ma, W., Liu, F.; Effects of porosity on ultrasonic characteristic parameters and mechanical properties of glass fiber reinforced composites; School of Material of Science and Engineering, Beihang University; China; 2011
- [21] Prefa Kompozity, a.s.; Výroba a montáž kompozitních výztuží; Brno; 2018; dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/pultruze-tazeni/>
- [22] Vrbka, J.; Mechanika kompozitů; Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky; Fakulta strojního inženýrství; VUT v Brně; 2008; dostupné z: <http://docplayer.cz/19075854-Mechanika-kompozitu-prof-rndr-ing-jan-vrbka-drsc-ustav-mechaniky-teles-mechatroniky-a-biomechaniky-fakulta-strojního-inženýrství-vut-v-brně.html> 
- [23] Agarwal, B. D., Broutman, L. J.: Vláknové kompozity, SNTL, Praha, 1987

- [24] Qiao, P., Chen, Y.; Cohesive fracture simulation and failure modes of FRP-concrete bonded interfaces; Hohai University, Engineering Mechanics; Washington State University, Civil and Environmental Engineering; Shandong University, Civil Engineering; China, USA; 2007
- [25] Prefa Kompozity a.s.; Kompozitní výztuže; Brno; 2018; dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/ke-stazeni/>

13. Seznam tabulek

<i>Tab. 1 - Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken [7].....</i>	<i>8</i>
<i>Tab. 2 - Výsledky rtuťové porozimetre vzorků GRFP výztuží</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 3 - Distribuce velikosti pórů vzorků GFRP výztuže</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4 - Receptura betonu pro zkoušky soudržnosti GRFP výztuže a betonu</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 5 - Třídy konzistence u zkoušky sednutím</i>	<i>47</i>

14. Seznam obrázků

Obr. 1 - Grafické znázornění průběhu napětí skla [3].....	5
Obr. 2 - Porovnání kompozitu z čedičových a skleněných vláken	8
Obr. 3 - Struktura uhlíkových vláken [6]	9
Obr. 4 - Materiály vstupující do výroby FRP kompozitu vyrobeného pultruzí [21] 13	
Obr. 5 - Linka na výrobu FRP kompozitních výztuží, Prefa Kompozity a.s. [21]... 15	
Obr. 6 - GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), C-GFRP (Carbon-Glass Fiber Reinforced Polymer) a CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) výztuž do betonu [25]	16
Obr. 7 - Mechanismus kotvení předpínací výztuže s vyznačením působících sil [9]	17
Obr. 8 - Mechanismy porušování dlouhovláknového kompozitu při podélném tahovém namáhání [23].....	19
Obr. 9 - Způsoby porušení dlouhovláknových kompozitů při podélném tlakovém namáhání [23]	20
Obr. 10 - Porušení celistvosti dlouhovláknových kompozitů při příčném tahovém namáhání [23]	20
Obr. 11 - Porušení celistvosti dlouhovláknových kompozitů při příčném tlakovém namáhání [23]	21
Obr. 12 - Porušení celistvosti dlouhovláknových kompozitů smykovým namáháním [23].....	21
Obr. 13 - Soudržnost výztužných prvků s betonovým prostředím [13]	23
Obr. 14 - Závislost pevnosti v tlaku f_{cu} betonové matrice na velikosti průměrného zatížení T při vytažení GFRP a CFRP výztuže [13].....	24
Obr. 15 - Závislost průměru FRP výztuže na pevnosti spoje s betonovou maticí [13].....	24
Obr. 16 - Poissonův efekt [13].....	25
Obr. 17 - Rozložení sil napětí ve smykovém zpoždění [13].....	25
Obr. 18 - Mikroskopické zachycení vzduchových pórů v kompozitu [20].....	28
Obr. 19 - Průřez kapkou nesmáčivé kapaliny na pevném povrchu [17].....	30
Obr. 20 - Adsorpce molekul plynu na povrchu adsorbentu [15].....	30
Obr. 21 - Langmuirova adsorpční izoterma [15]	31
Obr. 22 - Průběh Langmuirovy (červená) a BET (zelená) izotermy [15].....	32

<i>Obr. 23 - Adsorpce plynu a tvorba izotermy na mikroporézním vzorku [15]</i>	33
<i>Obr. 24 - Odpad z mechanické metody recyklace FRP kompozitů [19]</i>	35
<i>Obr. 25 - Penetrometr [16]</i>	39
<i>Obr. 26 - A) Graf znázornění objemového zastoupení jednotlivých velikostí pórů</i>	42
<i>Obr. 27 - Čerstvý beton pro výrobu nosníků</i>	46
<i>Obr. 28 - Nosníky se zabetonovanou GFRP kompozitní výztuží</i>	46
<i>Obr. 29 - Upevnění nosníku do zařízení pro zkoušku cyklickým zatěžováním</i>	49
<i>Obr. 30 - Porušení nosníku s GFRP kompozitní výztuží po zkoušce cyklickým zatěžováním</i>	49
<i>Obr. 31 - Graf pevnosti v tahu za ohybu s volným pokluzem prvního zatěžovaného vzorku</i>	50
<i>Obr. 32 - Graf pevnosti v tahu za ohybu s volným pokluzem druhého zatěžovaného vzorku</i>	50
<i>Obr. 33 - Graf pevnosti v tahu za ohybu s volným pokluzem třetího zatěžovaného vzorku</i>	51
<i>Obr. 34 - Graf pevnosti v tahu za ohybu s volným pokluzem čtvrtého zatěžovaného vzorku</i>	51
<i>Obr. 35 - Detail porušení FRP kompozitní výztuže v betonovém bloku po zkoušce cyklickým zatěžováním – porušení výztuže</i>	52
<i>Obr. 36 - Způsob porušení FRP kompozitní výztuže v betonovém bloku po zkoušce cyklickým zatěžováním – vytažení výztuže</i>	53
<i>Obr. 37 - Trhlina v betonovém nosníku v blízkosti GFRP výztuže po zkoušce cyklickým zatěžováním</i>	53
<i>Obr. 38 - Umístění vzorku GFRP výztuže při sledování optickým mikroskopem Keyence VHR-950F</i>	54
<i>Obr. 39 - Trhlina v GFRP výztuži, skleněná vlákna v trhlině výztuže</i>	55
<i>Obr. 40 - Skleněná vlákna v GRF výztuží, opískování křemičitým pískem po obvodu výztuže, ovinutí nilonovým vlascem napříč trhlinou</i>	55
<i>Obr. 41 - GFRP výztuž, skleněná vlákna a opískování křemičitým pískem po obvodu výztuže, trhlina na průřezu výztuže</i>	56
<i>Obr. 42 - GFRP výztuž, skleněná vlákna a opískování křemičitým pískem, trhlina podílně se směrem vláken</i>	56

Obr. 43 - Otisk GFRP výztuže v betonu, trhlina na otisku GFRP výztuže v betonovém bloku	57
Obr. 44 - Detail betonového nosníku po cyklickém zatěžování, stopy pryskyřice na otisku GFRP kompozitní výztuže v betonovém bloku	58
Obr. 45 - Detail betonového nosníku po cyklickém zatěžování, trhlina na rozhraní otisku žebra GFRP kompozitní výztuže v betonovém bloku	58
Obr. 46 - 3D pohled na trhlínu na rozhraní otisku žebra GFRP kompozitní výztuže v betonovém bloku	59
Obr. 47 - Zbytek křemičitého písku na otisku žebra GFRP kompozitní výztuže v betonovém bloku	59
Obr. 48 - Beton na GFRP kompozitní výztuži po zkoušce cyklického namáhání .	60
Obr. 49 - 3D pohled na GFRP kompozitní výztuž s betonem	61
Obr. 50 - Povrch GFRP kompozitní výztuže při teplotě 20 °C. Pohled podélně se směrem vláken.	62
Obr. 51 - Skleněná vlákna a opískování křemičitým pískem na průřezu GFRP kompozitní výztuže při teplotě 20 °C	63
Obr. 52 - Povrch GFRP kompozitní výztuže po působení teploty 200 °C, pohled podélně ve směru vláken.....	63
Obr. 53 - Vlákna a křemičité opískování na průřezu GFRP kompozitní výztuže po působení teploty 200 °C, pohled kolmo na směr vláken.....	64
Obr. 54 - Opískování a částečně odhalená vlákna na GFRP kompozitní výztuži po působení teploty 400 °C	64
Obr. 55 - Pohled kolmo na směr vláken, vlákna a křemičité opískování na průřezu GFRP kompozitní výztuže po působení teploty 400 °C.....	65
Obr. 56 - Odhalená skleněná vlákna GFRP kompozitní výztuži, výztuž po působení teploty 600 °C, epoxidová matrice je vytavená. Pohled ve směru vláken.	65
Obr. 57 - Vlákna na průřezu GFRP kompozitní výztuže, výztuž po působení teploty 600 °C. Epoxidová matrice je vytavená. Opískování křemičitým pískem je oddělené.....	66
Obr. 58 - Vlákna na průřezu GFRP kompozitní výztuže, výztuž po působení teploty 600 °C. Epoxidová matrice je vytavená. Opískování křemičitým pískem je oddělené.....	67

<i>Obr. 59 - Vlákná na průřezu GFRP kompozitní výztuže po působení teploty 600 °C</i>	67
<i>Obr. 60 - Opískování křemičitým pískem odloučené z GFRP výztuže po působení teploty 600 °C</i>	68
<i>Obr. 61 - GFRP výztuž po působení teploty 800 °C, epoxidová matrice je vytavená, skleněná vlákna jsou odhalená, je zachováno původní uspořádání vláken. Opískování je odloučené</i>	68
<i>Obr. 62 - Pohled na průřez GFRP výztuže kolmo na vlákna. Vlákná a částečně zachované opískování křemičitým pískem (v dolní části průřezu). GFRP kompozitní výztuž po působení 800 °C</i>	69
<i>Obr. 63 - Vlákná a křemičité opískování na povrchu GFRP kompozitní výztuže. GFRP kompozitní výztuž po působení teploty 800 °C</i>	69
<i>Obr. 64 - Opískování křemičitým pískem odloučené z GFRP výztuže po působení teploty 800 °C</i>	70

15. Přílohy

15.1. Příloha 1

DATA REPORT

Diameter (μm)	Spec.Vol. (mm^3/g)	Rel.Vol. (mm^3/g)	% Rel.Vol. (%)
112,542	0,000	0,000	0,000
106,935	0,040	0,040	0,510
99,164	0,070	0,040	0,510
93,031	0,150	0,070	1,030
86,590	0,180	0,040	0,510
80,984	0,220	0,040	0,510
76,839	0,260	0,040	0,510
73,098	0,290	0,040	0,510
63,501	0,330	0,040	0,510
59,949	0,370	0,040	0,510
56,135	0,400	0,040	0,510
52,592	0,440	0,040	0,510
46,988	0,480	0,040	0,510
45,565	0,550	0,070	1,030
43,453	0,590	0,040	0,510
40,518	0,630	0,040	0,510
36,124	0,660	0,040	0,510
33,315	0,700	0,040	0,510
30,721	0,740	0,040	0,510
27,257	0,770	0,040	0,510
26,027	0,810	0,040	0,510
23,534	0,850	0,040	0,510
21,417	0,960	0,110	1,540
20,287	0,990	0,040	0,510
19,147	1,030	0,040	0,510
18,395	1,070	0,040	0,510
17,332	1,100	0,040	0,510
16,978	1,140	0,040	0,510
16,349	1,180	0,040	0,510
15,487	1,210	0,040	0,510
14,785	1,250	0,040	0,510
13,920	1,360	0,110	1,540

DATA REPORT

Diameter (μm)	Spec.Vol. (mm^3/g)	Rel.Vol. (mm^3/g)	% Rel.Vol. (%)
134,879	0,030	0,030	0,640
126,905	0,070	0,030	0,640
118,870	0,100	0,030	0,640
106,244	0,140	0,030	0,640
100,554	0,170	0,030	0,640
93,071	0,210	0,030	0,640
89,203	0,240	0,030	0,640
82,805	0,280	0,030	0,640
78,083	0,380	0,100	1,910
76,889	0,420	0,030	0,640
71,400	0,450	0,030	0,640
61,958	0,490	0,030	0,640
58,572	0,520	0,030	0,640
55,537	0,550	0,030	0,640
51,178	0,590	0,030	0,640
47,756	0,620	0,030	0,640
42,239	0,660	0,030	0,640
41,892	0,760	0,100	1,910
37,212	0,800	0,030	0,640
32,042	0,830	0,030	0,640
28,836	0,870	0,030	0,640
26,032	0,900	0,030	0,640
23,876	0,940	0,030	0,640
21,511	0,970	0,030	0,640
18,532	1,010	0,030	0,640
17,292	1,040	0,030	0,640
17,174	1,110	0,070	1,270
17,018	1,140	0,030	0,640
13,920	1,140	0,000	0,000
13,082	1,180	0,030	0,640
11,945	1,210	0,030	0,640
11,031	1,250	0,030	0,640

12,238	1,400	0,040	0,510	9,328	1,280	0,030	0,640
11,851	1,430	0,040	0,510	9,168	1,320	0,030	0,640
11,088	1,470	0,040	0,510	8,859	1,350	0,030	0,640
10,587	1,510	0,040	0,510	8,273	1,390	0,030	0,640
10,212	1,540	0,040	0,510	8,007	1,460	0,070	1,270
9,779	1,580	0,040	0,510	7,625	1,460	0,000	0,000
9,191	1,620	0,040	0,510	7,377	1,490	0,030	0,640
8,736	1,650	0,040	0,510	6,647	1,520	0,030	0,640
8,547	1,730	0,070	1,030	6,098	1,560	0,030	0,640
8,542	1,770	0,040	0,510	5,750	1,590	0,030	0,640
7,656	1,800	0,040	0,510	5,340	1,630	0,030	0,640
7,417	1,840	0,040	0,510	4,825	1,660	0,030	0,640
7,098	1,880	0,040	0,510	4,533	1,700	0,030	0,640
6,804	1,910	0,040	0,510	4,274	1,730	0,030	0,640
6,549	1,950	0,040	0,510	3,741	1,770	0,030	0,640
6,189	1,990	0,040	0,510	3,563	1,800	0,030	0,640
6,169	2,020	0,040	0,510	3,401	1,840	0,030	0,640
5,297	2,060	0,040	0,510	3,326	1,870	0,030	0,640
4,947	2,100	0,040	0,510	2,824	1,910	0,030	0,640
4,789	2,130	0,040	0,510	2,772	1,940	0,030	0,640
4,501	2,170	0,040	0,510	2,454	1,980	0,030	0,640
4,370	2,210	0,040	0,510	2,303	2,040	0,070	1,270
4,246	2,240	0,040	0,510	2,202	2,080	0,030	0,640
4,018	2,280	0,040	0,510	2,109	2,110	0,030	0,640
3,814	2,320	0,040	0,510	1,996	2,150	0,030	0,640
3,719	2,390	0,070	1,030	1,762	2,180	0,030	0,640
3,462	2,430	0,040	0,510	1,683	2,220	0,030	0,640
3,383	2,460	0,040	0,510	1,528	2,250	0,030	0,640
3,169	2,500	0,040	0,510	1,498	2,290	0,030	0,640
2,922	2,540	0,040	0,510	1,413	2,320	0,030	0,640
2,812	2,570	0,040	0,510	1,248	2,360	0,030	0,640
2,760	2,610	0,040	0,510	1,179	2,390	0,030	0,640
2,527	2,650	0,040	0,510	1,085	2,430	0,030	0,640
2,445	2,680	0,040	0,510	1,026	2,460	0,030	0,640
2,295	2,720	0,040	0,510	0,876	2,500	0,030	0,640
2,132	2,760	0,040	0,510	0,814	2,530	0,030	0,640
2,017	2,790	0,040	0,510	0,757	2,560	0,030	0,640
1,843	2,830	0,040	0,510	0,717	2,600	0,030	0,640
1,737	2,870	0,040	0,510	0,513	2,630	0,030	0,640
1,678	2,910	0,040	0,510	0,414	2,630	0,000	0,000

1,494	2,940	0,040	0,510	0,283	2,670	0,030	0,640
1,384	2,980	0,040	0,510	0,254	2,700	0,030	0,640
1,225	3,020	0,040	0,510	0,200	2,740	0,030	0,640
1,133	3,050	0,040	0,510	0,171	2,740	0,000	0,000
1,046	3,090	0,040	0,510	0,141	2,770	0,030	0,640
0,890	3,130	0,040	0,510	0,132	2,810	0,030	0,640
0,813	3,160	0,040	0,510	0,122	2,840	0,030	0,640
0,709	3,200	0,040	0,510	0,107	2,840	0,000	0,000
0,656	3,240	0,040	0,510	0,098	2,880	0,030	0,640
0,550	3,270	0,040	0,510	0,092	2,910	0,030	0,640
0,488	3,310	0,040	0,510	0,086	2,950	0,030	0,640
0,451	3,350	0,040	0,510	0,076	2,950	0,000	0,000
0,410	3,380	0,040	0,510	0,072	2,980	0,030	0,640
0,373	3,420	0,040	0,510	0,069	3,020	0,030	0,640
0,309	3,460	0,040	0,510	0,064	3,020	0,000	0,000
0,282	3,490	0,040	0,510	0,059	3,050	0,030	0,640
0,256	3,530	0,040	0,510	0,057	3,080	0,030	0,640
0,212	3,570	0,040	0,510	0,055	3,120	0,030	0,640
0,194	3,600	0,040	0,510	0,050	3,150	0,030	0,640
0,176	3,640	0,040	0,510	0,048	3,190	0,030	0,640
0,160	3,680	0,040	0,510	0,046	3,220	0,030	0,640
0,137	3,710	0,040	0,510	0,045	3,220	0,000	0,000
0,122	3,750	0,040	0,510	0,042	3,260	0,030	0,640
0,112	3,790	0,040	0,510	0,041	3,260	0,000	0,000
0,103	3,820	0,040	0,510	0,040	3,290	0,030	0,640
0,087	3,860	0,040	0,510	0,038	3,330	0,030	0,640
0,081	3,900	0,040	0,510	0,037	3,330	0,000	0,000
0,076	3,930	0,040	0,510	0,036	3,360	0,030	0,640
0,067	3,970	0,040	0,510	0,035	3,400	0,030	0,640
0,064	4,010	0,040	0,510	0,034	3,430	0,030	0,640
0,061	4,050	0,040	0,510	0,033	3,470	0,030	0,640
0,059	4,080	0,040	0,510	0,032	3,500	0,030	0,640
0,055	4,120	0,040	0,510	0,030	3,500	0,000	0,000
0,052	4,160	0,040	0,510	0,030	3,530	0,030	0,640
0,049	4,190	0,040	0,510	0,029	3,530	0,000	0,000
0,047	4,230	0,040	0,510	0,028	3,570	0,030	0,640
0,045	4,270	0,040	0,510	0,027	3,570	0,000	0,000
0,043	4,300	0,040	0,510	0,027	3,600	0,030	0,640
0,040	4,340	0,040	0,510	0,026	3,640	0,030	0,640
0,039	4,380	0,040	0,510	0,024	3,670	0,030	0,640

0,038	4,410	0,040	0,510	0,024	3,710	0,030	0,640
0,037	4,450	0,040	0,510	0,023	3,740	0,030	0,640
0,035	4,450	0,000	0,000	0,023	3,740	0,000	0,000
0,033	4,490	0,040	0,510	0,022	3,780	0,030	0,640
0,032	4,520	0,040	0,510	0,022	3,780	0,000	0,000
0,031	4,560	0,040	0,510	0,021	3,810	0,030	0,640
0,031	4,600	0,040	0,510	0,021	3,850	0,030	0,640
0,029	4,630	0,040	0,510	0,021	3,850	0,000	0,000
0,029	4,670	0,040	0,510	0,020	3,880	0,030	0,640
0,028	4,710	0,040	0,510	0,020	3,920	0,030	0,640
0,027	4,740	0,040	0,510	0,019	3,950	0,030	0,640
0,026	4,740	0,000	0,000	0,019	3,990	0,030	0,640
0,026	4,780	0,040	0,510	0,019	3,990	0,000	0,000
0,025	4,820	0,040	0,510	0,018	4,020	0,030	0,640
0,024	4,850	0,040	0,510	0,018	4,020	0,000	0,000
0,023	4,850	0,000	0,000	0,018	4,050	0,030	0,640
0,023	4,890	0,040	0,510	0,017	4,090	0,030	0,640
0,023	4,930	0,040	0,510	0,017	4,120	0,030	0,640
0,022	4,960	0,040	0,510	0,017	4,120	0,000	0,000
0,021	4,960	0,000	0,000	0,017	4,160	0,030	0,640
0,021	5,000	0,040	0,510	0,016	4,190	0,030	0,640
0,021	5,040	0,040	0,510	0,016	4,230	0,030	0,640
0,020	5,040	0,000	0,000	0,016	4,230	0,000	0,000
0,020	5,070	0,040	0,510	0,016	4,230	0,000	0,000
0,020	5,110	0,040	0,510	0,016	4,260	0,030	0,640
0,019	5,110	0,000	0,000	0,015	4,300	0,030	0,640
0,019	5,150	0,040	0,510	0,015	4,300	0,000	0,000
0,019	5,150	0,000	0,000	0,015	4,300	0,000	0,000
0,018	5,180	0,040	0,510	0,015	4,330	0,030	0,640
0,018	5,220	0,040	0,510	0,015	4,370	0,030	0,640
0,018	5,260	0,040	0,510	0,014	4,400	0,030	0,640
0,018	5,300	0,040	0,510	0,014	4,400	0,000	0,000
0,017	5,330	0,040	0,510	0,014	4,440	0,030	0,640
0,017	5,370	0,040	0,510	0,014	4,470	0,030	0,640
0,017	5,410	0,040	0,510	0,014	4,510	0,030	0,640
0,017	5,410	0,000	0,000	0,014	4,510	0,000	0,000
0,016	5,440	0,040	0,510	0,014	4,540	0,030	0,640
0,016	5,480	0,040	0,510	0,013	4,570	0,030	0,640
0,016	5,480	0,000	0,000	0,013	4,610	0,030	0,640
0,016	5,520	0,040	0,510	0,013	4,610	0,000	0,000

0,016	5,550	0,040	0,510	0,013	4,640	0,030	0,640
0,016	5,590	0,040	0,510	0,013	4,640	0,000	0,000
0,015	5,630	0,040	0,510	0,013	4,680	0,030	0,640
0,015	5,660	0,040	0,510	0,013	4,680	0,000	0,000
0,015	5,660	0,000	0,000	0,012	4,710	0,030	0,640
0,015	5,700	0,040	0,510	0,012	4,710	0,000	0,000
0,015	5,700	0,000	0,000	0,012	4,750	0,030	0,640
0,015	5,740	0,040	0,510	0,012	4,780	0,030	0,640
0,014	5,740	0,000	0,000	0,012	4,820	0,030	0,640
0,014	5,770	0,040	0,510	0,012	4,850	0,030	0,640
0,014	5,810	0,040	0,510	0,012	4,850	0,000	0,000
0,014	5,850	0,040	0,510	0,011	4,850	0,000	0,000
0,014	5,880	0,040	0,510	0,011	4,890	0,030	0,640
0,014	5,880	0,000	0,000	0,011	4,890	0,000	0,000
0,013	5,880	0,000	0,000	0,011	4,920	0,030	0,640
0,013	5,920	0,040	0,510	0,011	4,960	0,030	0,640
0,013	5,960	0,040	0,510	0,011	4,960	0,000	0,000
0,013	5,990	0,040	0,510	0,011	4,990	0,030	0,640
0,013	5,990	0,000	0,000	0,011	4,990	0,000	0,000
0,013	6,030	0,040	0,510	0,011	5,030	0,030	0,640
0,013	6,070	0,040	0,510	0,011	5,030	0,000	0,000
0,013	6,070	0,000	0,000	0,010	5,060	0,030	0,640
0,013	6,100	0,040	0,510	0,010	5,090	0,030	0,640
0,012	6,100	0,000	0,000	0,010	5,130	0,030	0,640
0,012	6,140	0,040	0,510	0,010	5,160	0,030	0,640
0,012	6,140	0,000	0,000	0,010	5,200	0,030	0,640
0,012	6,180	0,040	0,510	0,010	5,200	0,000	0,000
0,012	6,210	0,040	0,510	0,010	5,200	0,000	0,000
0,012	6,250	0,040	0,510	0,010	5,230	0,030	0,640
0,012	6,290	0,040	0,510	0,010	5,270	0,030	0,640
0,012	6,320	0,040	0,510	0,010	5,270	0,000	0,000
0,012	6,360	0,040	0,510	0,010	5,300	0,030	0,640
0,012	6,400	0,040	0,510	0,010	5,300	0,000	0,000
0,012	6,400	0,000	0,000	0,010	5,340	0,030	0,640
0,011	6,440	0,040	0,510	0,010	5,370	0,030	0,640
0,011	6,470	0,040	0,510	0,010	5,370	0,000	0,000
0,011	6,470	0,000	0,000	0,009	5,410	0,030	0,640
0,011	6,510	0,040	0,510	0,009	5,410	0,000	0,000
0,011	6,550	0,040	0,510	0,009	5,440	0,030	0,640
0,011	6,550	0,000	0,000				

0,011	6,550	0,000	0,000
0,011	6,550	0,000	0,000
0,011	6,550	0,000	0,000
0,011	6,580	0,040	0,510
0,011	6,620	0,040	0,510
0,011	6,660	0,040	0,510
0,011	6,690	0,040	0,510
0,010	6,730	0,040	0,510
0,010	6,770	0,040	0,510
0,010	6,770	0,000	0,000
0,010	6,800	0,040	0,510
0,010	6,800	0,000	0,000
0,010	6,800	0,000	0,000
0,010	6,800	0,000	0,000
0,010	6,840	0,040	0,510
0,010	6,840	0,000	0,000
0,010	6,880	0,040	0,510
0,010	6,910	0,040	0,510
0,010	6,950	0,040	0,510
0,010	6,990	0,040	0,510
0,010	7,020	0,040	0,510
0,010	7,060	0,040	0,510
0,010	7,060	0,000	0,000
0,009	7,100	0,040	0,510
0,009	7,130	0,040	0,510
0,009	7,170	0,040	0,510
0,009	7,170	0,000	0,000