



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební  
Katedra konstrukcí pozemních staveb**

**Vliv pevnosti drátků na pracovní diagram drátkobetonu**

**Influence of fibre strength on stress-strain diagram of steel fibre  
reinforced concrete**

Bakalářská práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: Ing. Josef Fládr, Ph.D.

**Michal Pospíšil**

---

**Praha LS 2017**



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Pospíšil</u>	Jméno: <u>Michal</u>	Osobní číslo: <u>424475</u>
Zadávající katedra <u>K 133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství (B3651)</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce pozemních staveb (3608R008)</u>		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Vliv pevnosti drátku na pracovní diagram drátkobetonu</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Influence of fibre strength on stress-strain diagram of steel fibre reinforced concrete</u>	
Pokyny pro vypracování: Zhotovení zkušebních trámců 100/100/400 mm ve 4 variantách (bez ztužení cementové matrice, s drátky délky 14 mm bez koncové úpravy, s drátky o délce 30 mm s koncovou úpravou s běžnou tahovou pevností a s drátky o délce 30 mm s koncovou úpravou se zvýšenou tahovou pevností). Na tělesech se zářezem bude provedena tříbodová ohybová zkouška, výpočet lomové energie. Ke zvoleným drátkům bude provedena trhací zkouška, stanovení tahové pevnosti a energie potřebné k přetržení. Výsledná práce bude korelací těchto energií.	
Seznam doporučené literatury: Habilitační práce doc. RNDR. Vítězslav Vydra, CSc. Metody určování lomově-mechanických parametrů betonu - lomová energie a lomová práce, doc. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.,	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Josef Fládr, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>10.2.2017</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>28.5.2017</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
_____	_____
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>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“.</i>	
_____	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

Nemám námitek proti použití 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 ..... dne .....

.....

podpis

## **Poděkování**

Chtěl bych především poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D. za jeho podněty a odpovědi na mé otázky. Dále bych rád poděkoval všem, kteří se na výrobě vzorků podíleli, bez jejichž pomoci by výroba byla daleko obtížnější. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Věře Fládrové za její odbornou korekturu textu.

## **Abstrakt**

Tato práce je praktická a zabývá se drátkobetonem a použitelností drátků do drátkobetonu. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsem se snažil stroze, ale výstižně seznámit čtenáře se všemi tématy, kterých se tato práce dotkla. Praktická část popisuje výrobu trámčů, zkoušení drátků, zkoušení trámčů, vyhodnocení zkoušek v tahu za ohybu a cíl práce, kterým bylo stanovení vlivu drátků v drátkobetonu na množství a typu v něm obsažených. V práci je nastíněn postup, jak docílit přepočtu lomové energie a tahové pevnosti. Kladných výsledků bylo dosaženo především u přepočtu lomové energie.

## **Klíčová slova**

Drátkobeton, pevnost drátků, lomová mechanika, lomová energie, trhлина

## **Abstract**

This is a practical study that looks into fiber reinforcement concrete and usability of the fibers for fiber reinforced concrete. The study is divided into two parts, theoretical and practical. In the theoretical part, I strived to introduce, briefly but accurately, all topics that this study touches upon. The practical part describes the production of beams, fiber and beam testing procedures, assessment of the tensile bending strength tests and the objective of the study, which was to determine the impact of the number and types of the used fibers on the characteristics of fiber reinforced concrete. The study outlines the procedure for recalculating fracture energy and tensile strength. Positive results were particularly achieved for the fracture energy recalculation.

## **Keywords**

Fiber reinforced concrete, tensile strength of the fibers, fracture mechanics, fracture energy, crack

## Obsah

1. Úvod.....	7
2. Kompozit.....	8
2.1. Beton.....	8
2.2. Vláknobeton.....	9
2.2.1. Vlastnosti vláknobetonu.....	10
2.2.2. Drátkobeton.....	10
3. Zkoušení betonu.....	11
4. Lomová mechanika.....	13
5. Praktická část práce.....	15
5.1. Výroba trámců.....	15
5.2. Zkoušení drátků.....	17
5.2.1. Vláknem Fibrex.....	17
5.2.2. Vláknem Dramix 3D 55/30BG.....	18
5.2.3. Vláknem Dramix RC 80/30 BP.....	19
5.3. Zkoušení trámců.....	23
6. Závěr.....	37
Použitá literatura.....	38

## 1. Úvod

Práce je zaměřena na dávkování drátků do směsi vláknobetonu (drátkobetonu), pro ověření byly použity čtyři typy drátků: Fibrex, Dramix 3D 55/30 BG, Dramix RC 80/30 BP a Dramix OL. 13. Typem drátků rozumíme především rozdílné tahové pevnosti použitých drátků a s tím související rozdílnost lomových energií. Použité drátky byly podrobeny zkoušce na prostý tah, mimo drátků Dramix OL. 13, které tuto zkoušku neumožňovaly. Byly použity dvě směsi vláknobetonů: UHPC a referenční beton. Pro účely této práce byly vyrobeny trámce o rozměrech 400x100x100 mm. Trámce byly zkoušeny tříbodovou a čtyřbodovou zkouškou v tahu za ohybu. Tělesa pro tříbodovou zkoušku měla předdefinované místo vzniku trhliny, které bylo provedeno zářezem z plastu, vloženým do dřevotřískové formy. V místě zářezu je zúžen profil ze 100x100 mm na přibližně 100x75 mm. Trámce pro čtyřbodovou ohybovou zkoušku byly zkoušeny z důvodu ověření pevnosti v tahu za ohybu, předpokladem byla přibližná shoda pevností v tahu pro trámce se zářezem a bez zářezu. Lomová energie je získána ze zatěžovací tříbodové ohybové zkoušky do průhybu tělesa 12 mm s tím, že byl výsledný průhyb snížen na hodnotu 10 mm z důvodu rozdílného dosednutí lisu na tělesa.

Z výsledků zkoušek trámců v tahu za ohybu a prostého tahu u drátků byl stanoven postup pro přepočty závisící na množství a typu drátků, které jsou v tělese obsažené.

## 2. Kompozit

„Kompozit obecně znamená složený materiál vzniklý umělým spojením jednodušších materiálů. Kompozitní materiál získává spojením vlastnosti, které jeho jednotlivé komponenty nemají.“ (WikiSkripta, n.d.). Pokud budeme chtít podrobnější definici, budeme pod pojmem kompozity rozumět heterogenní materiály složené ze dvou nebo více částí obvykle rozdílného chemického složení, které se vzájemně liší svými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Obvykle se kompozitní materiály skládají ze dvou základních složek – matrice a výztuže. Matrice má v porovnání se zpevňující částí nižší pevnostní charakteristiky, obecně však má nižší plasticitu a houževnatost. Nespojité část se nazývá výztuž. V porovnání s matricí má obvykle výrazně lepší mechanické parametry (modul pružnosti, pevnost, tvrdost, atd.). Pro kompozitní materiály je charakteristický synergismus – vlastnosti kompozitu jsou lepší než ty, které by odpovídaly poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek a jejich geometrickému uspořádání. Podle tvaru výztuže rozlišujeme kompozity částicové, vláknové a vrstvené. (doc. Ing. Milena Pavlíková, doc. Ing. Zbyšek Pavlík, & Prof. Ing. Jiří Hošek, 2011)



Obr. 1 - Rozdělení kompozitů (převzato bez souhlasu autora)

### 2.1. Beton

Složení: voda + kamenivo + cement + (příspěvy) + (příměsi)

Beton je stavivo, vznikající ztvrdnutím výše uvedené směsi. Vlastnosti betonu jsou ovlivňovány poměrem jednotlivých složek. Zvláštních vlastností dosahuje betonová směs přidáváním příměsí a přísad. (Svaz výrobců betonu, EBETON., nedatováno)



## 2.2. Vláknobeton

Složení: beton + vlákna

Vláknobeton má základní strukturu betonu doplněnou o vlákna, která ztužují strukturu a tím vylepšují některé z jeho vlastností, zejména a převážně ty, které jsou u betonů považované za slabiny. Vlákna mohou být z různých materiálů (ocelová vlákna, polymerová vlákna, skelná vlákna, atd.), různých tvarů a rozměrů. Vlákna v betonu musí být v celém jeho objemu rovnoměrně rozptýlena. Nejčastějším důvodem přidání složky vláken do betonů je docílení zvýšení pevnosti v tahu a absence křehkého charakteru porušení nebo omezení objemových změn a smršťování. Přítomnost vláken může oddálit vznik, respektive šíření smršťovacích mikrotrhlin. Další specifika vláken jsou spojena s materiálem, ze kterých se vyrábí, např. zvýšení požární odolnosti, částečný prostup viditelného elektromagnetického záření a další. (Svaz výrobců betonu, EBETON., nedatováno)

Velmi důležitou částí při návrhu a výrobě betonu s vlákny je zvládnutí technologie výroby. Některé typy vláken mohou výrobu komplikovat. Vyztužení betonu vlákny je jediným způsobem vyztužení, kterým je vyztužena a zlepšena struktura tohoto materiálu na rozdíl od klasického vyztužení ocelovými pruty, které strukturu a vlastnosti betonu významněji nemění. Vyztužení betonu např. ocelovými vlákny však nemůže konkurovat klasickému vyztužení, které je v podobě ocelových profilů soustředěno do míst, kde má výztuž obvykle nejvyšší účinnost. Z těchto a mnohých dalších důvodů proto není možné až na výjimky plnohodnotné nahrazení stávající výztuže rozptýlenými vlákny ve staticky nosných konstrukcích. Vláknobetonu jsou speciální druhy betonů, jejichž struktura je vyztužena vlákny s cílem dosáhnout zlepšení užitných vlastností betonu. Beton s vlákny je hmotou, jehož kompozice je složitější, a jeho navrhování i výroba je tudíž také složitější oproti výrobě betonů bez vláken. Stupeň zvýšení obtížnosti při výrobě je různý. (Svaz výrobců betonu Č. , 2001)

### 2.2.1. Vlastnosti vláknobetonu

Různé druhy vláken ovlivňují různou měrou vlastnosti čerstvého vláknobetonu. Vlastnosti ztvrdlého vláknobetonu vykazují oproti obyčejnému betonu jistý nárůst všech typů pevnosti a výraznou změnu chování po vzniku tahové trhliny. Například při použití ocelových vláken lze nárůst pevnosti v tlaku odhadovat přibližně do 10 % pevnosti betonu bez těchto vláken.

Tahovou pevnost lze pak běžně zvýšit i o 50 až 100 %. Mimořádný vliv mají vlákna na tvar pracovního diagramu. Z křehkého konstrukčního materiálu, jakým beton je, se stává materiál, který se vykazuje pružně plastickým chováním. Chování vláknobetonů po vzniku tahové trhliny je obdobné jako v případě železobetonového průřezu s použitím klasické betonářské výztuže. (Svaz výrobců betonu Č. , 2001)

#### Složení

Jednotlivé složky jsou stejné, jako je tomu v případě obyčejného betonu. Směs je „pouze“ obohacena o složku vláken. Speciálním typem vláknobetonu jsou vláknobetony s extrémně vysokým podílem vláken, kde téměř úplně chybí složka kameniva. Tyto vláknobetony jsou označovány jako SIFCON (Slurry Infiltrated Fibre CONcrete). (Svaz výrobců betonu Č. , 2001)

### 2.2.2. Drátkobeton

Složení: beton + vlákna (ocelová vlákna)

Drátkobeton je specifický název pro vláknobeton, který má vlákna z oceli s povrchovou úpravou nebo bez ní. Vlákna nebo také v tomto případě drátky nabývají rozličných délkových rozměrů. Průřez těchto vláken je nejčastěji kruhový nebo obdelníkový. U drátku je několik možností „porušení“: přetržení tzn. dosažení meze pevnosti nebo vytržení drátku v různém napjatostním stádiu, tzn. nevyužití celé pevnosti drátku

### **3. Zkoušení betonu**

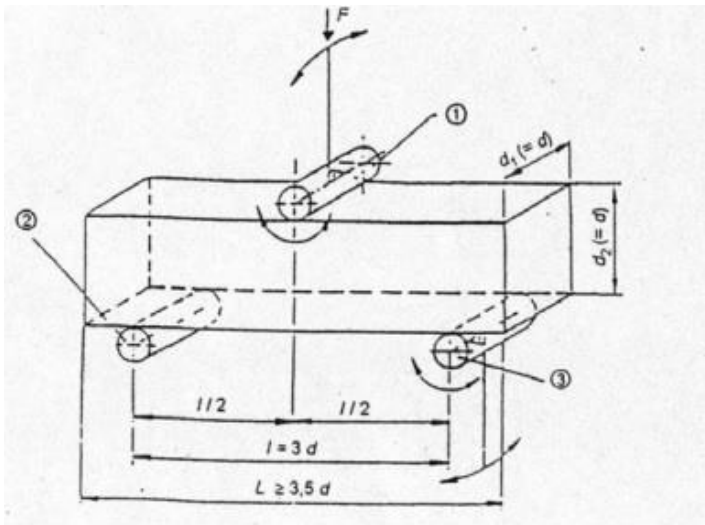
Beton se zkouší za účelem získání nebo ověření vlastností, které by daná betonová směs měla mít. Zkoušení betonu se dělí na zkoušení čerstvého betonu a na zkoušení na ztvrdlém betonu. Dále rozdělujeme zkoušky na destruktivní nebo nedestruktivní, které jak už název sám napovídá, se liší ve zničení nebo narušení námi zkoumaného tělesa.

#### **Zkouška betonu v tahu za ohybu**

Jde o destruktivní zkoušku ztvrdlého betonového tělesa tvaru trámku o rozměrech 400x100x100 mm pro ČR. Tato zkouška se dá dále rozdělit na čtyřbodový ohyb, u kterého je výhodou absence posouvající síly v místech porušení námi zkoušeného tělesa, a na ohyb třibodový, u kterého můžeme, ale nemusíme předdefinovat místo trhliny. (Svaz výrobců betonu, EBETON., nedatováno)

#### **Třibodová zkouška pevnosti v tahu za ohybu**

Nevýhodou třibodového uspořádání je přítomnost smyku a ohybu, která se nachází v kombinaci, zároveň místem vzniku trhliny většinou není nejslabší místo ve struktuře betonu. Trhlina se nachází nejčastěji v blízkosti maximální posouvající síly a momentu, tzn. v okolí nebo přímo pod zatěžovacím válečkem. Pokud chceme zvýšit pravděpodobnost vzniku místa trhliny uprostřed, můžeme vytvořit zúžení tzv. zářez na trámci. Takto předdefinované místo tak bude jistě nejslabším místem trámce a trhlina jím musí procházet.



Obr. 2 Uspořádání zatěžování zkušebního tělesa (zatěžování jedním břemenem uprostřed)  
 1) zatěžovací válečky (otočné a výkyvné),  
 2) podpěrný váleček,  
 3) podpěrný váleček (otočný a výkyvný)

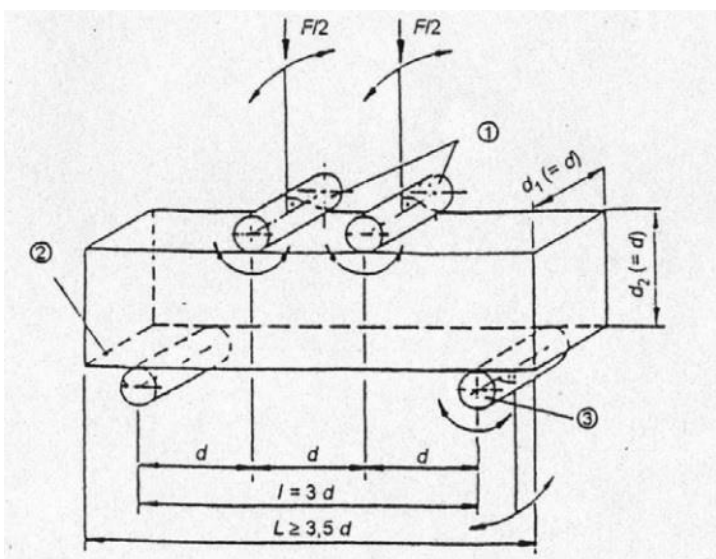
- Pevnost v tahu ohybem je dána následujícím vzáhem:  $f_{cf} = \frac{3.F.l}{2.d_1.d_2^2}$
- kde:  $f_{cf}$  je pevnost v tahu ohybem [MPa]  
 F maximální zatížení [N]  
 l vzálenost mezi podpěrnými válečky [mm]  
 $d_1$  a  $d_2$  jsou rozměry příčného řezu (obr. 2) [mm]
- Pevnost v tahu ohybem se zaokrouhlí na nejbližší 0,1 MPa.

Obr. 2 - tříbodový ohyb (převzato bez souhlasu autora) (FAST VUT v Brně, nedatováno)

### Čtyřbodová zkouška pevnosti v tahu za ohybu

U této zkoušky je absence smyku, moment je konstantní mezi dvěma zatěžovacími válečky a tudíž si může trhlinka najít sama své nejslabší místo - nesourodost ve struktuře materiálu.

Čtyřbodová zkouška by tak oproti tříbodové měla vykazovat nižší pevnostní charakteristiky.



Obr. 1 Uspořádání zatěžování zkušebního tělesa (zatěžování dvěma břemeny) 1) zatěžovací válečky (otočné a výkyvné),  
 2) podpěrný váleček,  
 3) podpěrný váleček (otočný a výkyvný)

Obr. 3 - čtyřbodový ohyb (převzato bez souhlasu autora) (FAST VUT v Brně, nedatováno)

## 4. Lomová mechanika

*Lomová mechanika představuje soubor teorie a výpočetních technik, které jsou schopny popsat a předpovídat porušování materiálů konstrukcí. S úspěchem se jejich poznatků využívá v mnoha odvětvích strojího inženýrství. Aplikace lomové mechaniky na problémy stavebního inženýrství, obzvláště betonových konstrukcí, je naopak spíše nová záležitost několika posledních desetiletí. (Veselý, 2005)*

V následujícím textu jsou popsány principy a mechanismy použití tohoto oboru, nicméně pro tuto práci jsem problematiku lomové mechaniky výrazně zkrátil, neboť není cílem práce. Byť jako nástroj pro zkoumání trámců z drátkobetonu posloužila lomová energie (houževnatost), tak nebyla odvozena na základě složitých okrajových podmínek a matematických vztahů nebo modelů, ale „pouze“ spočtena proužkovou metodou, kterou dala plocha pod grafem síla/průhyb.

Od Griffithova průkopnického článku z roku 1921 se lomová mechanika užila na nejrůznější materiály a prvky. Cílem je popis mechanismů a procesů vedoucích k poškození a lomu, včetně procesů degradace těchto materiálů. Od počátků šedesátých let minulého století začala být lomová mechanika aplikována také u kompozitů na silikátové bázi, mnohé však nepřesvědčila, což trvá v mnoha ohledech dodnes. Přístupy lomové mechaniky ovšem přesvědčily mnoho zemí, ve kterých je podporován výzkum a praxe, neboť jsou příslibem významného ekonomického přínosu, dosažení vyvážených návrhových pravděpodobností, požití nového způsobu navrhování i nových druhů betonu (např. betony s vysokými pevnostmi). Proti použití „lomové“ teorie jde však teorie „pevnostní“, která je podchycena v normách. Bohužel však „pevnostní“ teorie není schopna popsat jevy, jako např. tzv. změkčení spojené s chováním betonu po dosažení maximálního zatížení, lom vlivem rozvoje a větvení trhlin, smykový lom při propichování desek a další. Lineární elastická lomová mechanika (LELM) je budována přibližně od roku 1920 pouze pro pružně se chovající homogenní křehké materiály např. sklo, později také pro pružně-plastické homogenní materiály, jako jsou kovy s omezenou tažností.

## **Důvody použití**

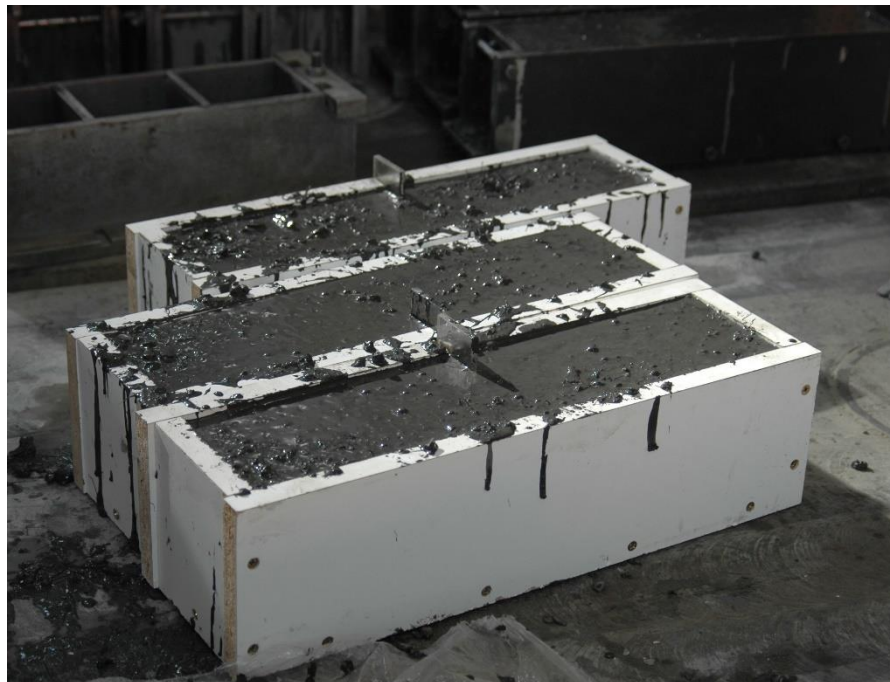
Použití betonu, ať už prostého nebo vyztuženého, je vždy spojeno s určitým množstvím nejrůznějších defektů: póry, mezery, smršťovací trhliny apod. Zmíněné defekty pak mohou pod vnějším zatížením růst, spojovat se až do magistrálních trhlin, které mohou vážně poškodit konstrukci. Tyto defekty jsou zřejmě důvodem, proč LELM na těchto materiálech na bázi cementu neuspěl. Jedním z použití by mohl být návod pro návrh netypických konstrukcí, u kterých nejsou ani empirická návrhová pravidla. Důvodem je např. mírné zpevnění, ke kterému dochází před dosažením limitní únosnosti v tahu/ohybu, obdobně jako je tomu u kovových materiálů s vysokou pevností. Avšak po dosažení limitní pevnosti jsou materiály na bázi cementu charakterizovány nárůstem deformace při snižování tahové/ohybové únosnosti. Taková odezva se nazývá tahové změkčení a materiály takto se chovající se označují jako kvazikřehké. Výčet modelů a jejich popis, které se k aplikaci používají, můžete nalézt např. v habilitační práci Křehkost a lomová mechanika cementových kompozitů od Ing. Zbyňka Keršnera, CSc. Z této práce byly čerpány i předchozí řádky.

## 5. Praktická část práce

### 5.1. Výroba trámců



*Obr. 4 – trámce bez zářezu v ocelové formě*



*Obr. 5 – trámce se zářezem – formy z dřevotřísky*





*Obr. 6 – suroviny pro výrobu referenčního drátkobetonu*



*Obr. 7 – hotové vzorky*



## 5.2. Zkoušení drátků

### 5.2.1. Vláknno Fibrex

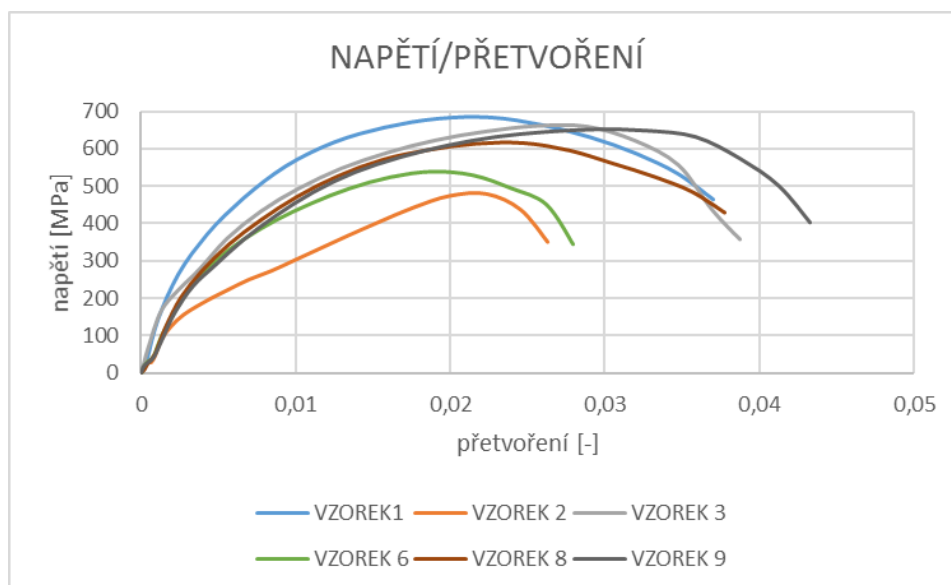
Popis vlákna: Fibrex - A1 (0,4x0,6x25 mm),  $E=200$  GPa,  $\sigma_{\text{výrobce}}=350$  MPa

Tab. 1 - vyhodnocení vlákna FIBREX

Číslo vzorku	Síla [N]	$\Delta l_1$ [mm]	$\Delta l_2$ [mm]	Napětí [Mpa]	$\varepsilon$ [-]	Lom [N/m]
1	164,4	0,2040	0,3152	685	0,1020	159633
2	114,8	0,3458	0,3914	478	0,1729	113557
3	158,8	0,2564	0,3676	662	0,1282	168867
4	201,2	0,4646	0,5982	838	0,2323	387730
5	145,6	0,2800	0,3464	607	0,1400	148125
6	129,6	0,2118	0,3014	540	0,1059	120462
7	163,6	0,4622	0,5734	682	0,2311	256720
8	148	0,2528	0,3648	617	0,1264	163620
9	156,8	0,2940	0,4052	653	0,1470	188155
10	196,8	0,5130	0,5802	820	0,2565	356169
<b>Ø6</b>	<b>152,1</b>	<b>0,2973</b>	<b>0,3868</b>	<b>634</b>	<b>0,1487</b>	<b>180000</b>

\* VZORKY 4,5,7,9 přetrženy v čelistech

Vysvětlení k použitým symbolům v tabulce: Ø6 – zprůměrování 6 vhodných vzorků, síla – maximální docílená síla v prostém tahu,  $\Delta l_1$  – protažení při maximální síle,  $\Delta l_2$  – maximální protažení před přetržením; červeně označené vzorky jsou vyřazeny z důvodů uvedených přímo pod tabulkou.



Obr.8 graf napětí/přetvoření typ Fibrex

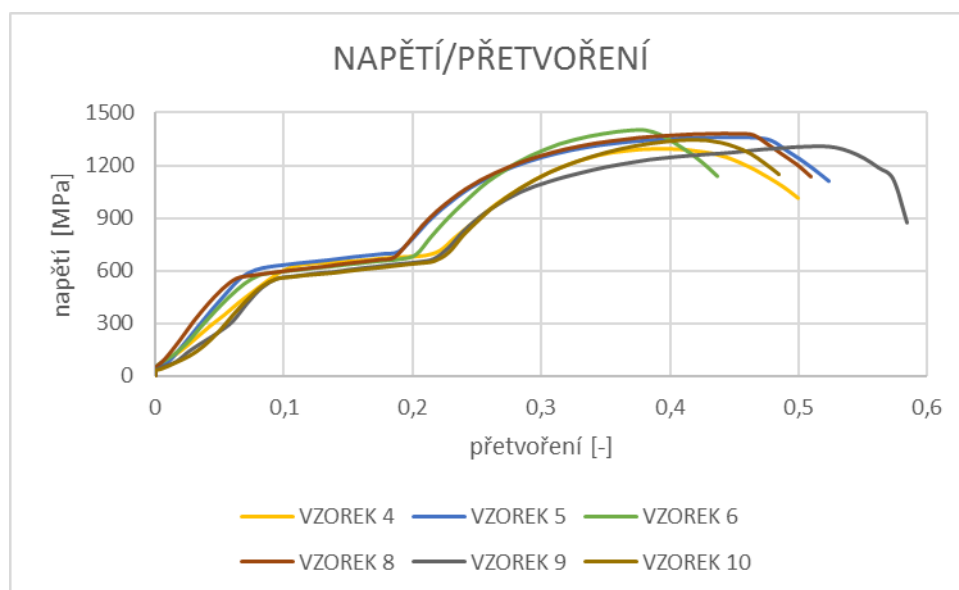
## 5.2.2. Vlákno Dramix 3D 55/30BG

Popis vlákna: Dramix 3D 55/30BG ( $\varnothing$  0,55 mm,  $l=30$  mm),  $E=200$  GPa,  $\sigma_{\text{výrobce}}=1345$  MPa

Tab. 2 – vyhodnocení vlákna Dramix 3D 55/30 BG

Číslo vzorku	Síla [N]	$\Delta l_1$ [mm]	$\Delta l_2$ [mm]	Napětí [Mpa]	$\varepsilon$ [-]	Lom [N/m]
1	266,8	0,5514	1,2210	1123	0,2757	1150326
2	300,8	1,0260	1,0484	1266	0,5130	948282
3	306,4	1,5886	2,0574	1290	0,7943	2036154
4	308	0,7766	0,9998	1296	0,3883	866711
5	323,2	0,8916	1,0468	1360	0,4458	1014811
6	333,2	0,7400	0,8736	1402	0,3700	773806
7	266,8	1,8854	2,7990	1123	0,9427	2354088
8	328	0,8838	1,0182	1381	0,4419	985640
9	311,2	1,0352	1,1680	1310	0,5176	1051519
10	319,6	0,8342	0,9686	1345	0,4171	821734
<b>Ø6</b>	<b>320,5</b>	<b>0,8602</b>	<b>1,0125</b>	<b>1349</b>	<b>0,4301</b>	<b>919000</b>

\* VZOREK 2 přetržen v čelistech, VZORKY 1,3,7 vytahovány



Obr.9 graf napětí/přetvoření Dramix 3D 55/30BG

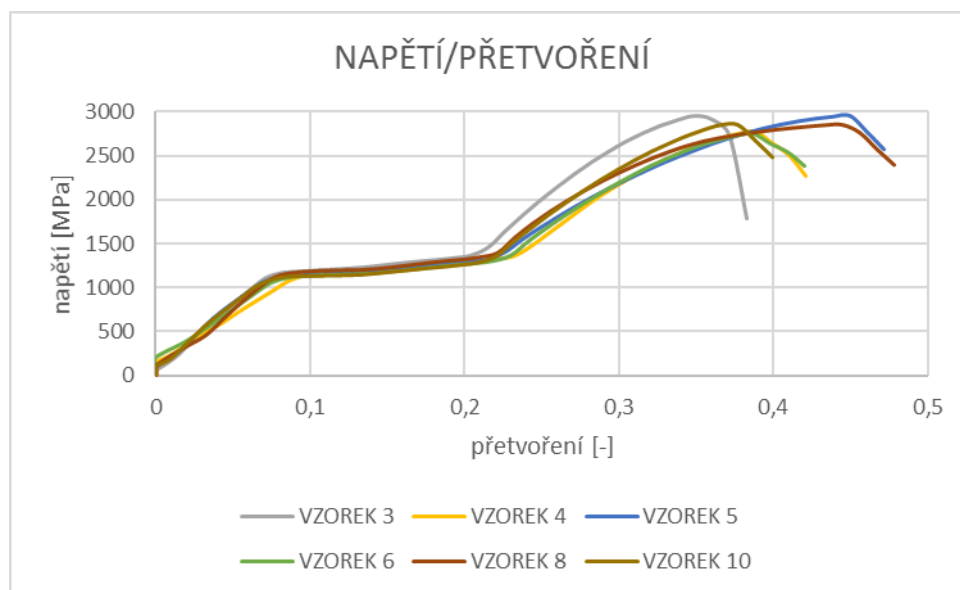
### 5.2.3. Vlákno Dramix RC 80/30 BP

Popis vlákna: Dramix RC 80/30 BP ( $\varnothing$  0,38 mm,  $l=30$  mm),  $E=200$  GPa, pevnost v tahu 3070 MPa

Tab. 3 - vyhodnocení vlákna Dramix RC 80/30 BP

Číslo vzorku	Síla [N]	$\Delta l_1$ [mm]	$\Delta l_2$ [mm]	Napětí [Mpa]	$\varepsilon$ [-]	Lom [N/m]
1	315,2	0,9558	2,6846	2779	0,4779	6122073
2	320,8	0,7820	0,8492	2829	0,3910	1421820
3	335,2	0,6978	0,7658	2956	0,3489	1262113
4	314,6	0,7762	0,8418	2774	0,3881	1326256
5	334,8	0,9000	0,9440	2952	0,4500	1654504
6	312,4	0,7740	0,8404	2755	0,3870	1343087
7	301,0	0,9554	1,0442	2654	0,4777	1700675
8	324,2	0,8886	0,9558	2859	0,4443	1713520
9	327,2	0,9192	0,9640	2885	0,4596	1617180
10	322,8	0,7536	0,7984	2846	0,3768	1270657
<b>Ø6</b>	<b>324,0</b>	<b>0,7984</b>	<b>0,8577</b>	<b>2857</b>	<b>0,3992</b>	<b>1428000</b>

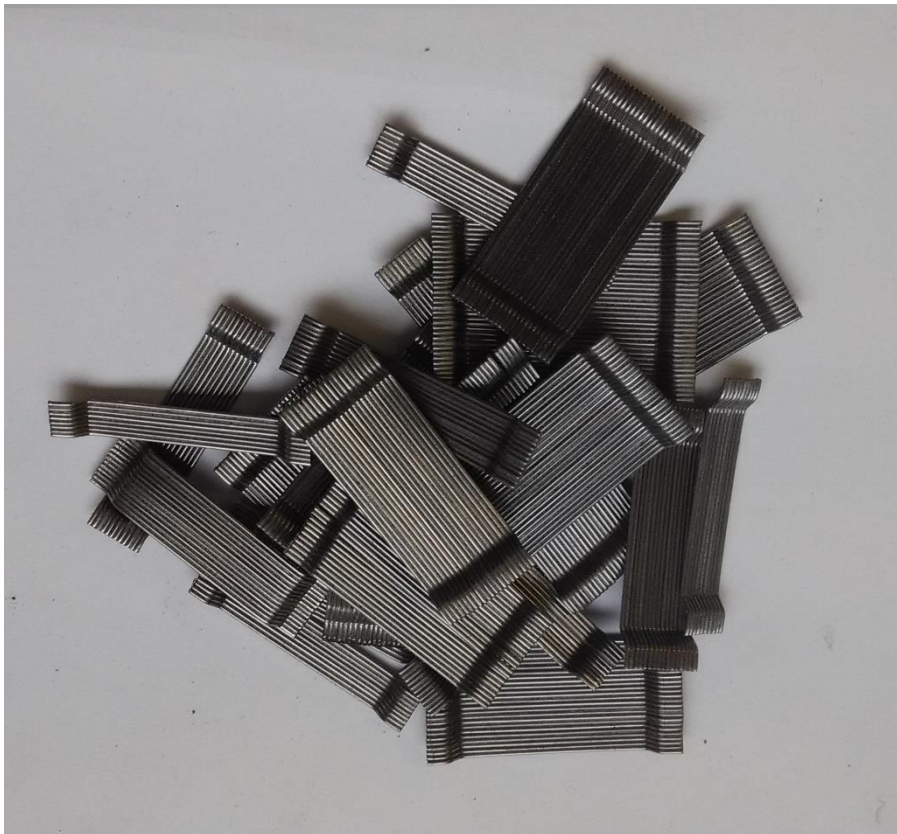
\* VZORKY 7,9 přetrženy v čelistech, VZORKY 1,2 vytahovány



Obr.10 graf síla/protažení typ Dramix RC 80/30 BP



*Obr.11 drátky Fibrex*



*Obr.12 drátky Dramix 3D 55/30 BG*





*Obr.13 drátky Dramix RC 80/30 BP*



*Obr.14 drátky Dramix OL.13*

## Vyhodnocení zkoušek drátků v prostém tahu

Tab. 4 - vyhodnocení drátků

typ	$\sigma_m$ [MPa]	$\sigma_k$ [MPa]	$\sigma_{\text{výrobce}}$ [MPa]
FIBREX	634	374	350
Dramix 3D	1349	1260	1345
Dramix RC	2857	2671	3070

Od této zkoušky jsme očekávali ověření tahové pevnostní charakteristiky udávané výrobcem. Od každého typu bylo vyzkoušeno 10 drátků, z nichž jsem vybral vždy po 6, shodou okolností byly vždy vyřazeny 4 vzorky v každé sérii, které se nepovedly kvalitně odzkoušet. U každé série se našly drátky, které se buď přetrhly v čelistech lisu, nebo se postupně vytahávaly, tyto byly vyřazeny. Drátky Dramix OL. 13 nebylo možné kvůli jejich malým rozměrům odzkoušet.

Důvodem rozdílných výsledků hodnot udávaných naší zkouškou a tahovou pevností udávanou výrobcem je především příliš velká síla utažení, která se těžko odhadovala a která vedla k částečnému zplastizování v místech sevření drátků čelistmi. Dalším faktorem byla „svislost“ drátků uložených v čelistech lisu, tyto komplikace byly způsobeny především drobností drátků a lidským faktorem.

Grafy napětí/přetvoření byly posunuty na vodorovné ose, tento posun byl u každého z drátků proveden tak, aby počátek nárůstu a průběhu napětí koreloval s ostatními. Dále můžeme tvrdit, že přetvoření nemůžeme brát z hlediska hodnot jako relevantní, což bylo zapříčiněno prokluzem v čelistech lisu především na počátku zatěžování. Byť byla na lisu nastavena referenční hodnota  $l_0$ , nebylo ji možné použít pro všechny drátky, a tak bylo přetvoření převzato z protažení, které vyvozovala působící síla, a byla stanovena hodnota  $l_0=2\text{mm}$ . Přetvoření by tak mělo vyhovovat „pouze poměrově“ mezi jednotlivými sériemi drátků. Také tvrdíme, že i když hodnoty přetvoření neodpovídají, tak průběhy ano, a to z důvodu minimálních rozdílů mezi jednotlivými průběhy.

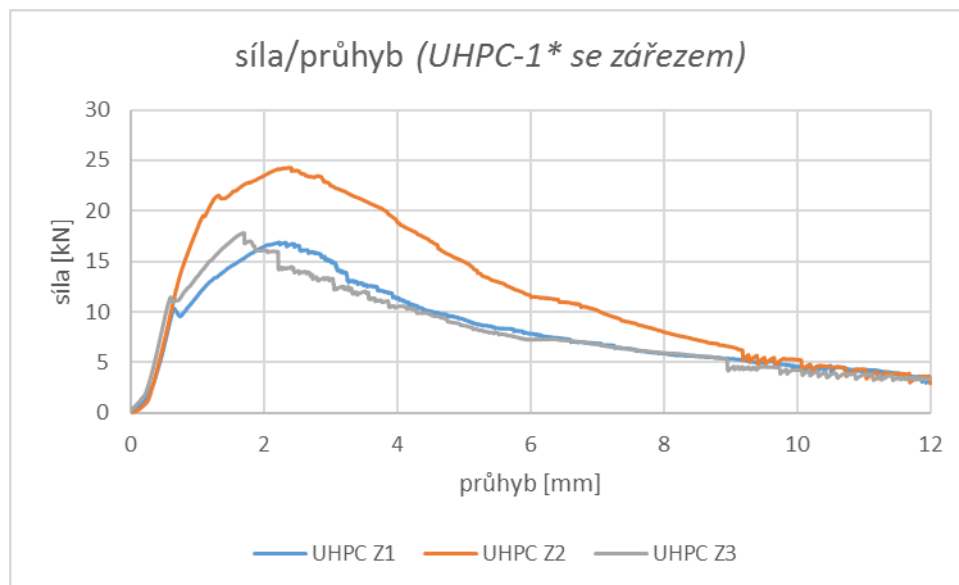
Z výsledků byly spočteny hodnoty tahových pevností průměrné  $\sigma_m$  a charakteristické  $\sigma_k$  vycházející ze Studentova T rozdělení, kde byl použit koeficient  $k_{N\text{-neznámý}}=2,177$ .

Na průbězích drátků je vidět rozdíl mezi průmyslově vyráběnými drátky a drátky, které slouží jako druhotný (odpadní) produkt. Drátky vyráběné jako druhotný produkt mají daleko větší rozptyl hodnot, v našem případě to jsou drátky Fibrex.

### 5.3. Zkoušení trámů

Tab. 5 - výsledky zkoušky UHPC-1\*

Výsledky laboratorní zkoušky -UHPC-*1 (zhotoveny 27.2.2017)									
Číslo vzorku	Rozměry tělesa			Hm. tělesa g	Obj. hm. kg/m <sup>3</sup>	Stáří dny	Tah za ohybu		Lom. energie [N/m]
	Výška	Šířka	Délka				síla	pevn.	
	mm	mm	mm				kN	MPa	
UHPC 1	95,3	100,4	400	10135	2648	28	34,9	10,9	-
UHPC 2	93,4	100,5	400	9983	2659	28	44,3	14,1	-
UHPC 3	96,7	100,3	400	10370	2673	28	44,6	13,8	-
UHPC Z1	74,6	102,2	400	10800	2641	28	16,9	8,9	18199
UHPC Z2	74,1	100,7	400	10705	2657	28	24,3	13,2	27481
UHPC Z3	74,5	99,5	400	10510	2640	28	17,8	9,6	18334

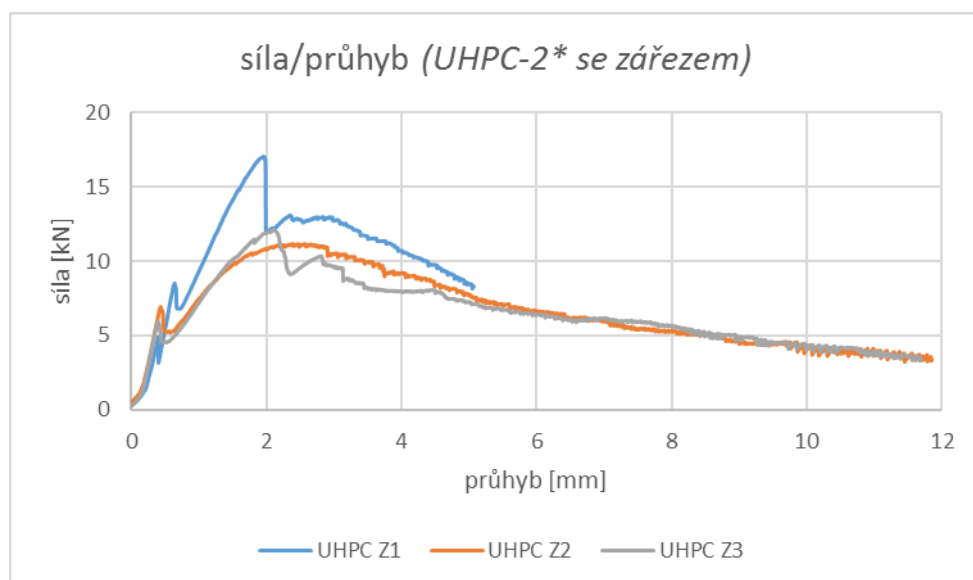


Obr. 15 - graf síla/průhyb UHPC-1\* se zářezem

Tab. 6 - výsledky zkoušky UHPC-2\*

Výsledky laboratorní zkoušky - UHPC-2* (zhotoveny 13.3.2017)									
Číslo vzorku	Rozměry tělesa			Hm. tělesa g	Obj. hm. kg/m <sup>3</sup>	Stáří dny	Tah za ohybu		Lom. energie [N/m]
	Výška	Šířka	Délka				síla	pevn.	
	mm	mm	mm				kN	MPa	
UHPC 1	100,0	98,8	400,0	10345	2616	28	29,9	8,9	-
UHPC 2	97,4	100,3	400,0	10350	2648	28	26,3	8,0	-
UHPC 3	97,7	100,5	400,0	10335	2632	28	22,8	6,9	-
UHPC Z1	103,0	76,7	400,0	10735	2605	28	17,0	12,7	10158
UHPC Z2	100,3	75,8	400,0	10350	2579	28	11,2	8,7	14175
UHPC Z3	100,6	75,8	400,0	10335	2591	28	12,1	9,4	13604

Chyba v nastavení lisu u zkoušení vzorku UHPC Z1 způsobila, že trámec nebyl zatížen do průhybu alespoň 10 mm. Tento vzorek byl vyřazen z vyhodnocení, ale pokud bychom předpokládali, že průběh UHPC Z1 bude od tohoto průhybu cca 5 mm probíhat obdobně jako u zbylých dvou vzorků, můžeme zprůměrování těchto dvou vzorků od průhybu cca 5 mm přičíst k původní hodnotě a vyjde nám 15 387 N/m.

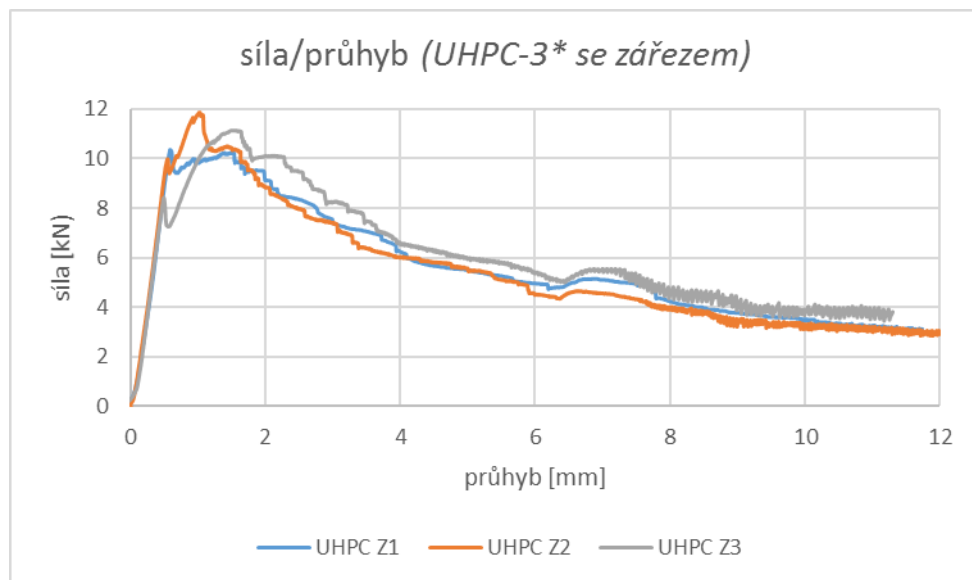


Obr. 16 - graf síla/průhyb UHPC-2\* se zářezem



Tab. 7 – výsledky zkoušky UHPC-3\*

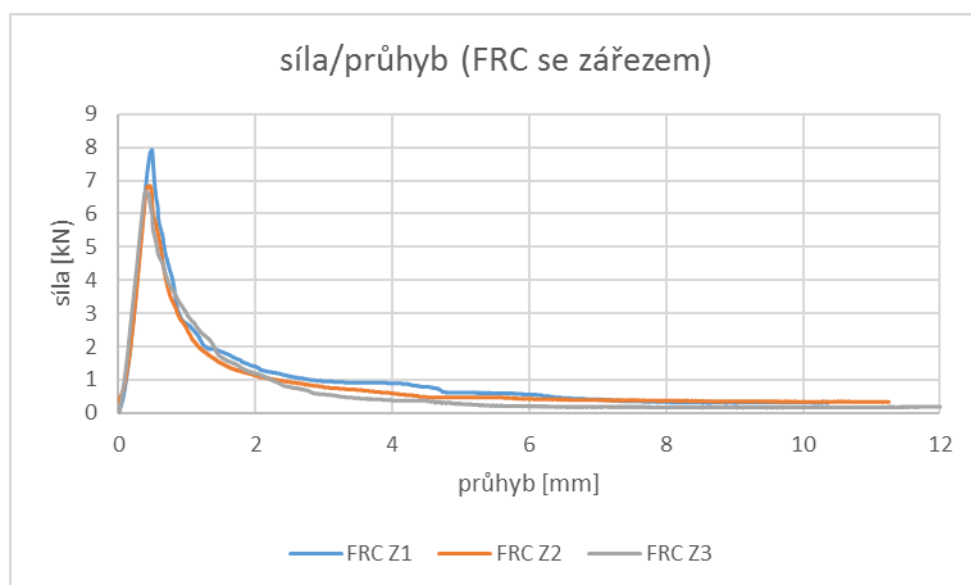
Výsledky laboratorní zkoušky - UHPC-3* (zhotoveny 20.3.2017)									
Číslo vzorku	Rozměry tělesa			Hm. tělesa g	Obj. hm. kg/m <sup>3</sup>	Stáří dny	Tah za ohybu		Lom. energie [N/m]
	Výška	Šířka	Délka				síla	pevn.	
	mm	mm	mm				kN	MPa	
UHPC 1	97,5	99,5	400,0	10215	2633	28	31,1	9,7	-
UHPC 2	98,3	99,6	400,0	10285	2625	28	28,2	8,7	-
UHPC 3	98,1	99,7	400,0	10350	2645	28	25,9	8,0	-
UHPC Z1	100,5	74,6	400,0	10405	2588	28	10,3	8,3	12033
UHPC Z2	100,2	75,1	400,0	10320	2574	28	11,9	9,4	11740
UHPC Z3	99,5	74,1	400,0	10330	2595	28	11,1	9,2	13081



Obr. 17 - graf síla/průhyb UHPC-3\*

Tab. 8 - výsledky zkoušky FRC

Výsledky laboratorní zkoušky - FRC (zhotoveny 27.3.2017)									
Číslo vzorku	Rozměry tělesa			Hm. tělesa g	Obj. hm. kg/m <sup>3</sup>	Stáří dny	Tah za ohybu		Lom. energie [N/m]
	Výška	Šířka	Délka				síla	pevn.	
	mm	mm	mm				kN	MPa	
FRC 1	97,5	99,3	400,0	9325	2408	28	15,7	4,9	-
FRC 2	97,5	99,3	400,0	9325	2408	28	14,5	4,5	-
FRC 3	95,7	100,0	400,0	9125	2383	28	14,7	4,6	-
FRC Z1	101,4	75,3	400,0	9635	2375	28	7,9	6,2	2110
FRC Z2	97,5	74,5	400,0	9245	2370	28	6,8	5,7	1922
FRC Z3	100,3	76,1	400,0	9525	2374	28	6,7	5,2	1626



Obr. 18 - graf síla/průhyb FRC

## Použité receptury

Tab. 9 – receptura UHPC-1\*

receptura		kg/m <sup>3</sup>
<b>UHPC-1*</b>	cement	600
	voda	160,0
	v/c	0,21
kamenivo čedič	jemné (0-4)	780
	střední (4-8)	360
	hrubé (8-16)	560
superplast.	Stachment 508	28
mikrosilika	Stachesil	80
drátky	Dramix 80/30 BP	60
(drátky)	Dramix OL. 13	80
<b>Σ</b>		<b>2708</b>

Tab. 10 – receptura UHPC-2\*

receptura		kg/m <sup>3</sup>
<b>UHPC-2*</b>	cement	600
	voda	160,0
	v/c	0,21
kamenivo čedič	jemné (0-4)	780
	střední (4-8)	360
	hrubé (8-16)	560
superplast.	Stachment 508	28
mikrosilika	Stachesil	80
drátky	Dramix 80/30 BP	60
<b>Σ</b>		<b>2628</b>

Tab. 11 – receptura UHPC-3\*

receptura		kg/m <sup>3</sup>
<b>UHPC-3*</b>	cement	600
	voda	160,0
	v/c	0,21
kamenivo čedič	jemné (0-4)	780
	střední (4-8)	360
	hrubé (8-16)	560
superplast.	Stachement 508	28
mikrosilika	Stachesil	80
drátky	Dramix 3D 55/30 BG	60
<b>Σ</b>		<b>2628</b>

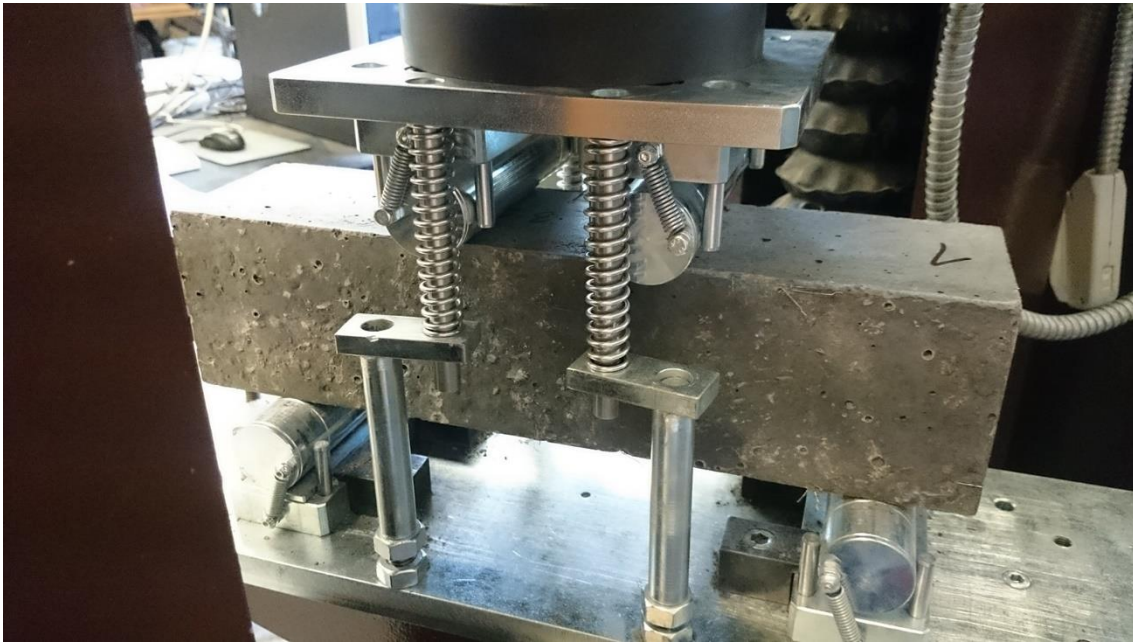
U receptur UHPC se mění pouze typ a množství drátků.

Tab. 12 – receptura FRC

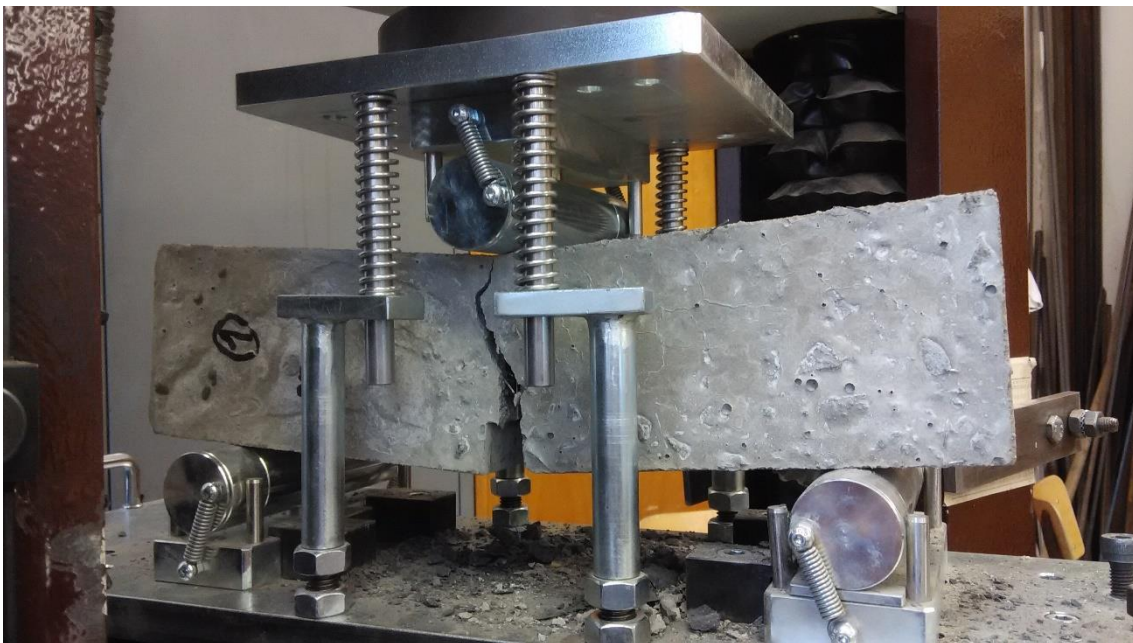
receptura		kg/m <sup>3</sup>
<b>FRC</b>	cement	370
	voda	170,0
	v/c	0,46
kamenivo křemen	jemné (0-4)	863
	střední (4-8)	195
	hrubé (8-16)	755
superplast.	Stachement 2128	3
drátky	Fibrex	60
<b>Σ</b>		<b>2416</b>

Pod zkratkou FRC je uveden obyčejný referenční drátkobeton.

## Fotografie ze zkoušení trámců



*Obr. 19 – čtyřbodový ohyb UHPC-3\* bez zářezu*



*Obr. 20 – tříbodový ohyb FRC se zářezem*



*Obr. 21 – UHPC-I\* bez zářezu v zatěžovacím lisu*





*Obr. 22 – trámec UHPC-3\* se zářezem*



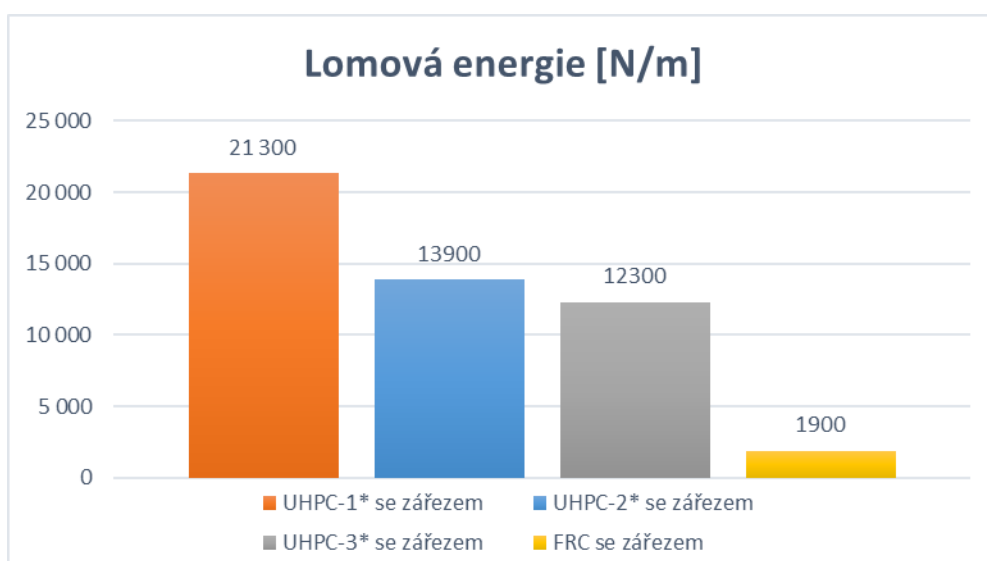
*Obr. 23 – struktura FRC – trámce bez zářezu*

## Vyhodnocení zkoušek trámců v třibodovém a čtyřbodovém tahu za ohybu

Tab. 13 - vyhodnocení zkoušky v tahu za ohybu

typ	$\sigma_m$ [MPa]	$\sigma_k$ [MPa]	$s_3$ [-]	$v_3$ [-]	Ø Lom. en. [N/m]
UHPC-1* bez zářezu	12,9	7,0	1,759	0,136	-
UHPC-1* se zářezem	10,5	2,8	2,296	0,218	21300
UHPC-2* bez zářezu	7,9	4,7	0,977	0,123	-
UHPC-2* se zářezem	10,3	3,2	2,088	0,203	13900
UHPC-3* bez zářezu	8,8	5,9	0,862	0,098	-
UHPC-3* se zářezem	9,0	7,0	0,591	0,066	12300
FRC bez zářezu	4,7	4,0	0,196	0,042	-
FRC se zářezem	5,7	4,0	0,515	0,090	1900

Vysvětlení k použitým symbolům v tabulce:  $\sigma_m$  – průměrná pevnost v tahu,  $\sigma_k$  – charakteristická pevnost v tahu, ( $s_3$  – směrodatná odchylka pro  $\sigma_k$ ,  $v_3$  – variační koeficient pro  $\sigma_k$ ,  $k_n=3,372$  pro  $\sigma_k$ )



Obr. 24 – porovnání lomové energie – sloupcový gra

Rychlost zatěžování byla 0,2 mm/min do průhybu 3 mm a dále se zatěžovalo rychlostí 0,6 mm/min do průhybu 12 mm, zkouška jednoho trámce tak trvala cca 30 min. Lomová energie byla počítána pro průhyb 10 mm kvůli odečtení nulových hodnot zatěžovací síly vlivem dosednutí lisu.



### Postup pro přepočítání pomocí „fiktivních“ pevnostních (lomových) jednotek

Na začátek bych chtěl zdůraznit, že tyto fiktivní jednotky jsou pouze určitým poměrovým vyjádřením mezi drátky, které se nachází ve vzorcích a hodnoty samy o sobě nemají žádnou vypovídající hodnotu. Předpokladem pro následující postup je stejná receptura všech vyrobených vzorků z UHPC, díky čemuž můžeme tvrdit, že „základní-srovnávací“ pevnost v tahu za ohybu nebo „základní-srovnávací“ lomová energie je pro všechny UHPC stejná a rozdíly mezi jednotlivými vzorky jsou dány pouze rozdílem v drátcích přidaných do jednotlivých sérií UHPC. Série UHPC-2\* je obohacena množstvím 60 kg/m<sup>3</sup> drátků Dramix 80/30 BP, série UHPC-3\* je obohacena množstvím 60 kg/m<sup>3</sup> Dramix 3D 55/30 BG a série UHPC-1\* je obohacena množstvím 60 kg/m<sup>3</sup> Dramix 80/30 BP a 80 kg/m<sup>3</sup> Dramix OL. U série UHPC-1\* je tak vytvořen rozdíl 80 kg/m<sup>3</sup>, který představuje nárůst z 2628 kg/m<sup>3</sup> na 2708 kg/m<sup>3</sup>, tento rozdíl je zanedbán. Drátky Dramix OL mají délku 13 mm, zbylé mají délku 30 mm, tento rozdíl je vzhledem k převládajícím délkovým rozměrům 30 mm také zanedbán. Tyto délkové rozdíly by mohly být předmětem dalšího zkoumání.

Přepočítání je stanoveno pouze pro vzorky se zářezem, vzorky bez zářezu byly vyrobeny pouze za účelem ověření tahové pevnosti, viz tabulka 13, a proto pro zjednodušení bude v následujícím textu a tabulkách použito zkratk: UHPC-1\* se zářezem = UHPC 1, UHPC-2\* se zářezem = UHPC 2, UHPC-3\* se zářezem = UHPC 3

Tab. 14 – porovnání vzorků mezi sebou – menší/větší

porovnání	$\sigma_m$ [%]	$\sigma_k$ [%]	Ø Lom. en. [%]
UHPC 2/UHPC 1	97,43	115,44	65,26
UHPC 3/UHPC 1	85,07	248,95	57,75
UHPC 3/UHPC 2	87,32	215,65	88,49
FRC/UHPC 1	54,05	141,37	8,92
FRC/UHPC 2	55,48	122,46	13,67
FRC/UHPC 3	63,53	56,78	15,45

V tabulce 14 je porovnání jednotlivých sérií mezi sebou. Čísla v tabulce jsou procenta pro pevnosti nebo lomovou energii, která vyjadřují procentuální pevnost respektive lomovou energii vzorku v čitateli vůči vzorku ve jmenovateli. Např. řádek UHPC 3/UHPC 1 a sloupec pro lom. energii – série UHPC 3 má lomovou energii 57,75 % vůči sérii UHPC 1. Série byly vždy porovnávány podle předpokládané „mocnosti“, kdy v čitateli je předpokládané menší číslo, tento předpoklad však bohužel u charakteristických pevností z velké části nefunguje (v tabulce červeně), což je zapříčiněno velkým rozptylem hodnot.

Tab. 15 – rozptyl počtu drátků v hmotnosti 60 kg

typ drátků	počet drátků/60 kg
Dramix 80/30 BP	31164 ÷ 29954
Dramix 3D 55/30 BG	9453 ÷ 9190
FIBREX	2299 ÷ 2000

Tab. 16 – počet „lomových“ jednotek pro jednotlivé série

série	1 drátek [N/m]	spočteno z	počet "lomových" jednotek
UHPC 2	1428356	=>	31164 ÷ 29954
UHPC 3	919037	=>	9453 ÷ 9190
FRC	180385	=>	2299 ÷ 2000
UHPC 1	-	UHPC 2	97485 ÷ 91830
		UHPC 3	90114 ÷ 84445
		Ø	93799 ÷ 88137

Tab. 17 – počet „pevnostních“ jednotek pro jednotlivé série

série	$\sigma_{\text{výrobce}}$ [MPa]	spočteno z	počet "pevnostních" jednotek
UHPC 2	3070	=>	66982 ÷ 64381
UHPC 3	1345	=>	13834 ÷ 13450
FRC	350	=>	4460 ÷ 3880
UHPC 1	-	UHPC 2	77842 ÷ 74635
		UHPC 3	76849 ÷ 72950
		Ø	77345 ÷ 73793

V tabulce 16 a 17 jsou přepočteny série na fiktivní „lomové“ („pevnostní“) jednotky, které jsou vypočítány přenásobením počtu drátků z tabulky 15 a lomovou energií jednoho drátku tabulka 16 (respektive pevností drátku, kterou udává výrobce tabulka 17). Série UHPC 1 je dopočtena z porovnání UHPC 3/UHPC 2, kde byl stanoven počet fiktivních jednotek/ 1%.

Tab. 18 – konečné výsledky

porovnání	pevnost	[%]	Ø rozdíl	jedn. / 1%
UHPC2/UHPC1		2,57	60409	23483
UHPC3/UHPC1		14,93	61927	<b>4149</b>
UHPC3/UHPC2		12,68	52039	<b>4104</b>
FRC/UHPC1		45,95	71399	1554
FRC/UHPC2		44,52	61511	1382
FRC/UHPC3		36,47	9472	260
porovnání	lomová energie	[%]	Ø rozdíl	jedn. / 1%
UHPC2/UHPC1		34,74	60409	<b>1739</b>
UHPC3/UHPC1		42,25	81647	<b>1932</b>
UHPC3/UHPC2		11,51	21237	<b>1845</b>
FRC/UHPC1		91,08	88819	975
FRC/UHPC2		86,33	28410	329
FRC/UHPC3	84,55	7172	85	

V tabulce 18 pak můžeme vidět procentuální rozdíl lomové energie (pevnosti) a rozdíl mezi fiktivními jednotkami pro jednotlivé vzorky (série). Poslední sloupec tak udává počet fiktivních jednotek na jedno procento, čísla v posledním sloupci v jednotlivých sekcích by se měla rovnat.

## Zhodnocení výsledků

Na výsledcích je vidět, že tři vzorky pro jednu sérii nejsou dostačující. Výsledky jsou dost zkresleny, převážně pak vždy jedním vzorkem ze série, který vybočuje „z řady“. Tento fakt je zřejmý u charakteristických hodnot, které můžeme vidět v tabulce 11, kde referenční drátkobeton FRC nabývá vyšších charakteristických pevnostních hodnot oproti ostatním UHPC. Dále tomu tak je u pevnostních charakteristik, ať už průměrných nebo charakteristických, kde by větších hodnot měly nabývat trámce se zářezem, protože místo trhliny je předem definováno, viz kapitola tříbodový a čtyřbodový ohyb.

Jiná situace je tomu v případě hodnot ukazujících lomovou energii. Lomová energie byla spočtena zprůměrováním hodnot v sériích. Pokud se podíváme na tyto hodnoty podrobněji v tab.5-tab.8, pak zjistíme a můžeme tvrdit, že tyto hodnoty se od sebe příliš neliší mimo jeden vzorek ze série UHPC-1\*, tento fakt ponecháme zanedbán.

Série FRC byla do práce zařazena především kvůli porovnání hodnot s UHPC co do „mocností“ (číselné hodnoty) pevnosti v tahu. Do tabulky pak bylo zařazeno srovnání FRC s UHPC pouze pro názornost, neboť nemůžeme srovnávat „hrušky s jablky“ a naopak. Shoda, která nastala u pevnostních charakteristik při porovnání FRC/UHPC, je čistě náhodná.

Porovnání pomocí „pevnostních“ jednotek jsem se pokusil stanovit pokusně, protože po zkoušení trámců v jednotlivých sériích byl vidět velký rozptyl těchto hodnot. Porovnání bylo provedeno pouze pro průměrné pevnostní hodnoty v tahu za ohybu, pro charakteristické hodnoty to nebylo možné, viz předchozí řádky.

Porovnání „lomových“ jednotek mezi sériemi UHPC dalo shodu mezi 90-95 %, což nelze považovat za náhodný jev.

## 6. Závěr

Důvodem výběru praktické bakalářské práce byla touha zkusit si něco nového, co jsem do těchto dnů neabsolvoval. Tato práce by měla být stručná a výstižná bez nadbytečného balastu, ilustrována mnoha obrázky, grafy a fotkami, což se doufám zdařilo.

Tato práce potvrdila aplikovatelnost výše zmíněného postupu (přepočtu) a nastínila možnost, jakým způsobem stanovit přepočet pro pevnost v tahu za ohybu nebo lomovou energii drátkobetonu v závislosti na počtu drátků a jejich pevnosti, respektive lomové energii drátků. Lomová energie je méně náchylná k výskytu defektů, ať už mikrotrhlin, rozložení drátků, atp. oproti pevnosti v tahu za ohybu, jinými slovy výsledky lomových energií jednotlivých trámců v sérii jsou obdobně velké a neberou ohledy na velikost síly, která iniciuje první trhlinu a s jejím následným poklesem trhlinu rozevívá.

### **Návrhy pro možnosti dalšího směřování a zkoumání**

Bylo by vhodné zjistit a ověřit hodnotu pro výše zmíněnou „základní-srovnávací“ lomovou energii UHPC bez drátků, abychom mohli konstatovat a vyvrátit případné pochybnosti, které mohly vzniknout zanedbáním několika faktů, které jsme podstoupili, jako například, když tvrdíme, že série UHPC se svými složenými neliší.

Dalším směřováním a prohlubováním znalostí v této problematice by mohla být délka drátků, která bude jistě hrát určitou roli. Pokud zachováme hmotnostní množství a vezmeme jinou délku drátků pro každou sérii, do výše zmíněného přepočtu pomocí fiktivních jednotek vnášíme systematickou chybu. Tento fakt by se dal jistě jednoduše ověřit vyrobením dvou sérií s drátky stejné pevnosti, ale jiné délky.

### **Doporučení**

Při dalším bádání bych doporučoval při výrobě vzorků vždy vyrobit z jedné várky vzorky pro drátkobeton a pro srovnávací beton, tímto postupem by se dal do značné míry eliminovat vysoký rozptyl hodnot při zkouškách drátkobetonu, který vzniká vlivem náhodného uspořádání drátků a nestejnorodostí v betonu, takto by se pak i při malém počtu vzorků daly s jistotou vyřadit ty, které tam „nepatří“.

## Použitá literatura

doc. Ing. Milena Pavlíková, P., doc. Ing. Zbyšek Pavlík, P., & Prof. Ing. Jiří Hošek, D. (2011). *Materiálové inženýrství I (druhé rozšířené vydání)*. Praha.

*FAST VUT v Brně*. (nedatováno). Načteno z

<http://fast10.vsb.cz/206/Laborator/Downloads/Stav/Cviceni/Cvi8/pevnostvtahuohybem.pdf>

Svaz výrobců betonu. (nedatováno). *EBETON*. Načteno z

<http://www.ebeton.cz/pojmy/vlaknobeton>

Svaz výrobců betonu. (nedatováno). *EBETON*. Načteno z <http://www.ebeton.cz/pojmy/beton>

Svaz výrobců betonu, Č. (2001). *Speciální betony*. Praha: CZ SVB, s.r.o.

Veselý, I. V. (2005). *Parametry betonu pro popis lomového chování*. Brno: VUT v Brně.

*WikiSkripta*. (nedatováno). Načteno z <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Kompozit>