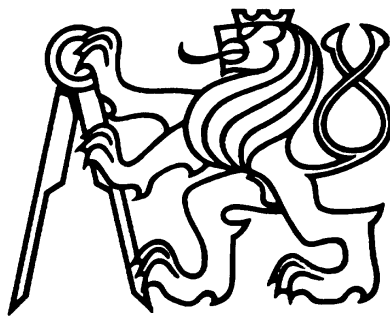


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**Fakulta stavební
Stavební inženýrství
Obor konstrukce pozemních staveb**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Tahová kapacita vysokohodnotného
betonu s ocelovými vlákny**

Autor: **Ivan Kimák**
Vedoucí práce: **Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/2017



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kimák	Jméno: Ivan	Osobní číslo: 423013
Zadávací katedra: K210 - Experimentální centrum		
Studijní program: SI - Stavební inženýrství		
Studijní obor: C - Konstrukce pozemních staveb		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Tahová kapacita vysokohodnotného betonu s ocelovými vlákny	
Název bakalářské práce anglicky: Tensile capacity of high-performance concrete with steel fiber	
Pokyny pro vypracování: Literární rešerše ultra vysokohodnotných a vysokohodnotných cementových kompozitů s rozptýlenou ocelovou výztuží v podobě ocelových mikro vláken. Prozkoumání současného stavu poznání v oblasti mechanických parametrů cementových kompozitů, zejména tahových vlastností. Návrh experimentálního programu pro splnění cílů bakalářské práce, výroba vzorků pro experimentální ověření. Provedení experimentů, vyhodnocení a popsání odezvy cementových kompozitů v přímém tahu. Závěr a shrnutí výsledků, popřípadě návrh na další bádání v dané oblasti.	
Seznam doporučené literatury: Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber, Composite Structures, 2010 Tensile behaviour of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete, Cement and Concrete Composites, 2012 Experimental investigation of mechanical properties of UHPFRC, Procedia Engineering 65, 14-19	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 20.2.2017	Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2017
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Tahová kapacita vysokohodnotného betonu s ocelovými vlákny zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 28. Května 2017

Ivan Kimák

Poděkování:

Chtěl bych zde poděkovat především svému vedoucímu práce Ing. Radoslavovi Sovjákovi, Ph.D. za pečlivost, ochotu, vstřícnost a odborné i lidské zázemí při vedení mé bakalářské práce a velikou míru trpělivosti. Chtěl bych taky poděkovat Ing. Petru Hálovi za vstřícnost a poskytnuté konzultace. Dále děkuji mé rodině, která mi umožnila studium a podporovala mě během celého jeho trvání. Díky patří i mým přátelům za jejich vstřícnost a technickou pomoc, a to hlavně Bc. Petrovi Příbelimu. Na závěr děkuji mé přítelkyni, která mi byla po celou dobu oporou.

Tahová kapacita vysokohodnotného betonu s ocelovými vlákny
Tensile capacity of high-performance concrete with steel fiber

Anotace: Cílem této studie bylo zjištění a popsání materiálových vlastností vysokohodnotného betonu. Pro tyto účely bylo vyrobeno 36 vzorků betonu s rozdílným objemovým zastoupením drátkové výztuže. Tyto hodnoty byly stanoveny jako 0.125; 0.25; 0.5; 1.0 a 2.0 % objemu vzorků. Z každého zastoupení bylo vytvořeno 6 vzorků s výjimkou dvouprocentního zastoupení, pro které bylo vyrobeno vzorků 12. Z této skupiny 12 vzorků byla polovina vystavená poškození, formou zásahu balistickým projektilem. Všechny vzorky pak byly podrobeny zkoušce v prostém tahu. Ze zkoušek se nashromáždili výsledky průběhu tahových sil a napětí spolu s hodnotami poměrné a absolutní deformace. Výsledky pak byly zpracovány a byly vyhodnoceny hodnoty maximální tahové síly, tahové únosnosti, absorbované energie a lomové energie. Získané data slouží k popsání chování materiálu a k popsání jevu tahového zpevnění.

Klíčová slova: UHPFRC, HPRFC, vysokohodnotný drátky vyztužený beton, zkoušky v prostém tahu, lomová energie, tahové zpevnění podle abecedy a oddělená čárkou

Summary: The aim of this study was to describe material properties of high-performance fiber reinforced concrete. For this purpose 36 samples were made, with different value of fibers contained in the samples. This values were set as 0.125;0.25;0.5;1.0 a 2.0% of sample value. For each of the values were created sets of 6 samples, with exclusion of 2% value for which 12 samples were made. Half of this 12 samples were subjected to damage, in form of ballistic impact. All of the samples then underwent uniaxial tensile test. From the test were gathered results of tensile force and tension and also values of strain and sample deformation. Results were then processed and values of maximal tensile force, tensile strength, absorbed energy and fracture energy were evaluated. The gathered results serve for better description of material behavior and for description of process of tensile hardening.

Key words: UHPFRC, HPRFC, high-performance fiber reinforced concrete, uniaxial tensile test, fracture energy, tensile strength

Obsah

1	Úvod	1
2	Literární část	2
2.1	Beton jako stavební materiál	2
2.1.1	Historie betonu	2
2.1.2	Využití betonu	3
2.1.3	Složení betonu	3
2.1.4	Vlastnosti betonu	4
2.1.5	Rozdělení betonu	4
2.2	Vysokohodnotný drátky vystužený beton - UHPFRC	4
2.2.1	Složení	5
2.2.2	Rozdělení	5
2.2.3	Vlastnosti UHPFRC	6
2.2.4	Materiálové zkoušky betonu	6
3	Experimentální část	9
3.1	Záměr práce	9
3.2	Tahové zkoušky UHPFRC	9
3.2.1	Tvar vzorků	9
3.2.2	Složení vzorků	11
3.2.3	Metodika měření	12
3.3	Tahové zkoušky balisticky poškozených prvků	14
3.3.1	Tvar vzorků	14
3.3.2	Složení vzorků	14
3.3.3	Metodika měření	14
3.4	Měřené veličiny	15
3.4.1	Tahová síla	15
3.4.2	Tahové napětí	16
3.4.3	Absorbovaná a lomová energie	17
3.4.4	Charakteristická hodnota únosnosti	19
4	Výsledky a diskuze	22
4.1	Absorbovaná a lomová energie	22
4.2	Balisticky poškozené vzorky	29
4.3	Charakteristická hodnota pevnosti	31

Kapitola 1

Úvod

V dnešní době dochází k rychlému vývoji nových technologií a to ne jen v oborech elektrotechniky ale i ve stavebnictví. Materiálové inženýrství neustále dosahuje nových pokroků ve vývoji stavebních materiálů. Mezi významné pokroky patří vývoj vysokohodnotných betonů. Tyto kompozity kombinují vysokou tlakovou pevnost betonu s tahovou únosností ocele ve formě rozptýlených ocelových drátů. Takovéto vysokohodnotní betony s ocelovými vlákny, neboli zkráceně UHPFRC (z ang. *ultra high-performance fiber reinforced concrete*, se od běžných betonů liší hlavně vysokou tahovou únosností, vyššími hodnotami tlakové únosnosti a taky vyšší schopností plastické deformace tedy duktilitou. Jejich komerční využití je však limitováno vysokými finančními nároky na výrobu a zpracování. Proto je potřebné tento materiál nadále zkoumat a hledat nové metody, které by dosáhly co nejefektivnějšího využití materiálu s důrazem na omezení výrobních nákladů. To je jednou z hlavních motivací této práce.

Cílem práce je ověření a popsání materiálových vlastností vysokohodnotného betonu v závislosti na objemovém zastoupení drátkové výztuže. A to hlavně hodnot jeho tahové únosnosti a množství energie absorbované při rozevírání tahových trhlin. Tato veličina je označována jako lomová energie a slouží k popsání jevu tahového zpevnění, ku kterému dochází při rozvoji tahové deformace. Pomocí těchto dat se docílí lepšího popsání chování materiálu.

Tato práce se skládá z pěti kapitol. Literární část se zabývá objasněním problematiky výroby, rozdělení, využití a laboratorního testování betonu. Experimentální část popisuje postupy a technologie použité pro účely této práce. Kapitola Výsledky a diskuze se pak věnuje vyhodnocení získaných dat a popisu rozdílů mezi vzorky s rozdílným vyztužením. Poslední kapitolou je Závěr, v kterém jsou zhrnuty výsledky práce.

Kapitola 2

Literární část

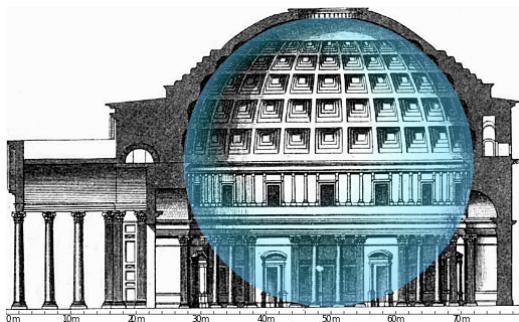
2.1 Beton jako stavební materiál

2.1.1 Historie betonu

Beton našel využití již v starověku, s využitím pojiva podobného dnešnímu cementu. Jednalo se o formu prostého betonu, který využívali Peršané, Kartaginci a Římané. Ti vytvořili pojivo z kombinace vápenné malty a sopečného tufu, které nazývali opus concretum. Mezi nejstarší betonové stavby patří Pantheon v Římě, obrázek (2.1), dostavěn v roce 27 př.n.l. nebo Caracallový lázně z 3. století. Beton se taky používal pro stavbu vodovodních potrubí nebo akvaduktů [1].

Rozšíření použití betonu v moderní době, začalo koncem 19. stol. Jeden z prvních patentů pro železový beton získal pařížský zahradník Joseph Monier, pro výrobu nádob a nádrží ze železa a cementu. Od této doby se začala technologie betonu postupně vyvíjet. První teorii navrhování betonu vydali Edmund Coignet a Nicola de Tédesco v roce 1894.

První budovou z prefabrikovaného betonu bylo kasino v Biarritz, vystavěné v roce 1891. Následováno komorovým mostem Risorgimento z roku 1900, který je zobrazen na obrázku 2.2, který navrhnul Hennebique. Od začátku 20. stol. pak dochází k prudkému rozvoji technologie betonu [1].



Obrázek 2.1: Římský panteón [2]



Obrázek 2.2: Komorový most Risorgimento [3]

2.1.2 Využití betonu

Beton je využit v nespočtu typů staveb, či už bytové domy, mrakodrapy nebo stadiony. Nemusí se ale jednat jen o mohutné stavby, ale taky tenké skořepiny využitě jako střechy s velkým rozpětím. V dopravním stavebnictví je využit hlavně při stavbě mostů, tunelů, podzemních zásobníků, ale taky pro výrobu pražců pro koleje. V geotechnice se jedná o nejvyužívanější materiál používán na výrobu základů. Kupříkladu základové desky, patky, ale taky na stavbu pažení jako mikropilotové stěny, nebo stěn hloubených tunelů.

Koncem 20. století došlo k zdokonalení technologie betonu a začal se využívat ve výrobě předpjatých konstrukcí. Použitím výztuže s již vneseným napětím, se dalo docílit využití betonových nosníků velkých délek, nebo zmenšení průřezu nosníku se zachováním jeho únosností. Tato metoda je však finančně náročnější a je skoro výhradně použitelná jen pro prefabrikované prvky. Jednou z ukázek této technologie, je použití předpjatých stavebních dílců na výstavbu bytových domů stavěných 80-tých letech minulého století na území vtedejšího Československa.

V dnešní době je beton nejrozšířenější stavební materiál s odhadovanou celosvětovou produkcí 10 miliard tun ročně. Škála jeho využití je takřka neomezená a nekončí jenom u stavebního průmyslu. Čím dál víc se využívá i jako materiál pro bytové doplňky a nábytek.

2.1.3 Složení betonu

Beton je kompozitní materiál složený z pojiva, plniva, vody, přísad a příměsí.

Jako pojivo nejčastěji slouží cementový tmel, tvořený cementem a vodou. Běžným příkladem je portlandský cement, který je jeden z nejvíc užívaných cementů. Ale s pokračujícím vývojem technologie se začínají využívat pojiva jako sádra, živice, ale taky i umělé polymery.

Nejvyužívanějším plnivem je přírodní kamenivo různých frakcí nebo taky jemný písek. V speciálních druzích betonu se používají i materiály jako polystyrén, polyuretanová pěna nebo umělé kamenivo jako keramzit. S postupným vývojem technologií a společnosti se klade vyšší důraz na znovuvyužívání nerostných zdrojů. Proto se čím dál ve větší míře přistupuje k využití recyklovaných stavebních materiálů jako plniva do betonu. Jedním z mnoha příkladů může být cihelný střep vzniklý rozdrčením demolovaných zděných konstrukcí. Taky se může využít i drcený beton, a to buď jako produkt demolice nebo poškozené a nevyhovující vzorky z prefabrikace.

Přísady jsou chemické látky používané pro úpravu mechanických a chemických vlastností betonu. Můžou to být různé plastifikátory nebo superplastifikátory určené k snížení potřebného objemu záměsové vody. Nebo taky inhibitory a aktivátory sloužící k zpomalení respektive k urychlení procesu tuhnutí. Prodloužením doby tuhnutí lze získat čas potřebný na převoz tekutého betonu z betonárny na staveniště bez rizika jeho zatuhnutí v automixu. Na druhou stranu pomocí urychlení tuhnutí procesu, dosáhne beton plné pevnosti v kratším čase, co výrazně urychlí výstavbu. Dalšími přísadami jsou například provzdušňovače nebo napěňovače často využity na snížení hmotnosti betonu a zlepšení jeho tepelně izolačních vlastností. Celkově s vývojem moderních technologií se využívá větší spektrum chemických látek, které umožňují úpravu specifických vlastností betonu dle potřeb stavebníku.

2.1.4 Vlastnosti betonu

Nejvýznamnější materiálovou vlastností je rozhodně jeho pevnost v tlaku, běžně dosahující hodnot 60 MPa. U vysokohodnotných betonů může dosáhnout i hodnoty přes 150 MPa. To dělá z betonu skvělý materiál hlavně pro stavbu svislých nosních konstrukcí. Ve více podlažních rodinných nebo obytných domech se tak dá docílit použití tenčích konstrukcí než u zdiva, které s narůstající výškou objektu musí nabývat na šířce.

Na druhou stranu tahová pevnost dosahuje přibližně jenom desetinu hodnoty pevnosti v tlaku. To je způsobené nízkou schopností pružné deformace materiálu zapříčiňující vznik tahových trhlin a následného průhybu nebo kolapsu konstrukce. Proto je u prvků namáhaných ohybem nutno vyztužovat ocelovou výztuží ve formě prutů, lan, tyčí nebo velkého množství ocelových drátů. Ocel je pro toto využití nejvhodnější, protože hodnoty teplotní roztažnosti betonu a oceli jsou řadově stejné. To vede k zamezení vzniku trhlin při vyšším teplotním zatížení.

Jedná se o materiál s velkou mechanickou odolností. To se týká hlavně odolnosti proti vrypu, na druhou stranu s pevností betonu taky narůstá jeho křehkost, co může vést k odštípení materiálu na hranách prvků [1]. Beton je náchylný na působení agresivních chemických látek. To se projevuje například karbonací v betonu v okolí výztuže, nebo výkvěti solí na povrchu betonu. Výrazné riziko představuje i alkalicky křemičitá reakce, ta může nastat jestli se v kamenivu zaneše do betonu amorfní křemík. Následnou reakcí s oxidem hlinitým obsaženém ve slínku dochází k vzniku gelů s větším objemem než měli původní reaktanty, to vede k vzniku velkého množství trhlin v celém objemu betonu [4].

2.1.5 Rozdělení betonu

Beton se může dělit podle nespočtu kritérií, nejčastější dělení je dle objemové hmotnosti a to na betony lehké obyčejné a hutné. Lehké betony jsou betony s objemovou hmotností do 2000kg/m^3 využívaný hlavně kvůli jejich izolačním vlastnostem. Betony s hodnotami mezi 2000 až 2600kg/m^3 jsou označovány jako obyčejné a využívají se pro stavbu nosních konstrukcí. Nad hranicí 2600 kg/m^3 se jedná o hutné betony, které se používají například na odstínění záření [1].

Dále se mohou specifikovat dle konstrukčních vlastností, hutnosti a jiných. Taky se může třídít na základě specifických vlastností nebo složení jako je například voděodolný beton pro výrobu bílých van.

2.2 Vysokohodnotný drátky vystužený beton - UHPFRC

Vysokohodnotný drátky vystužený beton zkráceně UHPFRC, je relativně moderní druh betonu vyznačující se vysokou pevností a využitím rozptýlených ocelových drátů jako rozptýlené výztuže v celém jeho objemu. Beton je klasifikován jako UHPFRC jestli dosahuje pevnosti v tlaku minimálně 150 MPa [5]. Kvůli jeho vysoké ceně a nárokům na spotřebu energie při výrobě, není příliš rozšířený v komerčním využití. Jedním z prvních komerčních a celkově nejčastějších využití je betonáž vrchních vrstev vozovky betonových mostů.

2.2.1 Složení

UHPFRC je specifický nízkou hodnotou vodního součinitele a využitím jemného kameniva jako plniva. Jako pojivo může sloužit běžný portlandský cement. Díky jeho použití se ulehčuje proces dosažení normových požadavků na výsledný kompozit z hlediska fyzikálních a chemických vlastností. Jako například kontrola rychlosti tvrdnutí, zpracovatelnost, dosažení předem daných vlastností a jiné [6].

Kamenivo bývá co nejmenější, to napomáhá co nejlepšímu obalení zrn cementovým tmelem. Často se využívá micro- nebo nano-silica, oba jsou velmi jemný křemičitý prach vznikající jako vedlejší produkt při výrobě křemičitých slitin. Taky se využívají písky a to buď, frakce 0-1 nebo 0-2. Tyto písky se využívají hlavně z ekonomických důvodů.

Jako rozptýlené vyztužení se využívají tenké ocelové drátky. Třemi základními druhy jsou: dlouhé rovné drátky (LSF), délky 13 mm a průměru 0.2 mm; krátké rovné drátky (SSF), délky 6 mm a průměru 0.16 mm; zakřivené drátky (HF), délky 35 mm a průměru 0.55 mm [7]. Drátky zabraňují vzniku mikrotrhlin v betonu a taky vytvářejí tahové zpevnění při rozevírání tahové trhliny zatíženého prvku.

Drátky se běžně přidávají v množství mezi 0,5 - 3% celkového objemu, ale vyrábějí se taky betony s víc než 5% drátku. Ukázka těchto drátku je zobrazena na obrázku 2.3



Obrázek 2.3: Drátková výstuž v množství přibližně 150g

2.2.2 Rozdělení

UHPFRC můžeme dělit dle „klasifikační schéma výkonu“ z anglického „Performance classification scheme“, předložené A.E. Naamanem a H.W. Reinhardtem. Ti dělí cementové kompozity do čtyř skupiny, a to dle únosnosti: 1) změkčení průhybu nebo omezení trhlin beze výrazné změny mechanických vlastností, 2) ohybového zpevnění, 3) tahového zpevnění a 4) vysoké absorpce energie. Zavedena byla taky skupina 0, která ilustruje chování kompozitu bez drátku [8].

Pro rozlišení mezi skupinami 3 a 4 zavedli proměnou g , ta vyjadřuje množství energie, kterou prvek absorbuje před rozvojem tahových trhlin. Aby se mohl prvek zatřídit do skupiny 4 musí být hodnota $g > 50 \text{ kJ/m}^3$. Jedná se zatím jen o hodnotu doporučenou, a to kvůli nedostatečnému množství dat z předcházejících výzkumů. Výzkum K. Willa a kol. zaznamenal hodnoty $g = 304 \text{ kJ/m}^3$ pro Sifcon-UHP-FRC s 5.5% objemem drátku a $g = 128$

kJ/m^3 pro UHP-FRC s 1% objemem drátku [8]. Jungwirth a Muttoni zaznamenali hodnoty $g = 25 \text{ kJ/m}^3$ pro Ceracem©s 2.5% objemem drátku [9].

2.2.3 Vlastnosti UHPFRC

Základními vlastnostmi, které odlišují UHPFRC od běžných betonů jsou hodnoty jeho pevnosti v tlaku a hlavně v tahu.

Jak už bylo spomenuto výše, tyto betony dosahují tlakovou pevnost nad 150 MPa. Některé moderní výzkumy prokazují i hodnoty v mezích 250 MPa [10]. UHPFRC se taky vyznačuje náhlým porušením při dosažení tlakové únosnosti.

Nejvýznamnější vlastností tohoto betonu je ale jeho pevnost v tahu. Ta může dosahovat i hodnoty nad 15 MPa a pevnost v ohybu výše 50 MPa [11]. Od běžného betonu se odlišuje hlavně tahovým zpevněním, které probíhá při rozevírání tahových trhlin, zapříčiněno přenášením tahového napětí ocelovými drátky.

Mezi další významné vlastnosti patří jeho vysoká trvácnost, duktilita, odolnost proti vrypu a poškrábání, odolnost proti karbonataci a jiné [11]. Díky přidaným plastifikátorům je taky dobře samozhutnitelný a často nevyžaduje použití vibrátorů na stavbě [5].

2.2.4 Materiálové zkoušky betonu

Pro zjištění tlakové pevnosti se pro UHPFRC využívají běžné zkoušky na krychli nebo válci. Ty se nijak neodlišují od běžných zkoušek.

Tahové zkoušky jsou pro UHPFRC složitější. Běžné zkoušky v tahu za ohybu, pro 4 bodovou ohybovou zkoušku vyžadují velké množství následujících výpočtů. Proto se radši volí zkoušky v prostém tahu. Pro ty existuje velké množství metod, lišících se tvarem vzorku a jeho uchycením v testovacím stroji. Zapříčinují to rozdíly v chování prvku v různých stádiích porušení a hlavně schopnost tahového zpevnění betonu.

Zatím co AFGC-SETRA (Francouzská asociace pro stavební inženýrství) [12] a JSCE (Japonská asociace pro stavební inženýrství) [13] udávají doporučené postupy pro zkoušky, v současnosti neexistují žádné technologické standarty, jak provádět zkoušky. [5]

Běžným způsobem je vytvoření zářezu nebo zúžení na vzorku, to pomáhá lokalizaci trhlin do předem dané oblasti. Takovéto vzorky jsou vhodné pro pozorování plastického chování jak prostého, tak drátky vyztuženého betonu. Tato zkouška však není vhodná pro zaznamenání chování vzorku počas tahového zpevnění betonu. [5]

Další metodou testování je použití vzorku čelem nalepeného k testovacímu přístroji. Pomocí zkoušky se dá přesně určit pružné chování vzorků před vznikem trhlin. Pro testování tahového zpevnění není využitelná, protože při přílišném zatížení často dochází k porušení uložení vzorku, zapříčiněno nedostatečnou pevností spoje. [14] Nalepením vzorku po stranách se však dají získat vhodné výsledky. Je ale třeba dbát na to, aby měřená oblast byla vzdálená od konců prvků, aby se zabránilo vlivu zatížení od uchycení na výsledky. [5]

Pro zachycení tahového zpevnění se využívají zkoušky na vzorcích tvaru takzvaného „dogbone“. Tyto vzorky mají specifickou geometrii, střední část konstantního průřezu, podporující vznik více trhlin, velký průřez v oblasti podpor aby se předešlo porušení v místě

uchycení a průběžní přechod mezi oblastí podpor a středovou částí. Zkoušky se mohou lišit metodou uložení prvků, podle počtu stupňů volnosti, které vzorku umožňují. [5]

Ve většině studií se využívají různé metody, určené dle specifikací experimentů a typu potřebných výsledků. Různé typy tvaru vzorků je možné vidět na obrázku 2.4. Na obrázcích (1) až (5) jsou uvedeny vzorky tvaru „dogbone“, lišící se přesnou geometrií. U vzorku (1) jsou patrné lineární náběhy, zatímco u vzorků (2) a (3) mají náběhy klotoidický tvar, tyto dva se pak liší šířkou zúžené oblasti. Vzorky (4) a (5) znázorňují použití dvojitého zúžení, liší se pak celkovou délkou prvku. Obrázky (7) až (8) zobrazují neprofilované vzorky, které se odlišují poměrem šířky ku délce a taky způsobem ukotvení. Na posledních obrázcích (9) až (11) jsou ukázané vzorky se zářezem. Ty mají u obrázku (9) a (10) obdélníkový tvar a u prvku (11) zářez vzniká jako důsledek oboustranného zúžení vzorku.

	Tvar vzorku	Materiál	Skupina únosnosti	Délka, šířka a výška zúžené oblasti (celková délka vzorku) v (mm)		
				l	b	h
(1)		UHP-FRC	4	80	30	13
				(330)	(60)	(13)
(2)		HPFRCC	3-4	80	24	40
				(240)	(40)	(40)
(3)		HPFRCC	4	152	38	76
				(200)	(40)	(25)
(4)		HPFRCC	3	200	50	13
				(525)	(125)	(13)
(5)		UHP-FRC	3-4	178	51	25
(6)		FRC	<3	127	127	28
				(330)	(127)	(28)
(7)		FRC/ECC	3/4	205	76	13
				(305)	(76)	(13)
(8)		UHP-FRC	3	102	51	51
(9)		FRC	<3	2	51	51
				(152)	(76)	(76)
(10)		FRC	<3	3	42	50
				(55)	(60)	(50)
(11)		FRC	2	1	51	13

Obrázek 2.4: Ukázka různých tvarů vzorků používaných pro zkoušky v prostém tahu. Vzorky (1) až (5) představují prvky tvaru „dogbone“, obrázky (6) až (8) znázorňují neprofilované vzorky a obrázky (9) až (11) ukazují tvar vzorků se zářezem [5]

Kapitola 3

Experimentální část

3.1 Záměr práce

Cílem této práce bylo charakterizovat chování prvků z UHPFRC vyvinutého experimentálním centrem na Fakultě stavební, ČVUT. Přesněji zkoumáním jevu tahového zpevnění při porušení tahovým zatížením a určením absorbované a lomové energie prvku. A vlivu procentuálního zastoupení vyztužení na toto chování.

Testované byly prvky tvaru "dogbone", jejichž přesné geometrické a materiálové specifikace jsou uvedené v další podkapitole 3.2.1. Nad rámec tohoto výzkumu, táto práce navazuje na další výzkum prováděný fakultou, který se věnuje zkoumání odolnosti UHPFRC proti balistickému poškození. Kromě původních prvků se tedy testovali i prvky porušené zásahem střely.

3.2 Tahové zkoušky UHPFRC

3.2.1 Tvar vzorků

Pro záměry této práce byly zvolené prvky tvaru „dogbone“. Tento tvar je totiž ze všech geometrických tvarů nejvhodnější pro pozorování tahového zpevnění. Jak už bylo zmíněno výše v sekci 2.2.4 tyto vzorky mají specifický tvar, který nemá jednotné standardizované rozměry. Ve většině studií si výzkumné skupiny sami určují přesné geometrické rozměry podle požadavků vyžadovaných zkouškou. V tomto případě byl použit tvar nejvhodnější pro použití dostupné testovací technologie. Na jejich výrobu byly použity formy vyrobené na míru pro potřeby tohoto výzkumu.

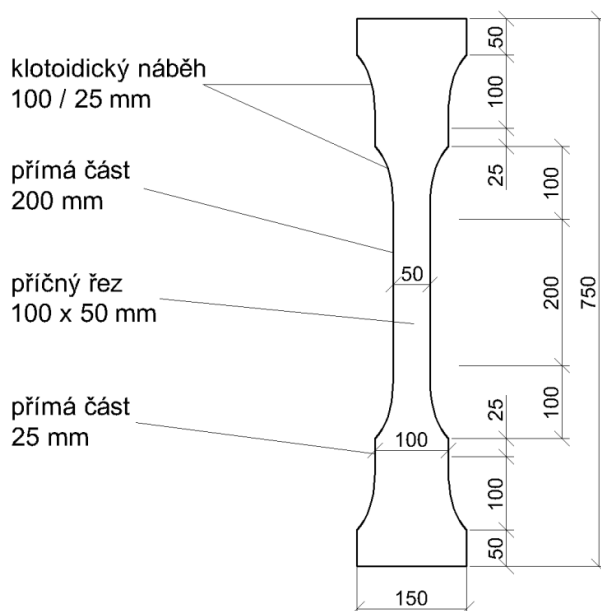
Tyto formy jsou k vidění na obrázku 3.1. Jsou tvořené dvěma rovnoběžnými, železnými bloky uloženými na základně. Tyto bloky mají specifický profil a po složení formy vytvoří negativ požadovaného prvku. Na koncích jsou uzavřeny pomocí desek, které taky slouží k uchycení šroubů nesoucích kovové plotny zpevňující formu. Díky těmto plotnám je zaručeno přesné sestavení formy. Aby se zaručilo jednoduché vyjmutí vzorků, bez rizika jejich poškození byli formy před každým použitím natřeny odbedňujícím přípravkem. Pro tento účel byl použit minerální olej.

Jako i ostatní vzorky tvaru „dogbone“, jsou i tyto charakteristické zúžením v středové části, použitým pro lokalizaci trhlin a s postupným náběhem k širším podporám. Přesný tvar můžete



Obrázek 3.1: Formy vzorků před naplněním

vidět na obrázku 3.2. Od ostatních studií se liší přesnými rozměry a způsobem uchycení. Celková délka prvku je 750mm a s délkou zúžení 200mm. To poskytuje větší délku vhodnou pro vznik trhlin oproti jiným vzorkům. Průřez v místě zúžení má tvar obdélníku s rozměry 50x100mm, se šířkou 50mm v rovině profilování prvku. Větší plocha zaručuje vyšší tahovou únosnost. V důsledku čeho dosáhneme zaznamenání větší škály výsledku, čím se zpřesní finální výsledky. Náběhy mají klotoidický tvar s dvěma zlomy. Ty jsou přizpůsobené pro lepší úchyt kotvami stroje. Postupné rozšíření snižuje riziko porušení na koncích užších části prvku. Pomocí náběhu se zvýší šířka prvku z 50 na 150mm.



Obrázek 3.2: Přesné rozměry vzorku dle [15]

3.2.2 Složení vzorků

Na výrobu vzorků byli použity tři základní složky, a to voda, suchá cementová směs a ocelové drátky. Drátky se do prvků přidávali v různém objemovém zastoupení od 0,125 až 2% hmotnostního objemu. A to z důvodu zjištění jejich vlivu na tahovou únosnost betonu.

Záměsová voda neprošla žádnou speciální úpravou a jedna se tedy o běžnou kohoutkovou vodu.

Nejdůležitější ze všech surovin je cementová směs, jelikož má největší vliv na výsledné vlastnosti betonu. Jedná se hotovou mixturu pojiva, plniva, přísad a příměsí. Jako pojivo slouží portlandský cement u něhož sou kontrolovány obsahy jednotlivých chemických složek slínku. Jedná se hlavně o obsah oxidu hlinitého Al_2O_3 a oxidu železitého Fe_2O_3 . Směs dále obsahuje plastifikátory pro snížení potřebného obsahu záměsové vody. Dále se přidávají jemné frakce látek pucolánového charakteru, a to až v množství 50% objemu cementového slínku. Jako další složky se přidávají alkalické uhličitany, odpěňovač a síran vápenatý alespoň v jedné formě. Poslední složkou směsi jsou hrubozrnná plniva, ty mohou být v zastoupení šestinásobně vyšším než pojivová matrice [6]. Procentuální zastoupení všech látek můžeme vidět v tabulce 3.1.

Suchá cementová směs	
Složka	Obsah (objm. %)
Pojivová matrice (PM):	
Cementový slínek (CS)	
CaO	60-65
SiO ₂	20-25
Al ₂ O ₃	2-12
Fe ₂ O ₃	<8
Plastifikátor	0.01-8 CS
Síran vápenatý	<4 SO ₃
Odpěňovač	<1 CS
Alkalické uhličitany	<2 CS
Jemná frakce	<50 CS
Hrubozrnná plniva	<600 PM

Tabulka 3.1: Složení suché cementové směsi[6]

Jako ocelová drátková výztuž byl použitý ocelové neprofilované drátky s tahovou pevností 2000 MPa [5]. Drátky nebyli opatřeny žádnou koncovou úpravou, protože při vyšším procentuálním zastoupení nedochází ve větší míře k vytrhování jednotlivých drátů z betonu. Délka a průměr drátů jsou 13x0.15mm z toho vychází poměr l/d je 86. Drátky byli přimíchány do hydratované cementové směsi v polovině míchacího procesu. Aby se zamezilo jejich uspořádání kolmo k delší ose vzorku byla cementová směs do formy ukládána ve více vrstvách. Jak už bylo uvedeno drátky byli přidávány v různém zastoupení. Přesněji 0.125; 0.25; 0.5; 1.0 a 2.0 % z každého typu byla vyrobena série alespoň šesti vzorků. Podle množství použité výztuže se upravilo i zastoupení ostatních složek, a to úpravou vodního součinitele, tedy podílu vody a suché směsi. Hodnoty vodních součinitelů v závislosti od procenta

vyztužení jsou uvedeny v tabulce 3.2. Tyto hodnoty byly upraveny dle doporučení Doc. Ing. Karla Koláře, CSc. z Fakulty stavebné. Z každé série pak byli vybrány tři vzorky nejlépe odpovídající podmínkám zkoušky. Po betonáži byli všechny vzorky uloženy do kádě s vodou, a to na dobu alespoň 28 dní. To z toho důvodu, aby se zaručilo jejich úplné ztuhnutí a dosažení finálních hodnot pevnosti.

Tabulka 3.2: Hodnota vodního součinitele dle procenta drátku

Objemové zastoupení drátku %	Vodní součinitel
0	0.3
0.125	0.30125
0.25	0.3025
0.5	0.305
1	0.31
2	0.32

Jednotlivé složky můžeme vidět ještě před zpracováním na obrázku 3.3.



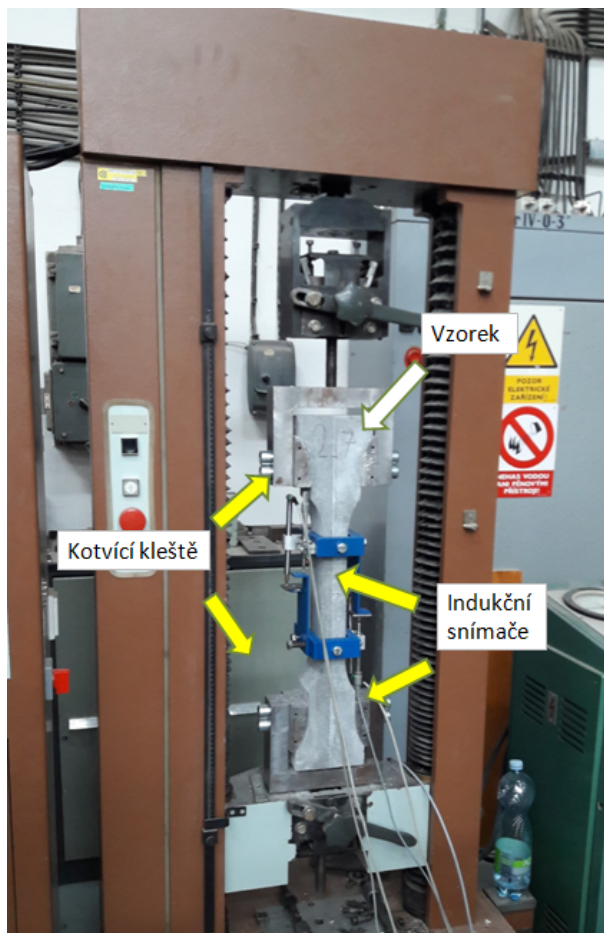
Obrázek 3.3: Na obrázku jsou znázorněny všechny součásti betonové směsi

3.2.3 Metodika měření

Všechny vzorky byli podrobeny zkoušce prostým tahem. Oproti zkoušce čtyř bodovým ohybem, tato zkouška přináší lepší náhled do chování betonu v tahu. Taky ulehčuje interpretaci získaných dat, bez potřeby velikého množství kalkulací kvůli převodu výsledku z ohybového chování na čisto tahové. Takováto zkouška je mnohem složitější na provedení oproti ohybové, ale takto získané výsledky jsou mnohem přesnější.

Před zkouškou bylo potřebné selektovat vzorky nejvíce se hodící na použití. Vybrané vzorky byli opatřeny tenzometry, a to z obou stran zúžené části vzorku, přibližně ve středu výšky vzorku. Tyto tenzometry slouží na zaznamenání přetvoření vzorků v průběhu zkoušky. Dva byli použity pro zamezení případné chyby měření způsobené povolením jednoho tenzometru nebo jeho poškozením. Takto připravené vzorky byli následně podrobeny zkoušce. Do testovacího stroje byli upevněny pomocí kotev na obou koncích. Tyto kotvy byli taky

opatřeny měřicí přetvoření. Na obrázku 3.4 můžeme vidět průběh takovéto zkoušky. Je možné pozorovat i vznikající trhlinu v střede vzorku.



Obrázek 3.4: Probíhající tahová zkouška UHPFRC. Na obrázku jsou popsány důležité části testovacího stroje a měřicí soustavy. Měřiče byly celou dobu připojené k počítači, který shromažďoval data s frekvencí 10 měření za vteřinu

Zkouška probíhala postupným zvyšováním síly působící na vzorek. Všechny čidla umístěná na prvku zaznamenávali všechny změny s frekvencí 10 měření za vteřinu. Celkové trvání zkoušky bylo v rozmezí 50-60 minut. V průběhu zkoušky došlo k překročení tahové únosnosti betonu, což vedlo k vzniku a rozevírání tahové trhliny na vzorku. Při tomto procesu došlo k poškození tenzometrů z důvodu jejich přílišného protažení. Proto se od tohoto okamžiku musí využít hodnoty naměřené čidly na kotvách stroje.

Testování bylo ukončeno když se velikost naměřené síly přiblížila k hodnotě 0 kN, z čehož vyplývá, že prvek již nepřenáší žádné zatížení a tedy byl roztržen na dvě poloviny. Na obrázku 3.5 můžeme vidět přetržený vzorek i s poškozeným tenzometrem.

Výsledky pak byli zpracovány a interpretovány dle postupu specifikovaného v kapitole 3.4. Ne všechny výsledky však mohli být využity, protože u některých vzorků došlo k vzniku trhlin mimo oblast zúžení. Trhliny vícekrát vznikly v oblasti náběhů, tedy nebyli získané žádné měření z tenzometrů. Bez těchto hodnot bylo nemožné přesně vyhodnotit chování prvků.



Obrázek 3.5: Ukázka tahového poškození

3.3 Tahové zkoušky balisticky poškozených prvků

Kromě testování běžných prvků byly zkoušky vykonány i na vzorcích podrobených balistickému poškození. Tyto testy byly provedeny pro obohacení výsledku získaných jinými studii provedenými na katedře 210 [16], týkajících se balistické odolnosti UHPFRC.

3.3.1 Tvar vzorků

Použité vzorky byly tvaru „dogbone“, zodpovídajícího prvkům použitých při tahové zkoušce nepoškozených vzorků. Jejich přesné specifikace jsou uvedeny v kapitole 3.2.1.

3.3.2 Složení vzorků

Složení cementové směsi bylo stejné jako při předcházejících zkouškách. Jediným rozdílným faktorem bylo využití ocelových drátů. Ty byly pro všechny vzorky použity v zastoupení 2% objemové hmotnosti celkové betonové směsi. Podíly jednotlivých složek jsou uvedeny v kapitole 3.2.2.

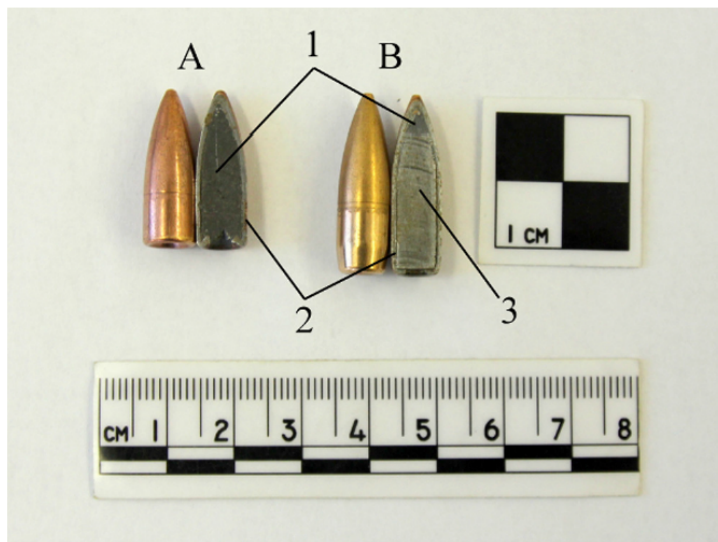
3.3.3 Metodika měření

Příjme testování se nijak nelišilo od postupu použitého v kapitole 3.2.3. Rozdílná však byla příprava jednotlivých vzorků.

Po 28 dnech od vybetonování, tedy po dosažení plné pevnosti byli vzorky podrobeny balistickým zkouškám. Jednotlivé vzorky byli uchyceny na speciální stojan a byli opatřeni kovovým rámečkem sloužícím na vymezení oblasti prvku, která bude podrobena střelbě. Ta měla tvar čtverce se středem centrováním na střed betonového prvku. Pak byl každý vzorek zasažen jednou střelou.

K zkoušce byli použity dva druhy střel, a to 1) deformovatelný projektil s měkkým olověným jádrem (Full metal jacket with soft-lead core) a 2) nedeformovatelný projektil s jádrem z měkké ocele (full metal jacket with mild-steel core)[16]. Oba s hmotností 8.04g. Můžeme je vidět na obrázku 3.6. Projektily byli vystřeleny z poloautomatické pušky CZ 858, kalibru 7.62 x 39, která je civilní verzí původní Československé armádní pušky SA-58[16].

Rozdíl v použité munici je patrný na poškození způsobeném jednotlivými projektily. Zatímco deformovatelný projektil za sebou zanechal kráter jenom na zasažené straně, nedoformovatelný projektil ve všech případech pronikl celou šířkou vzorku. Takto vznikly na obou stranách vzorku dva krátery propojené kanálkem kterým proletěl projektil. Střelbě bylo podrobena šest vzorků, tři zásahu deformovatelným projektilem a tři nedoformovatelným projektilem.



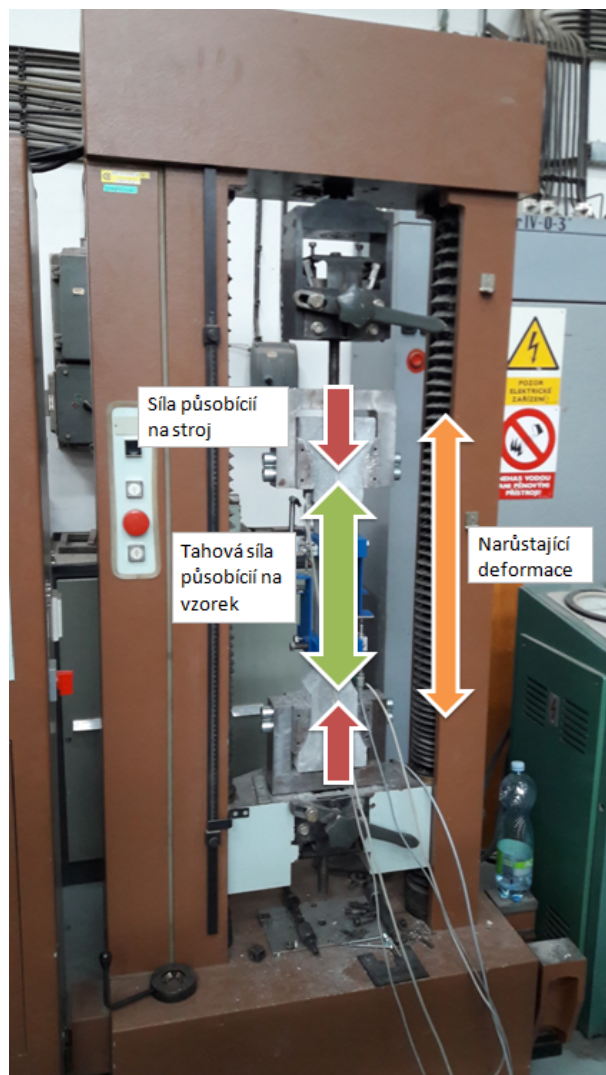
Obrázek 3.6: Ukážka obou typů využitých projektilů [16]. Projektil A je deformovatelný projektil s měkkým olověným jádrem. Projektil B je nedoformovatelný s jádrem z poloměkké oceli 1) měkké olovo 2) mosazný plášť 3) poloměkká ocel

Před tahovou zkouškou bylo ještě potřebné změřit rozměry vzniklých kráteru. Měřili se geometricky jak plocha kráteru na hraně stěny prvku a jeho hloubka. Následně se krátery vysypali přesně odměřeným objemem jemného keramického písku. Pomocí všech získaných dat se vyhodnotil vliv poškození prvku na jeho tahovou únosnost.

3.4 Měřené veličiny

3.4.1 Tahová síla

Základní veličinou získanou z tahové zkoušky je hodnota působící tahové síly F . Sílu na prvek zaváděl testovací přístroj, a to za pomoci rozevírání kleští, v kterých byl prvek ukotven. Takto vytvářel konstantně se zvyšující deformaci. Síla se projevovala jako odpor vzorků proti deformaci, kterou stroj vyvolával, proto po přetržení došlo u prvku ku klesnutí hodnoty k 0 kN. Kleště se pak mohli plynule rozevírat bez toho, aby na ně prvek působil. Po celou dobu měření snímač zaznamenával hodnotu této síly s frekvencí 10 měření za vteřinu. Podle zákona akce a reakce se pak síla působící na stroj rovná síle působící na prvek v opačném směru. Grafické znázornění působících sil je zobrazeno na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7: Na obrázku jsou vyznačeny síly působící na vzorek a směr deformace vyvolané přístrojem

Hodnotou využitou pro hodnocení chování materiálu byla působící síla v momentu dosažení tahové únosnosti. Velikost síly pak mohla narůst nad tuto hodnotu, no to jen jako projev tahového zpevnění. Na prvku se už totiž vytvořila trhлина a deformace už byla nevratná. Pomocí této síly bylo ohodnocené chování balisticky poškozených prvků.

3.4.2 Tahové napětí

Celkově nejpoužívanějším faktorem pro zhodnocení materiálových vlastností je jeho pevnost. Ta je vyjádřena buď jako maximální tlakové nebo tahové napětí, které může na daný vzorek působit aby nedošlo k jeho porušení. Běžným příkladem může být beton pevnostní třídy 20/25, kterého tlaková pevnost je 20 MPa, nebo tahová pevnost 1,5 MPa. Pro ocel a jiné materiály s vysokou plasticitou se může uvádět i napětí, při kterém dochází k

splatizování průřezu, takzvaná mez kluzu. Jako příklad slouží běžná betonářská výztuž B500B, která dosáhne meze kluzu při zatížení 500 MPa.

Hodnotu napětí získáme z hodnot působící síly a plochy průřezu testovacího prvku. A to pomocí základního vzorce pro napětí uvedeného v rovnici 3.1.

$$\sigma = F/A = [N]/[m^2] = [Pa] \quad (3.1)$$

Do momentu vzniku trhlin se jako průřezová plocha, využívá plocha smluvního průřezu. Ten je určen jako průřez v místě namáhání prvku, v rovině kolmé na hlavní osu prvku. Po porušení prvku je využita celková plocha průřezu vzniklého při porušení prvku. Jelikož u vzorků dochází k porušení blízkého k rovinnému tvaru používá se k vyhodnocení tahové pevnosti velikost plného průřezu. U vzorků, při kterých je porušení velmi nepravidelné je potřebné vymodelovat porušení nebo ho naskenovat pomocí laseru, aby bylo možné získat co nejpřesnější hodnotu tahové únosnosti. Ukázkou rovinné trhliny možno vidět na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: Tahová trhlina s přibližně rovinným průřezem. K rozvoji trhliny došlo v předpokládané části prvku, a to v oblasti zúžení

3.4.3 Absorbovaná a lomová energie

Jednou z hlavních metod ohodnotění výsledku této zkoušky je vyčíslení absorbované a lomové energie. Jak už bylo uvedeno v sekci 3.2.2, absorbovaná energie je množství energie, které prvek pohltní do momentu vzniku tahové trhliny, tedy porušení prvku. Obecný postup pro výpočet energie je možné vidět v rovnici 3.2, kde F značí sílu a s dráhu.

$$E = F \cdot s = [N] \cdot [m] = [J] \quad (3.2)$$

Neurčuje se však v joulech [J], jako finální hodnota energie pohlčené prvkem, ale jako poměrná hodnota energie absorbovaná na jeden metr krychelný materiálu. Uvádí se tedy v jednotkách joule na metr krychelný [J/m³]. Tento zápis je zapříčiněn metodikou zkoušky, jelikož se pro vyhodnocení využívají hodnoty naměřené tenzometry. Ty na rozdíl od indukčních měřičů zaznamenávají hodnoty poměrné deformace v mikronech [um/m] a ne skutečnou deformaci prvku. Převod těchto jednotek je však poměrně komplikovaný, protože

pro převod je nutno znát délku prvku, na které dochází k porušování materiálu. Jelikož není zaručeno, že k poškození prvku dojde v místě působení tenzometrů, je určení přesné délky velice složité. Proto se zvolil postup, při kterém se využívá místo hodnoty síly hodnota tahového napětí. To se získá vydělením působící síly plochou průřezu vzorku. V rovnici 3.3 je znázorněn postup výpočtu s příslouchající úpravou jednotek. Hodnota g znázorňuje absorbovanou energii, σ vyjadřuje tahové napětí a hodnota ϵ vyjadřuje poměrnou deformaci prvku.

$$g = \sigma \cdot \epsilon = [MPa] \cdot \left[\frac{um}{m} \right] = \left[\frac{MN}{m^2} \right] \cdot \left[\frac{um}{m} \right] = \left[\frac{N}{m^2} \right] \cdot \left[\frac{m}{m} \right] = \left[\frac{J}{m^3} \right] \quad (3.3)$$

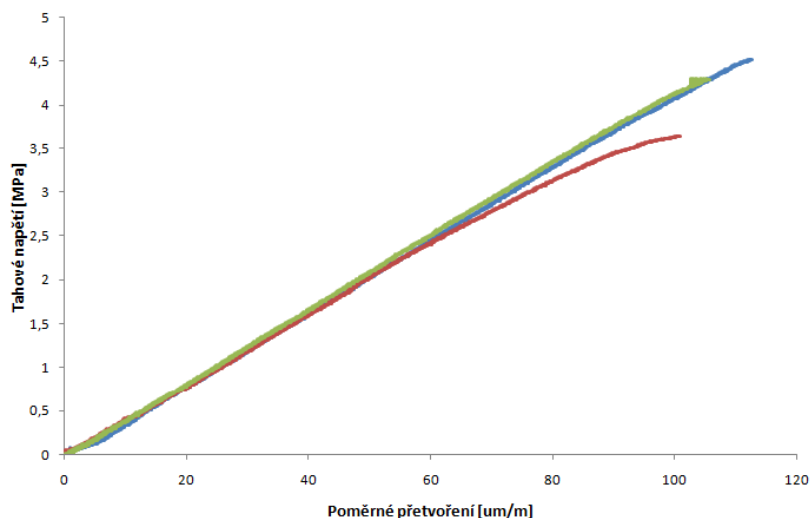
Lomová energie určuje množství energie přenesené prvkem po vzniku tahové trhliny až do kompletního roztržení prvku. Právě tato hodnota je kritická pro vyhodnocení úrovně tahového zpevnění prvku. Tato energie se získá propočtem podle upravené rovnice pro výpočet energie 3.2. V rovnici 3.4 se změnilo značení veličin a jejich magnituda. Pro tento případ zastává hodnota F_t tahovou sílu působenou přístrojem na vzorek v [kN] a w představuje absolutní deformaci prvku v [mm]. Ta byla naměřena pomocí dvou páru indukčních měřičů upnutých na vzorek.

$$E_L = F_t \cdot w = [kN] \cdot [mm] = [J] \quad (3.4)$$

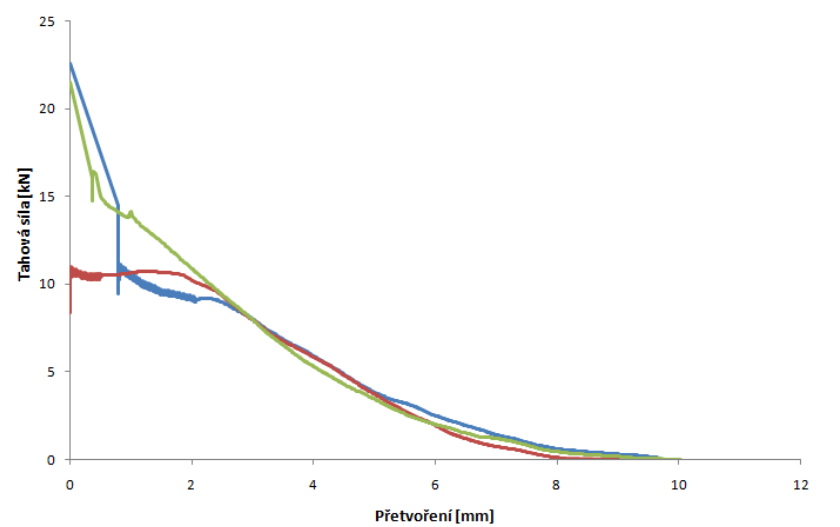
Jelikož hodnoty napětí σ ani síly F_t nejsou časově konstantní není možné vyčíslit celkovou energii jako součin dvou hodnot. Pro výpočet celkové energie se zvolila metoda výpočtu plochy vymezené grafem dané proměně. Pro absorbovanou energii g byla využit graf závislosti tahového napětí σ od poměrné deformace ϵ , tedy jde o pracovní diagram prvku v tahu. Tento graf končí v momentu dosažení tahové únosnosti, kdy dochází k vzniku tahové trhliny. Ukázkou takového grafu možno vidět na obrázku 3.9. Pro výpočet lomové energie slouží křivka závislosti tahové síly F_t od skutečného přetvoření prvku w . Tento graf je zobrazen na obrázku 3.10, jeho počátek je v bodě vzniku tahové trhliny a je ukončen v místě, kde tahová síla dosáhne hodnotu 0kN, tedy dochází k celkovému přetržení prvku.

Dvěma postupy jak spočítat plochu vymezenou těmito křivkami je buď přeložení křivky vhodnou funkcí, nebo rozložení grafu na menší úseky a následovný součet dílčích ploch. První z metod je sice časově méně náročná, ale vnáší do výpočtu velkou nepřesnost, protože výsledkové křivky jsou dost členité. Náhradní funkce by totiž tuto členitost přesně nepopsala, při aproximaci tvaru by mohlo dojít k vyhlazení peaku způsobených momentálním zpevněním prvku při napnutí tažených drátů. A tedy výsledky by byly zkreslené o tyto změny.

Proto byla pro výpočet zvolena metoda rozdělení plochy na menší části. Jednotlivé dílky byly zvoleny jak pravoúhlé lichoběžníky, které se svým zkosením přizpůsobují průběhu křivky. Jejich základny mají délku rovnou velikosti napětí σ resp. sil F_t v dvou bodech za sebou a výšku představuje změna hodnoty poměrné deformace $\Delta\epsilon$ resp. celkového přetvoření Δw . Celková plocha byla vždy rozdělena podle počtu měření dané zkoušky, tedy výška každého lichoběžníku je rovna změně poměrné deformace nebo přetvoření za jednu desetinu vteřiny.



Obrázek 3.9: Graf závislosti tahového napětí σ od poměrné deformace ϵ . Maximální hodnota je dosažena v momentu tahového porušení prvku, tedy při vzniku tahové trhliny

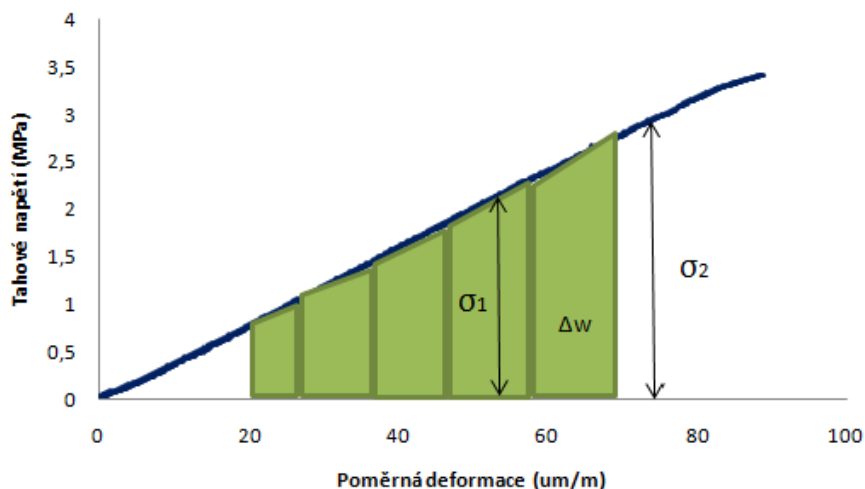


Obrázek 3.10: Graf znázorňující tahové zpevnění UHPFRC. Křivka znázorňuje závislost tahové síly F_t od skutečného přetvoření prvku w . Počátek grafu je v bodě ukončení grafu σ / ϵ

Co představuje časový úsek mezi dvěma měřeními senzorů. Všechny dílčí výsledky pak byli sečteny do výsledné hodnoty buď to absorbované nebo lomové energie. Grafické znázornění výpočtu je zobrazeno na obrázku ??

3.4.4 Charakteristická hodnota únosnosti

Nad rámec určení tahové únosnosti jednotlivých prvků se pomocí statistických metod určili i charakteristické hodnoty tahové únosnosti pro vzorky se stejným objemovým zastoupením



Obrázek 3.11: Schematické zobrazení výpočtu plochy ohraničené křivkou. Velikost lichoběžníku je kvůli demonstraci zvýšená, při měření je graf rozdělen na přibližně 10000 dílčích ploch

ocelových drátů. A to podle přílohy D v ČSN EN 1990 ed.2 (2015). Pro každou skupinu byly vybrány minimálně 3 vzorky, podle kterých se charakteristická hodnota spočítala. Prvním výpočtem bylo zjištění průměrné hodnoty pevnosti značené f_m . Tato hodnota byla získána podle vztahu 3.5. Kde n vyjadřuje počet měření a f_i jednotlivé výsledky získané ze zkoušek.

$$f_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n f_i \quad (3.5)$$

Druhým krokem byl výpočet směrodatné odchylky výpočtu s . Pro výpočet byla použita rovnice 3.6

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (f_i - f_m)^2} \quad (3.6)$$

Následně byl stanoven variační koeficient V podle vzorce 3.8. Ten se uvažoval jako neznámí variační koeficient, jelikož nebyl známý z předcházejících výpočtů.

$$V = \frac{s}{f_m} \quad (3.7)$$

Charakteristická hodnota f_k pak byla určena podle součinitele k_n uvedeného v tabulce D1 normy ČSN EN 1990 ed.2 (2015). Tato tabulka je uvedena na obrázku 3.12. Hodnota pak byla určena na základě výpočtu

$$f_k = f_m \cdot (1 - k_n \cdot V) \quad (3.8)$$

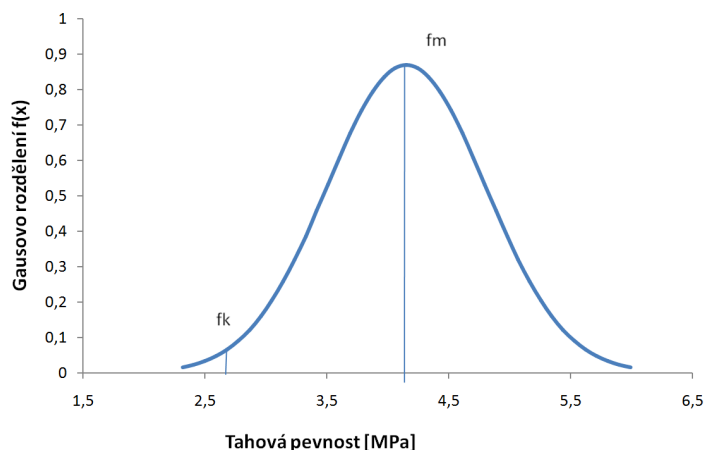
n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_x známý	2,31	2,01	1,89	1,83	1,80	1,77	1,74	1,72	1,68	1,67	1,64
V_x neznámý	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Obrázek 3.12: Tabulka D1 ČSN EN 1990 ed.2 (2015), určující součinitel k_n pro 5% charakteristickou hodnotu

Pro zjištěné výsledky pak byl vykreslen graf gaussovo normálního rozdělení, podle vzorce 3.9

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-f_m)^2}{2s^2}} \quad (3.9)$$

Takovéto rozdělení je zobrazeno v grafu na obrázku 3.13. V nejvyšším bodě dosahuje hodnotu f_m . Vyznačená hodnota charakteristické hodnoty f_k pak zodpovídá přibližně 5 procentnímu kvantilu výsledků. Rozptyl grafu je určen v rozmezí f_m-4s až f_m+4s .



Obrázek 3.13: Normální gaussovo rozdělení, výsledků tahové pevnosti pro UHPFRC s 0,5% objemovým zastoupení drátka.

Kapitola 4

Výsledky a diskuze

Tato kapitola je zaměřená na vyhodnocení získaných dat a následnou diskuzi.

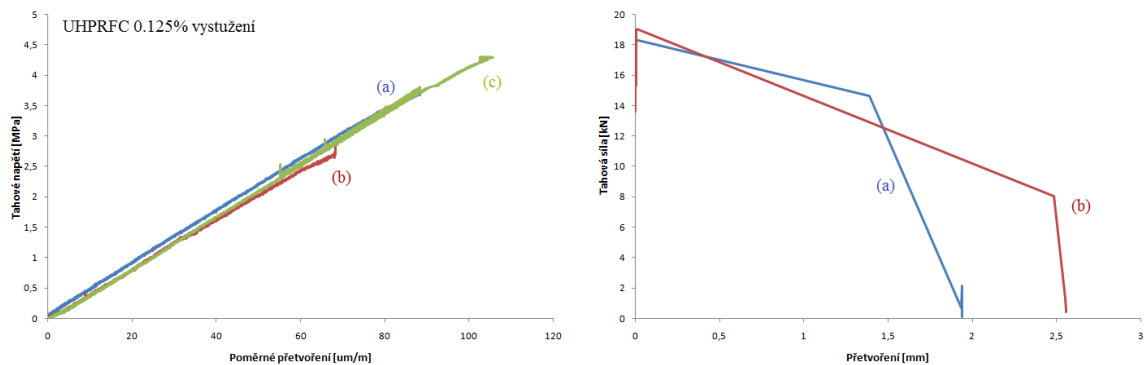
4.1 Absorbovaná a lomová energie

V této sekci jsou vyobrazeny výsledky všech měření, absorbovaných a lomových energií. Postupy všech výpočtů jsou uvedeny v kapitole 3.4.3. Výsledky jsou uvedeny graficky ve formě grafů závislostí tahového napětí od poměrné deformace respektive tahové síly od absolutního přetvoření. V každém grafu jsou uvedeny průměrné hodnoty ze všech měření. Výsledné numerické hodnoty jsou pak uvedeny v tabulce 4.1. Výsledky jsou uváděny v pořadí od nejnižší hodnoty objemového zastoupení ocelových drátů po nejvyšší. Tedy od hodnoty 0.125% až po 2.0%.

Výsledky UHPFRC s 0.125% objemu výztuže jsou uvedeny na obrázku 4.1. V grafu napětí před vznikem trhlin (vlevo), je vidět že vzorky se částečně liší v dosažených hodnotách. Rozdíl napětí při kterých došlo k porušení jednotlivých vzorků je poměrně veliký. To má vliv i na hodnotu absorbované energie, jejíž hodnoty se mezi jednotlivými vzorky liší i o víc než 50%. V grafu síly (vpravo) jsou uvedeny jen dva výsledky, výsledek zkoušky (c) totiž přinesl nesprávné výsledky, které neodpovídali předpokládanému průběhu tahového zpevnění. Ukázka takovýchto měření je uvedena v na obrázku 4.6.

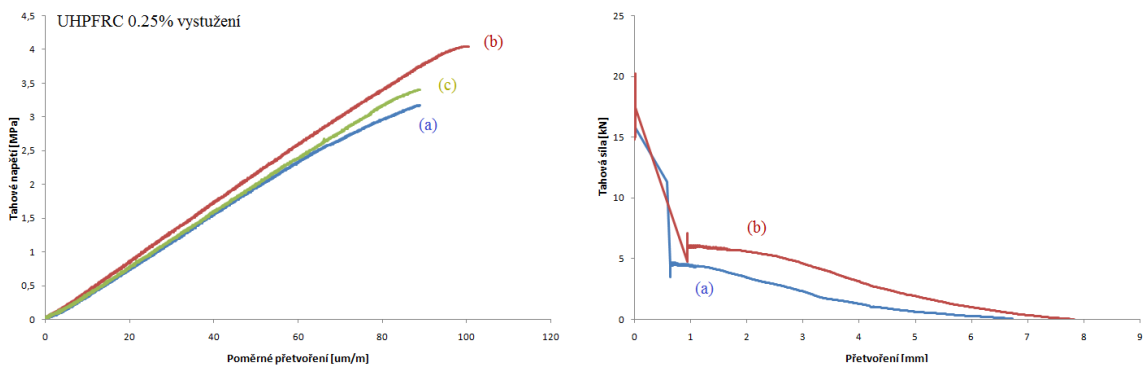
Podobné druhy výsledků se opakovali i u ostatních zkoušek, důvodů pro vznik takovýchto chyb může být více. Nejpravděpodobnější příčinou je chyba měření způsobená zlým zapojením snímačů nebo jejich poruchou. Další možností je porucha testovacího stroje, výsledky některých zkoušek zaznamenali postupné zmenšování hodnot deformace po vzniku tahové trhliny, je možné že to zapříčinilo uvolnění kleští kotvících vzorek. To mohlo zapříčinit jejich uzavírání místo toho, aby se oddělili.

Vícekrát došlo k vyskytnutí podobného druhu chybovosti. V takovýchto případech vzorek dosáhl vysoké hodnoty tahové pevnosti, a následně výsledky naměřené indukčními snímači neodpovídali předpokládanému průběhu. Je otázne jestli vysoká hodnota napětí zapříčinila poruchu snímačů, nebo jestli nebyli oba výsledky zkesleny v důsledku jiné chyby v měření. Sledování tohoto jevu a případné popsání souvislosti mezi vysokou pevností prvku a průběhem následovné deformace je dobrým námětem pro navazující výzkum.



Obrázek 4.1: Výsledky tahové zkoušky UHPFRC s objemovým zastoupením drátku 0.125%. Vlevo je uveden graf závislosti tahového napětí od poměrné deformace vpravo je pak zobrazen graf závislosti tahové síly od absolutního přetvoření

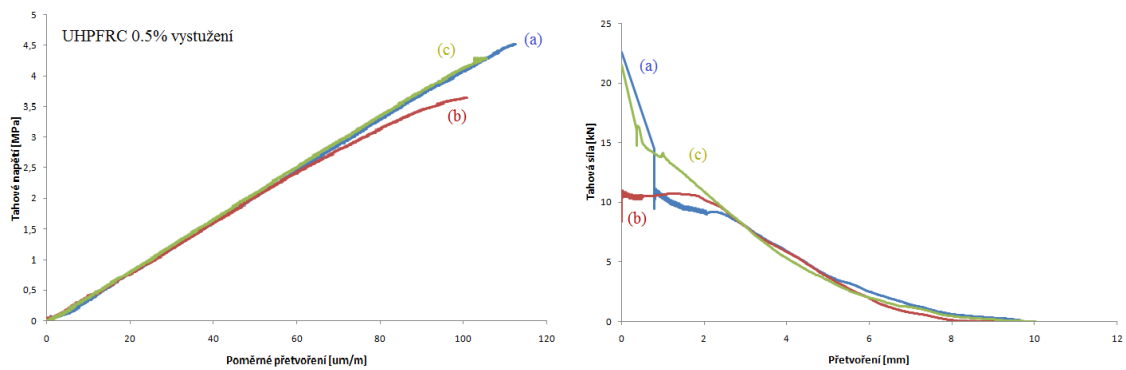
Výsledky UHPFRC s 0.25% objemu výztuže jsou zobrazeny na obrázku 4.2. Na grafu napětí před vznikem trhlin (vlevo), je vidět že všechny vzorky dosáhli přibližně rovnakých výsledků. Jedině vzorek (b) dosáhl vyšší hodnotu tahové únosnosti než ostatní vzorky. V grafu síly (vpravo) jsou uvedeny jen dva výsledky, výsledek zkoušky (c) totiž přinesl nesprávné hodnoty, které neodpovídali předpokládanému průběhu tahového zpevnění. Příčina chyby je pravděpodobně stejného původu jako u vzorku s 0.125% objemem drátku.



Obrázek 4.2: Výsledky tahové zkoušky UHPFRC s objemovým zastoupením drátku 0.25%. Vlevo je uveden graf závislosti tahového napětí od poměrné deformace vpravo je pak zobrazen graf závislosti tahové síly od absolutního přetvoření

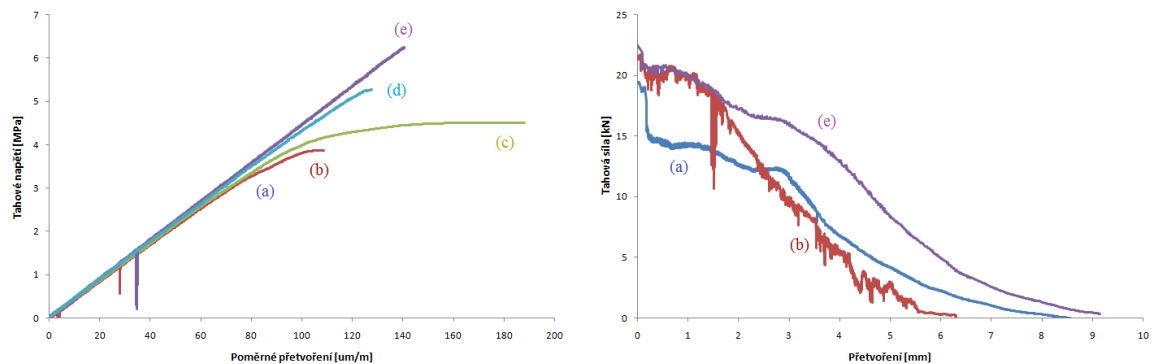
Výsledky UHPFRC s 0.5% objemu výztuže jsou uvedeny v obrázku 4.2. V grafu napětí před vznikem trhlin (vlevo), je zřetelné že všechny vzorky dosáhli přibližně rovnakých výsledků. Po vzniku trhlin je na grafu síly (vpravo) patrný vliv nižší únosnosti vzorku (b). Protože se prvek porušil při menším napětí je hodnota počáteční síly menší než u zvyšních měření. Průběh tahového zpevnění se ale s rozvojem trhliny srovnal s ostatními výsledky.

Výsledky UHPFRC s 1.0% objemu výztuže jsou uvedeny na obrázku 4.4. Pro toto a následovně objemové zastoupení drátku bylo testováno víc vzorků než při ostatních zastoupeních. V obou případech bylo provedeno 7 zkoušek. Pro 1.0% zastoupení však bylo



Obrázek 4.3: Výsledky tahové zkoušky UHPFRC s objemovým zastoupením drátka 0.5%. Vlevo je uveden graf závislosti tahového napětí od poměrné deformace vpravo je pak zobrazen graf závislosti tahové síly od absolutního přetvoření

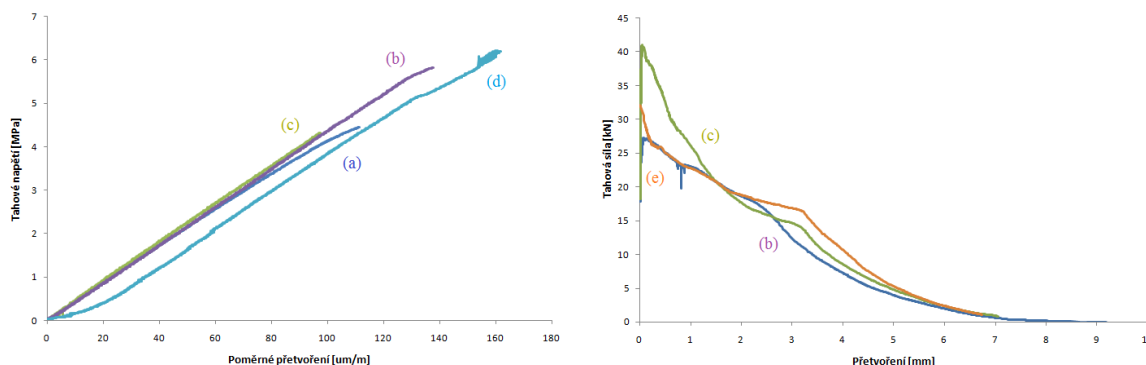
použito jen 5 výsledků. Zbylé dva přinesli chybné data. V grafu napětí před vznikem trhlin (vlevo), je možné vidět, že vzorek (c) dosáhl průměrné únosnosti, no do vzniku trhliny u něj došlo k velkému průměrnému přetvoření. V grafu síly nejsou vyneseny hodnoty prvků (c) a (d), protože tak jako u předcházejících zkoušek došlo k špatnému naměření hodnot přetvoření. U vzorku (b) lze pozorovat nepravidelný průběh křivky, a to z důvodu náhlých změn tahových sil mezi následujícími výsledky. Tuto chybu pravděpodobně zapříčinil prokluz vzorku v místě ukotvení nebo prokluz kleští přístroje. To by zapříčinilo zaznamenané náhle úpadky velikosti tahové síly následované opětovným uchopením prvku, které vnese sílu nazpátek do vzorku.



Obrázek 4.4: Výsledky tahové zkoušky UHPFRC s objemovým zastoupením drátka 1.0%. Vlevo je uveden graf závislosti tahového napětí od poměrné deformace vpravo je pak zobrazen graf závislosti tahové síly od absolutního přetvoření

Na obrázku 4.5 jsou vyznačené výsledky chování UHPFRC s 2.0% objemovým zastoupením drátka. Tak jako v případě 1% vzorků bylo i pro toto objemové zastoupení provedeno 7 zkoušek. I v tomto případě bylo využito jen 5 výsledků. Zbylé dva opět přinesli chybné data. V grafu napětí před vznikem trhlin (vlevo), jsou uvedeny jen čtyři vzorky, a to z toho důvodu že vzorek (e) nebyl opatřen tenzometry. Tedy nedala se u něj vyčíslit tahová únosnost. Průběhy všech výsledků jsou si velice podobné, a u vzorků (a) a (c) respektive

(b) a (d) byly zaznamenány velmi podobné hodnoty pevnosti. Výsledky zkoušek (a) a (b) nebyly vyneseny do grafu F_t/w (vpravo), protože ukazovali chybné hodnoty. Ostatní výsledky zobrazují tahové zpevnění podle předpokládaného průběhu.

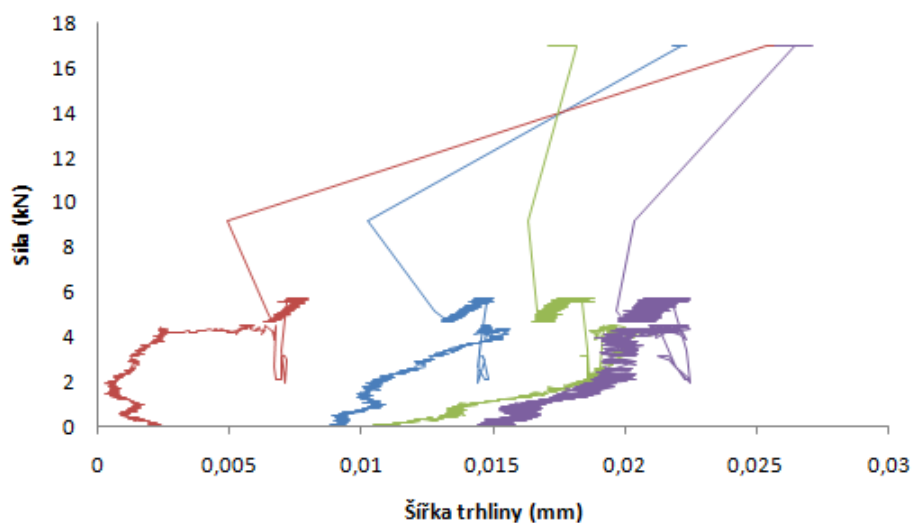


Obrázek 4.5: Výsledky tahové zkoušky UHPFRC s objemovým zastoupením drátku 2.0%. Vlevo je uveden graf závislosti tahového napětí od poměrné deformace vpravo je pak zobrazen graf závislosti tahové síly od absolutního přetvoření

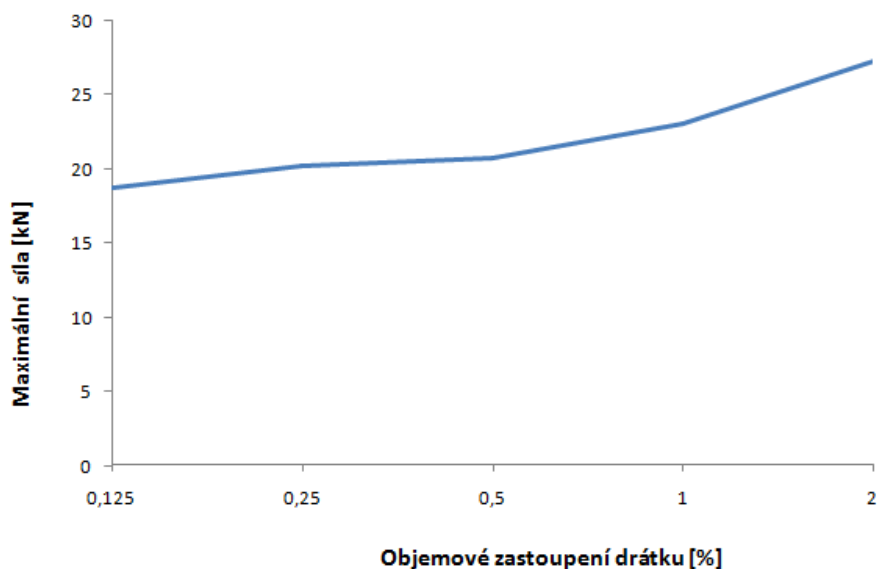
Po vyhodnocení všech výsledku byly získané hodnoty všech zkoušek zprůměrovány dle objemového zastoupení výztuže. Všechny hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.1. Tyto hodnoty pak byly graficky znázorněny. Pro každou měřenou veličinu byla sestavená závislost od vyztužení. Průběhy byly označeny jako křivky závislostí, aby byly změny mezi jednotlivými hodnotami zřetelnější. Takto byly vytvořeny čtyři grafy, a to graf závislosti tahové síly F_t vid'. obrázek4.7, tahové únosnosti σ vid'. obrázek4.8, absorbované energie g vid'. obrázek4.9 a lomové energie E_L vid'. obrázek4.10 na objemovém podílu drátkové výztuže. Ve všech případech závislost sleduje stoupající trend. U 0,5% zastoupení se křivky přibližují vodorovnému průběhu, příčina je pravděpodobně v interpretaci výsledků vzorků s 0.25% objemem výztuže. Měřené vzorky buď dosáhly pevnosti vyšší než je průměrná hodnota pro tento materiál no s vyšší pravděpodobností se hodnoty pevností u takhle malého rozdílu ve větší míře nemění.

Tabulka 4.1: Tabulka měřených hodnot 3.4 podle objemového zastoupení vyztužení

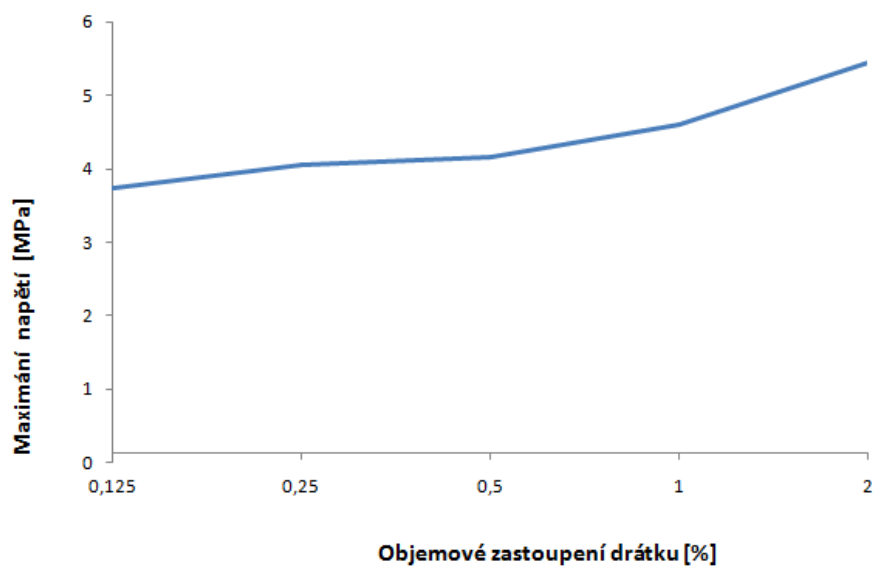
Objem. zastoupení drátku [%]	Max. tah. síla [kN]	Max. tah. napětí [MPa]	Absorbovaná eng. [J/m ²]	Lomová eng. [J]
0.125	18,70	3,74	170,83	27,10
0.25	20,22	4,04	215,07	30,39
0.5	20,76	4,15	229,25	51,47
1.0	23,03	4,61	302,89	63,43
2.0	27,22	5,44	342,35	88,50



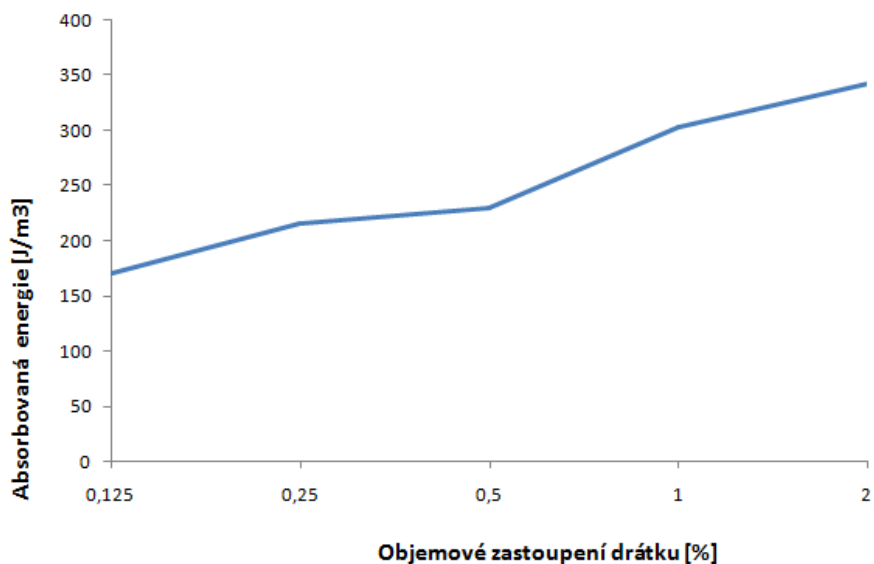
Obrázek 4.6: Ukázka chybných výsledků tahové zkoušky. V grafu jsou vyznačeny hodnoty naměřené čtyřmi indukčními snímači připevněními ku vzorku. Chyba je patrná nárůstem hodnot tahových sil, s narůstajícím přetvořením. V správném průběhu se musí velikost síly zmenšovat, z důvodu zmenšování efektivního průřezu prvku a postupného vyčerpání tahové kapacity drátků spojujících dvě poloviny poškozeného vzorku.



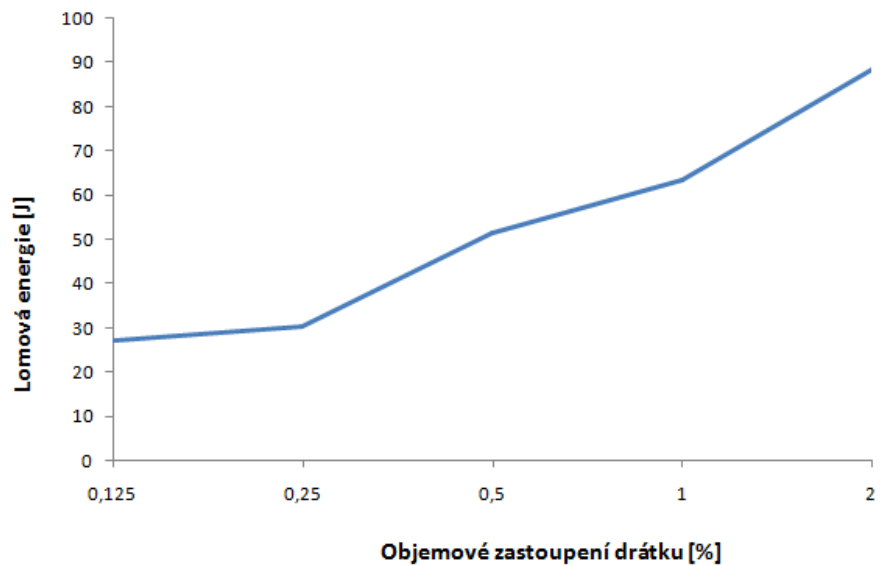
Obrázek 4.7: Graf znázorňující závislost maximální tahové síly podle objemového zastoupení drátku v materiálu. Hodnoty vyztužení jsou uváděny v logaritmickém měřítku z důvodu lepší přehlednosti výsledků.



Obrázek 4.8: Graf znázorňující závislost maximálního tahového napětí podle objemového zastoupení drátku v materiálu. Hodnoty vyztužení jsou uváděny v logaritmickém měřítku z důvodu lepší přehlednosti výsledků.



Obrázek 4.9: Graf znázorňující závislost hodnot absorbované energie podle objemového zastoupení drátku v materiálu. Hodnoty vyztužení jsou uváděny v logaritmickém měřítku z důvodu lepší přehlednosti výsledků.



Obrázek 4.10: Graf znázorňující závislost hodnot lomových energií podle objemového zastoupení drátku v materiálu. Hodnoty vyztužení jsou uváděny v logaritmickém měřítku z důvodu lepší přehlednosti výsledků.

4.2 Balisticky poškozené vzorky

Výsledky byly nashromážděny ze šesti vzorků, z toho čtyř poškozených nedeformovatelným projektilem a zbilé dva projektilem deformovatelným, jak je blíže popsáno v kapitole 3.3.3. U zkoušky jednoho ze vzorků zasažených deformovatelným projektilem došlo k porušení vzorku mimo měřenou oblast, tedy tyto výsledky nebyli průkazné. Pro vyhodnocení tahové zkoušky tedy byly použity jen výsledky ze čtyř měření prvků zasažených nedeformovatelným projektilem, jelikož zbylý výsledek nebylo možné srovnat s jinými hodnotami tedy nelze určit jestli bylo měření přesné.

Pro vzorky se vyhodnocovali hodnoty maximální tahové síly a hodnoty lomové energie. Absorbovanou energii nebylo možné určit protože charakter porušení vzorků znemožnil použití tenzometrů, jejichž měření je pro tento výpočet vyžadováno. Původním záměrem bylo i určení maximálního tahového napětí, pro to bylo potřebné určit plochy průřezu v místě porušení vzorků. Porušení byli ale natolik členité a nespécifické, že získané hodnoty by byly ovlivněny přílišnou chybou měření a tedy výsledné hodnoty tahové pevnosti by byli neprůkazné.

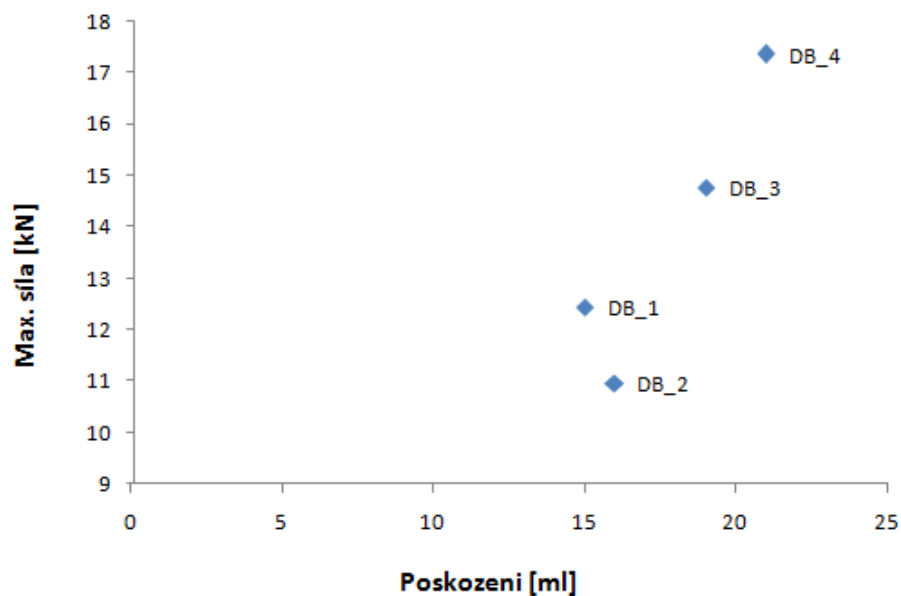
U těchto vzorků se neměnili materiálové vlastnosti, protože všechny měli stejné objemové zastoupení výztuže a to 2%. Parametrem podle kterého se tyto výsledky hodnotili, byla míra jejich poškození, ta se uváděla jako objem kráteru způsobeného zásahem projektilu. Výsledky zkoušky jsou zaznamenány v tabulce 4.2. Tyto výsledky byly následně zpracované do grafické podoby. V grafu na obrázku 4.11 jsou vyobrazeny výsledky maximální tahové síly v závislosti na objemu poškození. Na obrázku 4.12 je pak uveden graf s hodnotami lomových energií jednotlivých vzorků v závislosti na objemu poškození.

Tabulka 4.2: Tabulka výsledku pro maximální tahovou sílu a lomovou energii balisticky poškozených prvků.

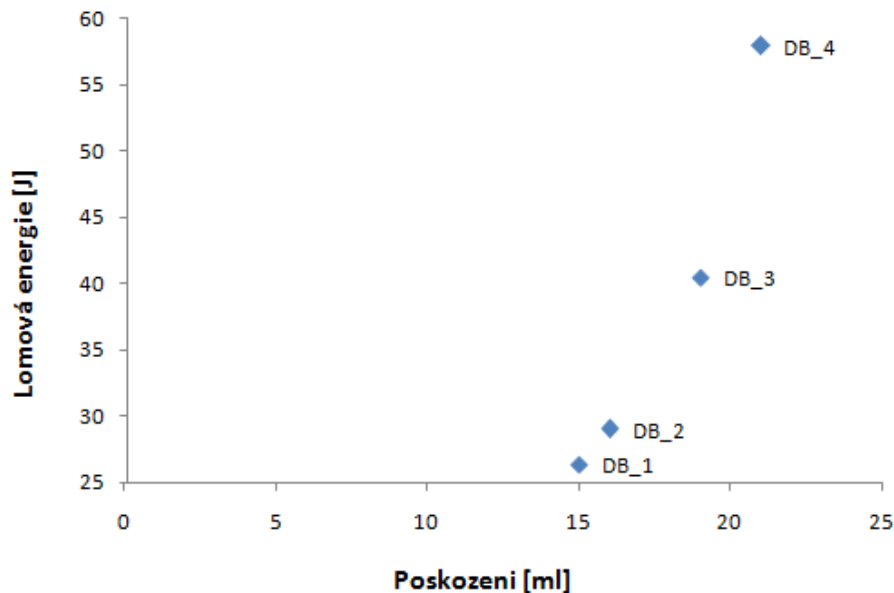
Vzorek [-]	Poškození [ml]	Max. tah. síla [kN]	Lomová eng. [MPa]
DB_1	15	12,44	26,38
DB_2	16	10,96	29,04
DB_3	19	14,77	40,49
DB_4	21	17,36	57,94

Podle získaných dat je možné usoudit, že maximální hodnoty tahové síly a tahového napětí nejsou přímo závislé na obehmu poškození. Protože pro vzorky s vyšší mírou poškození byly naměřeny vyšší hodnoty než pro méně poškozené prvky. Pro přesnější vyhodnocení zkoušky by bylo potřebné využít podrobnější specifikace porušení, jako přesný tvar kráteru a rozložení jeho objemu v prostoru. U vzorků s větším objemem porušení mohlo dojít k většímu rozpřestření kráteru v ploše prvku zatímco u méně porušeného prvku byl zřejmě objem kráteru lokalizovaný na menším prostoru. U méně poškozeného prvku tak mohlo dojít k většímu lokálnímu porušení průřezu, než u vzorku s vyšší mírou poškození, a to vedlo k jeho nižší únosnosti.

Zaznamenání možné souvislosti mezi objemem porušení a jeho prostorovým uspořádáním a jejich vlivu na tahovou únosnost je vhodným námětem pro navazující výzkum. Výsledky totiž naznačují, že u vyššího objemového poškození dochází k jeho většímu rozložení po ploše prvku.



Obrázek 4.11: Na grafu jsou vyneseny hodnoty získaných hodnot maximálních sil při kterých došlo u vzorku k vzniku tahové trhliny. Pro každý prvek je vyznačena hodnota maximální síly a objem poškození způsobeného zásahem projektilu. Každý z uvedených vzorků byl zasažen nedeformovatelným projektilem.



Obrázek 4.12: Graf s vyznačenými hodnotami výsledných hodnot lomových energií pro balisticky poškozené prvky. Všechny popsané prvky byly poškozeny nedeformovatelným projektilem. Graf uvádí jejich hodnoty podle objemu vzniklého poškození.

To by vedlo k menšímu porušení průřezu a tedy k menšímu úbytku únosnosti, nalezení faktoru ovlivňujícího toto chování by mohlo vést k zlepšení vlastností materiálu.

4.3 Charakteristická hodnota pevnosti

Po vyhodnocení naměřených dat, byly pro všechny vzorky dle objemového zastoupení ocelových drátků, spočtené charakteristické hodnoty f_k jejich únosnosti v dostředném tahu. Tyto výpočty byly provedeny podle postupu uvedeného v kapitole 3.4.4. Následně byl zaříděn do pevnostních tříd dle tabulky 2.1 pevnostních tříd betonu uvedené v ČSN 1992-1-1 [17]. Tato tabulka je uvedena na obrázku 4.13. Výsledky byly zaříděny podle nejbližší nižší hodnoty tahové pevnosti pro 5% kvantil. Všechny hodnoty pevností a jejich zařídění jsou uvedeny v tabulce 4.3. Toto zařídění neodpovídá předpokládanému zařazení, tato skutečnost je však pravděpodobně zapříčiněna použitím výpočetních hodnot pro neznámý variační součinitel. Právě tato hodnota zapříčiňuje snížení výsledné charakteristické hodnoty pevnosti.

	Třídy betonu														Vztah
f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$
f_{ctm} [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{(2/3)}$ $\leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \ln$ $[1 + (f_{cm} / 10)] >$ $C50/60$
$f_{ctk;0,05}$ [MPa]	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk;0,05} = 0,7 f_{ctm}$ (0,05 kvantil)
$f_{ctk;0,95}$ [MPa]	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk;0,95} = 1,3 f_{ctm}$ (0,95 kvantil)
E_{cm} [GPa]	27	29	30	31	32	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22$ $(f_{cm} / 10)^{0,3}$ (f_{ck} v MPa)
ϵ_{c1} [‰]	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	obr. 2.1a
ϵ_{cu} [‰]	3,50									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	obr. 2.1a
ϵ_{c2} [‰]	2,00									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	obr. 2.1b
ϵ_{cu2} [‰]	3,50									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	obr. 2.1b
n	2,00									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	
ϵ_{c3} [‰]	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	obr. 2.1c
ϵ_{cu3} [‰]	3,50									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	obr. 2.1c

Obrázek 4.13: Na obrázku je uvedena tabulka 2.1 pevnostních tříd betonu z normy ČSN 1992-1-1 [17].

Tabulka 4.3: Tabulka charakteristických hodnot tahové pevnosti, podle objemového zastoupení drátkové výztuže. Ku všem hodnotám je uvedeno zatřídění do pevnostní třídy dle tabulky 2.1 ČSN 1992-1-1.

Objém. výztuže [%]	Charakteristická pevnost [MPa]	Zatřídění [-]
0,125	2,19	30/37
0,25	2,03	30/37
0,5	2,61	40/50
1,0	2,39	35/45
2,0	3,14	60/75

Kapitola 5

Závěr

Táto práce byla zaměřená na ověření a zpracování výsledků získaných při zkouškách vysokohodnotného betonu v prostém tahu. Tyto zkoušky byly prováděny na vzorcích s rozličným objemovým zastoupením výztuže, a to 0.125; 0.25; 0.5; 1.0 a 2.0% objemu vzorků. V návaznosti na předchozí studie Fakulty stavební bylo provedeno i testování vzorků podrobených balistickému poškození.

Výsledky prokázali, že s rostoucím objemem výztuže dochází i k nárůstům hodnot tahové pevnosti, absorbované a lomové energie. Právě získané hodnoty lomové energie napomůžou lepšímu popsání tahového zpevnění nastávajícího u tohoto materiálu. Tyto výsledky dosáhly průměrných hodnot mezi 27.1 J pro nejnižší stupeň vyztužení, tedy 0.125% objemu drátku, až po hodnoty 88,5 J pro nejvíc vyztužené vzorky.

Pomocí statistických výpočtu byly pro jednotlivé skupiny vzorků spočtené charakteristické hodnoty tahových únosností, podle kterých pak byly zaříděny do pevnostních tříd betonu dle tabulky 2.1 ČSN 1992-1-1 [17].

Výsledky balisticky poškozených vzorků neočekávané výsledky. Hodnoty maximálních tahových sil totiž sledují stoupající trend v závislosti na zvětšujícím se poškození. Očekávaným průběhem bylo klesání hodnot sil s nárůstem velikosti poškození. Studie však poukázal, že mezi hodnoty maximální tahové síly jsou nezávislé od celkového objemu poškození prvku. Vyšší vliv na únosnost prvku budou pravděpodobně mít přesnější specifikace porušení jako přesný tvar kráteru a rozložení jeho objemu v prostoru prvku. Sledování těchto vlivů je dobrým námětem pro další výzkum.

Literatura

- [1] Ing Šmejkal J. CSc Ing. Hanzlová H. CSc. *Betonové a železné konstrukce 1*. České vysoké učení technické v Praze, 2013.
- [2] autor neznámý. Meyers konversationslexikon. vierte auflage. 1885.
- [3] Inge Kanakaris-Wirtl (kanakari.photos@gmail.com). Risorgimento bridge. 2011.
- [4] J. Hošek M. Pavlíková, Z. Pavlík. *Skripta – Materiálové inženýrství I*. České vysoké učení technické v Praze, 2009.
- [5] K. Wille, S. El-Tawil, and A.E. Naaman. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (uhp-frc) under direct tensile loading. *Cement and Concrete Composites*, 48:53 – 66, 2014.
- [6] Praha 6 CZ České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Patentový spis 306 663 suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu 15.03.2017.
- [7] R. Yu, P. Spiesz, and H.J.H. Brouwers. Development of ultra-high performance fibre reinforced concrete (uhpfrc): Towards an efficient utilization of binders and fibres. *Construction and Building Materials*, 79:273 – 282, 2015.
- [8] Reinhardt HW Naaman AE. Setting the stage: toward performance based classification of frc composites. in: Proceedings of 4th rilem symposium on high performance fiber reinforced cement, composites (hprfcc4). pages 1–4, 2003.
- [9] Jungwirth J. Muttoni A. *Structural behavior of tension members in UHPC*. Proceedings of international symposium on ultra high performance concrete, Kassel, Fehling E, Schmidt M, Geisenhanslueke C, 2004.
- [10] M. Ismail. *Behavior of UHPC Structural Members Subjected to Pure Torsion*. Dissertation, Faculty of Civil Engineering, Kassel University, Germany, 2015.
- [11] Yuliarti Kusumawardaningsih, Ekkehard Fehling, and Mohammed Ismail. Uhpcc compressive strength test specimens: Cylinder or cube? *Procedia Engineering*, 125:1076 – 1080, 2015.
- [12] Association française de génie civil. *Bétons fibrés à ultra-hautes performances recommandations provisoires interim recommendations*. Documents scientifiques et techniques. AFGC, Bagnaux, 2002.

- [13] *Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks(HPFRCC)*. Concrete engineering series. Sub-Committee, Recommendations for Design and Construction of HPFRCC, Concrete Committee, Japan Society of Civil Engineers, 2008.
- [14] A.E. Naaman and H.W. Reinhardt. *PRO 30: 4th International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 4)*. Number zv. 1 in RILEM Publications. RILEM Publications, 2003.
- [15] V. Bažata. Tahové chování vysokohodnotného vlákny vyztuženého cementového kompozitu. bakalářská práce, fakulta stavební Čvut v praze. 2015.
- [16] Radoslav Sovják, Tomáš Vavříník, Jan Zatloukal, Petr Máca, Tomáš Mičunek, and Michal Frydrýn. Resistance of slim {UHPFRC} targets to projectile impact using in-service bullets. *International Journal of Impact Engineering*, 76:166 – 177, 2015.
- [17] Čsn en 1992-1-1 navrhování betonových konstrukcí- Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. 2006 ČNI.