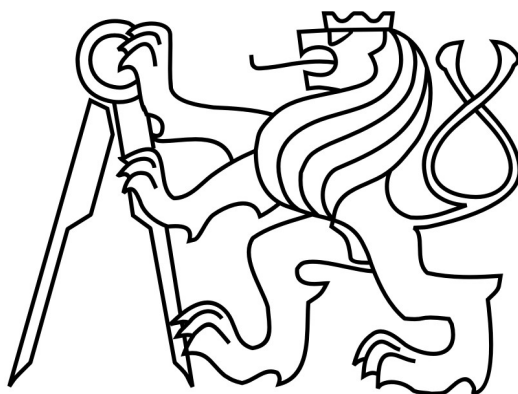


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vývoj a testování přístroje pro cílenou orientaci  
vláken v cementových kompozitech pomocí  
elektromagnetického pole**

2020

Bc. Kristýna Takáčová

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Experimentální centrum

**Vývoj a testování přístroje pro cílenou orientaci  
vláken v cementových kompozitech pomocí  
elektromagnetického pole**

Development and testing of device using  
electromagnetic field for targeted orientation of fibres  
in cement composites

Diplomová práce

Autor: Bc. Kristýna Takáčová

Vedoucí práce: Ing. Jindřich Fornůsek, Ph.D.

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Takáčová Jméno: Kristýna Osobní číslo: 426378  
 Zadávající katedra: Experimentální centrum  
 Studijní program: Materiálové inženýrství  
 Studijní obor: Stavební inženýrství

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vývoj a testování přístroje pro cílenou orientaci vláken v cementových kompozitech pomocí elektromagnetického pole

Název diplomové práce anglicky: Development and testing of a device using electromagnetic field for targeted orientation of fibers in cement composites

#### Pokyny pro vypracování:

Zpracování rešerše, návrh a sestavení přístroje pro orientaci vláken, výroba zkušebních vzorků, měření orientace vláken, zpracování výsledků a jejich vyhodnocení.

#### Seznam doporučené literatury:

Vycházej z bakalářské práce studentky.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Jindřich Fornůsek, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 2.10.2019

Termín odevzdání diplomové práce: 5.1.2020

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 diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové 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“.*

2.10.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem vypracovala předloženou práci samostatně, a že jsem uvedla veškerou použitou literaturu.

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).

Praha, 2. ledna 2020

.....

Kristýna Takáčová

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu diplomové práce Ing. Jindřichu Fornůskovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a cenné rady. Dále bych ráda poděkovala konzultantům, Ing. Karlu Künzelovi, CSc. a doc. Ing. Radoslavu Sovjákovi, Ph.D. za to, že si vždy našli čas na konzultace a připomínky k tématu.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá magnetickou orientací feromagnetických (ocelových) vláken v UHPFRC pomocí magnetického pole. Dále vyšetřuje vliv frekvence magnetického pole na magnetickou orientaci vláken. Byl proveden návrh a sestavení zařízení pro magnetickou orientaci vláken ve vzorcích o rozměrech 150 mm x 150 mm a neomezené délky. Byly vyrobeny vzorky z UHPFRC standardizovaných velikostí. Vybrané vzorky byly podrobeny magnetické orientaci vláken. Orientace vláken byla ověřena pomocí měření činitele jakosti cívky a zkoušce pevnosti v tahu ohybem. Výsledky vzorků, jež byly vystaveny magnetické orientaci vláken, byly porovnávány s výsledky vzorků, které magnetické orientaci vláken nebyly podrobeny.

**Klíčová slova:** cementový kompozit, magnetické pole, ocelová vlákna, orientace, UHPFRC

## **Abstract**

The paper deals with magnetic orientation of ferromagnetic (steel) fibres in UHPFRC using magnetic field. The influence of frequency of the magnetic field on magnetic orientation of fibres is investigated as well. Design and construction of device for magnetic orientation of fibers in samples of dimensions 150 mm x 150 mm and unlimited length was performed. UHPFRC standardized sample size were produced. Selected samples were subjected to magnetic orientation of fibers. The fibers orientation was verified by measuring coil quality factor Q and bending tensile strength test. The results of the samples exposed to the magnetic orientation of fibers were scored with the results of samples exposed to the magnetic orientation of the fibers were scored with results of samples that were not subjected to the magnetic orientation of fibers.

**Keywords:** cementitious composite, magnetic field, steel fibers, orientation, UHPFRC

## OBSAH

1	Úvod a cíl práce .....	1
1.1	Motivace .....	2
2	Rešeršní část.....	2
2.1	Orientace ocelových vláken v cementových kompozitech .....	2
2.1.1	Vliv reologických vlastností na orientaci vláken v cementových kompozitech.....	3
2.1.2	Mechanická orientace ocelových vláken v cementových kompozitech.....	4
2.1.3	Magnetická orientace vláken v cementových kompozitech .....	6
2.2	Účinky technologie MOF na degradaci materiálu .....	11
2.2.1	Degradace UHPFRC.....	11
2.2.2	Vliv magnetického pole na korozi vláken .....	13
2.2.3	Magneticky upravená voda .....	14
2.2.4	Závěr a celkové zhodnocení předpokládané degradace UHPFRC vyrobeného metodou MOF	16
3	Souhrn experimentů a výsledků z předchozího výzkumu .....	17
4	Experimentální část .....	21
4.1	Vliv frekvence elektromagnetického pole na MOF .....	21
4.2	Výroba zařízení č. 2 pro MOF .....	23
4.3	Výroba vzorků z UHPFRC .....	26
4.4	Testování vzorků z UHPFRC .....	30
4.4.1	Měření činitele jakosti cívky Q .....	30
4.4.2	Zkouška pevnosti v tahu ohybem.....	34
4.4.3	Faktor ohybové tuhosti $FT$ .....	37
4.4.4	Zkouška pevnosti v tlaku .....	38
4.5	Výsledky.....	40
4.5.1	Malé nové vzorky 40 mm x 40 mm x 160 mm.....	40
4.5.2	Velké nové vzorky 100 mm x 100 mm x 400 mm.....	43

4.5.3	Malé staré vzorky z roku 2017_ 40 mm x 40 mm x 160 mm.....	46
4.5.4	Souhrn a zhodnocení výsledků mechanických zkoušek .....	49
5	Závěr .....	50
6	Návrh postupu pro další výzkum .....	52
	Seznam použité literatury: .....	53



## Seznam obrázků

Obr. 1 Křivka tekutosti newtonovské kapaliny [5] .....	3
Obr. 2 Křivka tekutosti binghamovské kapaliny [5].....	3
Obr. 3 Preferovaná orientace vláken pro cementové kompozity [4].....	5
Obr. 4 Efekt stěn bednění [4] .....	5
Obr. 5 Rychlostní proudový profil [3] .....	6
Obr. 6 Magnetická orientace vláken v sonogelové matrici [4].....	6
Obr. 7 Magnetické pole, siločáry cívky [14] .....	7
Obr. 8 U.S. Patent 4,062,913, 1-forma z neferomagnetického materiálu, 2-cementová matrice s ocelovými vlákny,3- elektromagnet, cívka, 4,5 – mechanické vibrátory [15] .....	8
Obr. 9 Přístroj pro orientaci vláken dle patentu US 2006/0244168 A1 [16].....	9
Obr. 10 Závislost potřebného času k orientaci vláken na magnetické indukci [17].....	9
Obr. 11 Zařízení pro magnetickou orientaci vláken [17] .....	10
Obr. 12 Rozřezaný vzorek, označení jednotlivých segmentů.....	10
Obr. 13 Rentgenové snímky zorientovaných vzorků [17] .....	11
Obr. 14 mezifázová vrstva_ konvenční výztuž .....	12
Obr. 15 mezifázová vrstva_ ocelová vlákna .....	12
Obr. 16 a) koroze Fe bez magnetického pole, b) koroze Fe s působením magnetického pole 0,35 T..	13
Obr. 17 Pokles úhlu mezi atomy vodík v molekule vody při vystavení magnetickému poli [22].....	14
Obr. 18 Mikroskopické snímky hydratace cementu [21] .....	15
Obr. 19 Průběh magnetických indukčních čar u tyčového magnetu [14] .....	16
Obr. 20 Silové působení magnetické pole na jedno ocelové vlákno.....	17
Obr. 21 MOF zařízení č.1 .....	18
Obr. 22 Vzorek sonogelu s ocelovými vlákny .....	19
Obr. 23 Průběh činitelejakosti Q pro nezorientované (červeně) a zorientované (zeleně a modře) vzorky s objemem vláken 1,5 % .....	20
Obr. 24 CT_Skeny pro zorientovane a nezorientované vzorky UHPFRC.....	20

Obr. 25 Fotografie vzorků pro různou magnetickou indukci, vlevo před vystavení magnetickému poli, v pravo po vystavení magnetickému poli.....	21
Obr. 26 Schéma zapojení při měření vlivu frekvence na magnetickou orientaci vláken v sonogelu ....	22
Obr. 27 Výsledný graf závislosti úhlu srovnání na magnetické indukci pro různé frekvence od 20-400 Hz.....	23
Obr. 28 Výroby cívky KATKA 3 .....	24
Obr. 29 Schéma zapojení zařízení č. 2 .....	24
Obr. 30 Testování a měření zařízení č.2 .....	25
Obr. 31 Testování funkčnosti zařízení č.2 pomocí sonogelu a ocelových vláken v průhledné plastové formě.....	26
Obr. 32 Připravené formy.....	27
Obr. 33 Odbedněné vzorky 40 mm x 40 mm x 160 mm, rozdílná kvalita povrchu, v levo zorientovaný vzorek, vpravo nezorientovaný vzorek.....	28
Obr. 34 Zařízení č. 1_ výroba vzorků z UHPFRC .....	29
Obr. 35 Zařízení č.2_výroba vzorků z UHPFRC .....	29
Obr. 36 Měření činitele jakosti cívky Q .....	31
Obr. 37 Výsledky měření činitele jakosti cívky Q pro nové vzorky, modré odstíny nezorientované vzorky, oranžové odstíny zorientované vzorky (vzorky, které prošly magnetickým pole) .....	32
Obr. 38 Výsledky měření činitele jakosti cívky Q pro staré vzorky z roku 2017, modře nezorientované vzorky, červeně zorientované, světlé odstíny 0,75 % objemu vláken, tmavé odstíny 1,5 % objemu vláken .....	33
Obr. 39 Tříbodová zkouška ohybem 1) zatěžovací válečky 2) podpěrný váleček 3) podpěrný váleček [34] .....	34
Obr. 40 Čtyřbodová zkouška ohybem 1) zatěžovací válečky 2) podpěrný váleček 3) podpěrný váleček [34] .....	35
Obr. 41 Zkouška pevnosti v tahu ohybem (tříbodová, lis MTS).....	36
Obr. 42 Rozlomené vzorky 100 mm x 100 mm 400 mm, po zkoušce v tahu čtyřbodovým ohybem....	36
Obr. 43 Diagram odolnosti, vzorek 40 mm x 40 mm x 160 mm plocha Tb použita pro výpočet faktoru ohybové tuhosti FT.....	37

Obr. 44 Příprava vzorku pro zkoušku pevnosti v tlaku, osazení roznášecí ocelové destičky .....	39
Obr. 45 Diagram odolnosti nové trámečky 40 mm x 40 mm x 160 mm, oranžové odstíny zorientované vzorky a modře nezorientované vzorky .....	41
Obr. 46 Graficky znázorněné hodnoty faktoru ohybové tuhosti, oranžové odstíny zorientované vzorky, modré odstíny nezorientované vzorky .....	41
Obr. 47 Graficky znázorněné hodnoty tlakové pevnosti, oranžové odstíny zorientované vzorky, modré odstíny nezorientované vzorky .....	42
Obr. 48 Diagram odolnosti nové trámečky 100 mm x 100 mm x 400 mm, oranžové odstíny zorientované vzorky a modře nezorientované vzorky .....	44
Obr. 49 Graficky znázorněné hodnoty faktoru ohybové tuhosti, oranžové odstíny zorientované vzorky, modré odstíny nezorientované vzorky .....	45
Obr. 50 Graficky znázorněné hodnoty tlakové pevnosti, oranžové odstíny zorientované vzorky, modré odstíny nezorientované vzorky .....	45
Obr. 51 Diagram odolnosti staré trámečky 40 mm x 40 mm x 160 mm, oranžové odstíny zorientované vzorky a modře nezorientované vzorky, světlé odstíny 0,75 % vláken, tmavé odstíny 1,5 % vláken...	47
Obr. 52 Diagram odolnosti staré nezorientované trámečky 40 mm x 40 mm x 160 mm, modře nezorientované vzorky, světlé odstíny 0,75 % vláken, tmavé odstíny 1,5 % vláken.....	47
Obr. 53 Graficky znázorněné hodnoty faktoru ohybové tuhosti, oranžové odstíny zorientované vzorky, modré odstíny nezorientované vzorky, světlé odstíny 0,75 % vláken, tmavé odstíny 1,5 % vláken .....	48

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Použité množství jednotlivých složek pro betonáž.....	27
Tabulka 2 Výsledky nových vzorků 40 mm x 40 mm x 160 mm .....	43
Tabulka 3 Výsledky nových vzorků 100 mm x 100 mm x 400 mm .....	46
Tabulka 4 Výsledky starých vzorků 40 mm x 40 mm x 160 mm z roku 2017 .....	48

# 1 Úvod a cíl práce

UHPC (Ultra high performance concrete) je materiál vysoké kvality a potenciálu a jeho použití je na vzestupu. S použitím ocelových vláken, jako rozptýlené výztuže, pak tvoří dokonalý kompozit UHPFRC (Ultra high performance fibre reinforced concrete). Vysokopevnostní ocelová vlákna negují hlavní slabiny UHPC, jenž je jeho křehkost a pevnost v tahu za ohybu. Nyní se tento materiál používá především pro betonáže průmyslových podlah, základových desek obytných domů, chodníků, stěnových panelů, prefabrikovaných střešních konstrukcí, mostních konstrukcí, vodohospodářských staveb nebo ve stříkané podobě pro ostění tunelů [1]. Potenciální využití je ale daleko širší.

Pro správný návrh nosných konstrukcí musí být známo, kde se vlákna v prvku nacházejí a jejich orientace. V dnešní době jsou nosné konstrukce z UHPFRC dodatečně vyztužené ocelovými pruty. Dodatečná výztuž je přidána z důvodů, že se vlákna uvažují jako rovnoměrně rozptýlená s náhodnou orientací. S použitím nové technologie MOF (magnetic orientation of fibers), je možná určit polohu vláken a jejich orientaci pomocí magnetického pole. Bylo by tedy možné navrhovat a vyrábět nosné konstrukce pouze z UHPFRC bez přidání dodatečné výztuže.

Tato práce navazuje na předchozí bakalářskou práci, Studie orientace ocelových vláken v cementovém kompozitu pomocí magnetického pole [2], kde byl potvrzen princip magnetické orientace a funkčnost této technologie na malých vzorcích o rozměrech 40 mm x 40 mm x 160 mm. Byly provedeny simulace magnetického pole, které byly následně experimentálně ověřeny. Nejprve byla metoda vyzkoušena na vzorcích ze směsi sonogelu a ocelových vláken. Sonogel byl použit z důvodů transparentnosti a podobných reologických vlastností jaké má beton. Poté byly vyrobeny vzorky z UHPFRC. Orientace vláken byla potvrzena pomocí rentgenových snímků a nepřímou metodou měření součinitele jakosti cívky  $Q$ , do které byly vzorky vkládány.

Obsah této práce je shrnut v následujících bodech:

- řešerše týkající se problematiky magnetické orientace ocelových vláken v cementových kompozitech, včetně vlivu MOF na degradaci tohoto materiálu
- provedení sady měření k určení nejvhodnější frekvence proudu pro napájení cívky
- návrh a sestavení zařízení pro MOF pro orientaci vzorků o průřezu 150 mm x 150 mm
- ověření funkčnosti zařízení
- výroba vzorků o rozměrech 100 mm x 100 mm x 400 mm a 40 mm x 40 mm x 160 mm
- ověření tahové pevnosti za ohybu a porovnání se vzorky, na kterých tato technologie nebyla použita

## 1.1 Motivace

Vysokohodnotný beton v kombinaci s ocelovými vlákny tvoří kompozitní materiál, z něhož lze vytvořit velice pevné a subtilní prvky. Zkrácený název tohoto kompozitního materiálu je UHPFRC (Ultra high performance concrete). Nyní se pro návrh konstrukcí z UHPFRC uvažují vlákna jako rovnoměrně rozptýlená a náhodně orientovaná. Pokud by bylo možné orientaci a pozici vláken určit, byla by možná nejen úspora přidaných vláken ale také navrhovat nosné konstrukce pouze z UHPFRC bez dodatečných ocelových prutů. Pro správný návrh nosných konstrukcí musí být známo, kde se vlákna v prvku nacházejí a jejich orientace, a proto nyní nelze takové konstrukce navrhovat správně. S použitím nové technologie MOF (magnetic orientation of fibers), je možné určit polohu vláken a jejich orientaci pomocí magnetického pole. Je možné vlákna orientovat ve směru hlavních napětí a je možné je umístit do míst kde vznikají tahová napětí, nebo naopak zamezit jejich výskytu v místech vznikajících tlakových napětí, kde by vlákna snižovala tlakovou pevnost cementové matrice [3].

Technologie MOF je novou perspektivní technologií, pomocí níž by bylo možné libovolně a rychle vyztužit prvek. Vyztužení prvku touto technologií nevyžaduje přítomnost vazačů, čímž se snižují kvalifikační požadavky na pracovníky ve výrobě prefabrikovaných konstrukcí. Díky možnosti dosáhnout vyšší tahové pevnosti za ohybu při použití MOF by bylo možné vyrábět prvky vyšších únosností, nebo stejných za použití menšího objemu vláken. Lze tedy dosáhnout úspory materiálu a snížení výrobní ceny.

## 2 Rešeršní část

Z důvodů, že podrobná rešerše byla provedena v bakalářské práci, na níž tato práce navazuje, je v této části shrnuta pouze nejdůležitější část týkající se orientace vláken v cementových kompozitech, tato část je obohacena o nové poznatky související s magnetickou orientací vláken. Rešerše je pak na závěr doplněna o novou rešeršní část zabývající se předpokládaným vlivem technologie MOF na degradaci materiálu vyrobeným touto technologií.

### 2.1 Orientace ocelových vláken v cementových kompozitech

Orientaci vláken v cementových kompozitech lze ovlivnit mechanicky, nebo magneticky. Mechanicky, například způsobem lití betonu do formy. Magneticky, kdy feromagnetická vlákna mají tendenci se orientovat ve směru siločar magnetického pole, pokud je pole dostatečně silné, aby překonalo odpor cementové matrice, dochází k cílené orientaci vláken. V obou případech orientace vláken záleží na reologických vlastnostech cementové matrice. Tato práce se zaměřuje na orientaci vláken pomocí magnetického pole, proto jsou uvažována pouze vlákna feromagnetická, tedy ocelová.

Výsledná orientace vláken významně ovlivňuje finální vlastnosti prvku, a to zejména tahovou pevnost za ohybu. Nejúčinněji lze vlákna využít, pokud jsou orientována ve směru hlavních tahových napětí. Při vychýlení do 30° od tohoto směru účinnost mírně klesá. Při vychýlení o úhel větší než 30° od směru hlavních napětí účinnost vláken výrazně klesá [4].

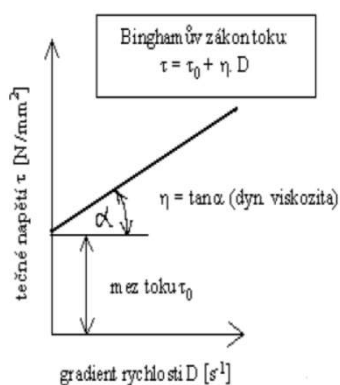
### 2.1.1 Vliv reologických vlastností na orientaci vláken v cementových kompozitech

Jak již bylo zmíněno výše, reologie cementové matrice zásadně ovlivňuje jak mechanickou, tak magnetickou orientaci ocelových vláken. Reologie zkoumá vztahy mezi chemickým složením a mechanickými vlastnostmi látky [5]. Zabývá se také deformací, tokem hmoty a vztahy mezi deformací, napětím a rychlosti deformace v závislosti na čase [6]. Beton a cementové pasty se uvažují v čerstvém stavu jako nenewtonovské kapaliny, tedy jejich deformace není přímo úměrná napětí, ale v čase se mění. Konkrétně je řazen beton a cementové pasty mezi Binghamovské kapaliny. Jejich viskozita s působící silou klesá. Mezi newtonovské kapaliny se řadí například voda a jsou typické tím, že jejich deformace je přímo úměrná velikosti napětí.

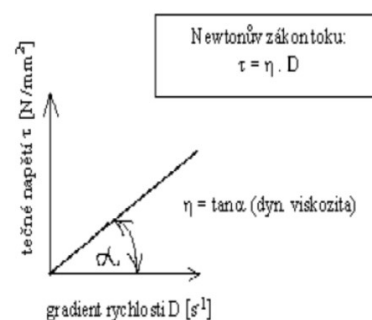
Binghamův materiálový model je definován následovně[7]: [5]

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$$

- Příčemž:
- $\tau$  smykové napětí [Pa]
  - $\tau_0$  mez kluzu [Pa]
  - $\eta$  plastická viskozita [Pa·s]
  - $\dot{\gamma}$  smyková rychlost deformace [ $s^{-1}$ ]



Obr. 2 Křivka tekutosti binghamovské kapaliny [5]



Obr. 1 Křivka tekutosti newtonovské kapaliny [5]

Smykové napětí  $\tau$  čerstvého betonu se pohybuje od 50 do 200 Pa [8]. Mez kluzu neboli také mez toku je způsobená rozdílným chemickým složením zrn cementu a jemných podílů, za přítomnosti vody pak dochází k tvorbě opačných nábojů na povrchu zrn a prvních hydratačních produktů. Opačné náboje mají pak za následek shlukování směsi, tvorbu sítě aglomerátů, ve kterých je uzavřena záměsová voda. Vnesením napětí, například vibrací pak dochází k rozrušení aglomerátů a uvolnění záměsové vody díky níž se mohou zrna lépe pohybovat v čerstvé směsi [5].

Pokud je flokulace a deflokulace plně vratná, alespoň v krátkém časovém úseku, nazývá se tato vlastnost tixotropie [6].

Sepeher [9] a Boulekbache a kol. [3], se domnívají, že viskozita nemá žádný vliv na orientaci vláken v cementové matrici, ale výrazně ovlivňuje distribuci vláken v prvku. Naopak mez kluzu má významnou roli při orientaci vláken. U cementových matric s nižší mezí kluzu se vlákna ochotněji orientují [9], [3].

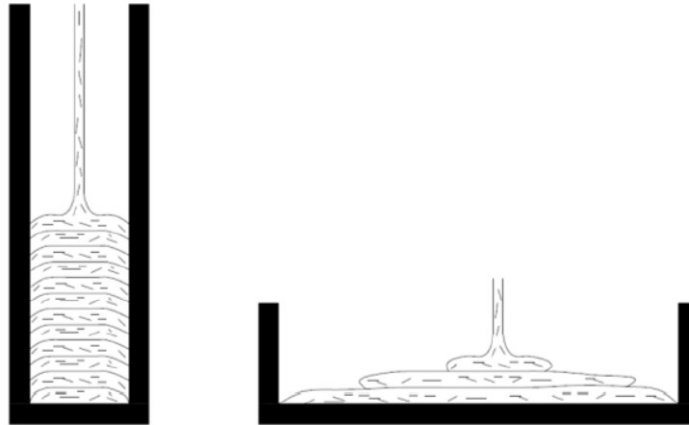
Reologické vlastnosti závisí na chemickém složení, velikosti a tvaru zrn, specifickém povrchu zrn, distribuci jednotlivých částic. Důležitou roli hraje také záměsová voda, velikost, geometrie a rozmístění agregátů [6], [10].

### **2.1.2 Mechanická orientace ocelových vláken v cementových kompozitech**

Mechanická orientace je dosažena různými způsoby lití (ukládání) směsi do forem. Vlákna mají tendenci se orientovat vždy kolmo na směr lití. Tohoto principu využil Tvarog [4] ve své práci, kde použil stejnou velikost formy, ale různé způsoby plnění (Obr. 3). Preferovanou orientaci poté nepřímo ověřil pomocí zkoušky ohybem.

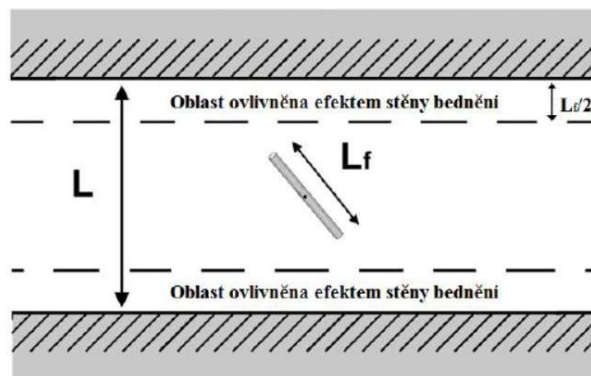
Mechanická orientace je závislá na mnoha parametrech. Například tekutost a zpracovatelnost směsi, tvar formy, délka a geometrie vláken, vzájemná interakce vláken mezi sebou a v neposlední řadě způsob ukládání směsi [3]. Povrch bednění také ovlivňuje výslednou mechanickou orientaci vláken, u bednění s hladším povrchem se vlákna orientují ochotněji [11].





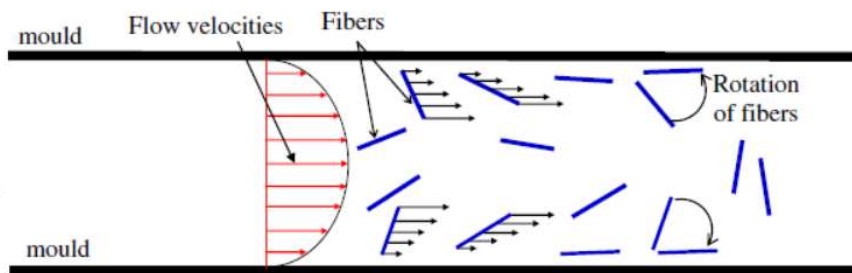
Obr. 3 Preferovaná orientace vláken pro cementové kompozity [4]

Geometrie vláken výrazně ovlivňuje orientaci. Vlákná složitějších tvarů mají tendenci se více shlukovat, což vede k horší mechanické i magnetické orientaci. Navíc se uplatňuje takzvaný efekt stěn bednění, to znamená, že ve vzdálenosti menší než polovina délky vlákna, je nemožné aby se vlákno nacházelo kolmo ke stěně bednění [12](Obr. 4).



Obr. 4 Efekt stěn bednění [4]

Mechanická orientace vláken probíhá vždy ve směru proudění. To je zapříčiněno rozdílnou rychlostí proudu po průřezu, viz (Obr. 4). Jak je patrné z rychlostního profilu proudu, je u stěn rychlost proudění výrazně menší, než rychlost ve středu. Rozdílně působící síla na vlákno pak vyvolává moment, jenž vlákno orientuje ve směru proudu. Orientaci vláken lze předvídat z proudových linií, podle kterých se orientují [12].



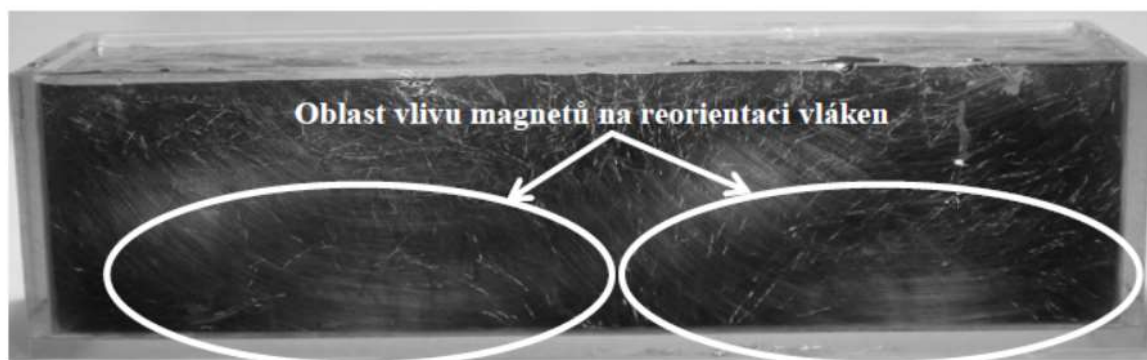
Obr. 5 Rychlostní proudový profil [3]

Potřebná doba pro orientaci většiny vláken je kratší než doba potřebná pro uložení směsi u většiny prvků [12]. Bohužel tento způsob orientace ovlivňuje také distribuci vláken, což většinou nežádoucí. Ferrara a kol. naměřili pomocí nedestruktivní magnetické metody největší koncentraci vláken v místě ukládání [13].

### 2.1.3 Magnetická orientace vláken v cementových kompozitech

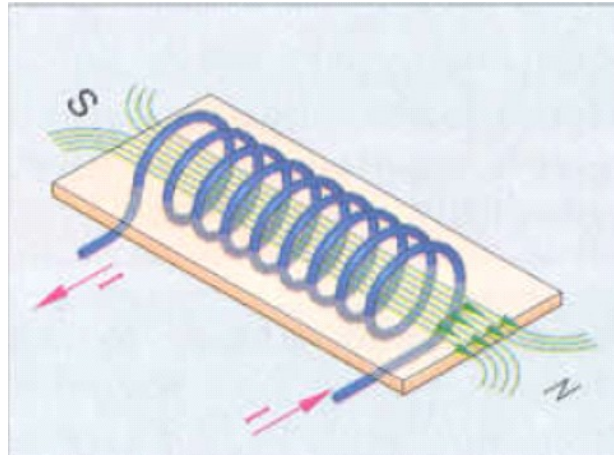
Princip magnetické orientace je jednoduchý, pokud umístíme feromagnetický materiál do elektromagnetického pole, materiál se zmagnetizuje (stane se z něho malý magnet), pokud má materiál tyčový charakter bude se orientovat tak, aby jeho delší strana byla rovnoběžně se siločárami.

*„Tohoto jevu si také povšimnul Tvarog [4] při pokusech se sonogelem a ocelovými vlákny. Směs sonogelu a ocelových vláken byla uložena do formy a vibrována na vibračním stole, při zapnutí pomocných elektromagnetů se vlákna zorientovala podle siločar elektromagnetického pole“.[2]*



Obr. 6 Magnetická orientace vláken v sonogelové matrici [4]

V našem případě jsou feromagnetickým materiálem ocelová vlákna, která se orientují ve směru siločar elektromagnetického pole. Tvar elektromagnetického pole generovaného cívkou je patrný z Obr. 7[14].



Obr. 7 Magnetické pole, siločáry cívky [14]

Pro úspěšnou orientaci vlákna v cementové matrici musí být elektromagnetické pole dostatečně silné, aby překonalo odpor cementové matrice, a to zejména mez kluzu  $\tau_0$ . Veličina charakterizující silové účinky magnetického pole je charakterizována veličinou **magnetická indukce  $B$**  a jednotkou je Tesla [**T**]. Magnetickou indukci můžeme změřit například pomocí Hallovy sondy. Protože je zde uvažováno, že elektrické pole nemá žádný vliv na MOF budeme dále zmiňovat pouze magnetické pole.

Tato práce navazuje na předchozí bakalářskou práci [2], jež čerpala z několika patentů. Jedním z nich je americký patent, zabývající se metodami vyztužení betonu vlákny, z roku 1977. Patent[15] popisuje metodu jak vlákna orientovat pomocí elektromagnetů, ale také jak ovlivnit distribuci ocelových vláken a koncentraci vláken v požadovaných místech. Popis patentu je následující. „Vlákna byla vmíchána do směsi před uložením do formy, nebo byla rozmístěna na povrchu a pomocí elektromagnetů vtažena dovnitř již uložené směsi (Obr. 8). Uložené vzorky s tloušťkou do 40 mm pak byly protaženy šestkrát tam a zpět cívkou o 1000 závitů, čímž došlo k preferované orientaci vláken. Různou koncentraci vláken v prvku lze dosáhnout regulací rychlosti procházení cívkou. Na krajích prvku, kde je prvek nejvíce namáhán, může být zajištěna větší koncentrace vláken a tím lépe a efektivněji využít způsob vyztužení ocelovými vlákny. Pokud je cívka napájena střídavým proudem, dochází zároveň k magnetickému vibrování směsi, což může být více než žádoucí.

Jiný americký patent US 2006/0244168 A1 [16] popisuje zařízení pro cílenou orientaci feromagnetických vláken v materiálech na bázi past. Zařízení ve tvaru křídla se sestává ze stacionární části a části pohyblivé. Pohyblivá část je tvořena soustavou magnetů tak, aby tvar magnetického pole co nejlépe a nejúčinněji plnil účel zařízení. V přední části zařízení dochází k přitahování vláken. Vlákna jsou pak zorientována. Zadní část přístroje je konstruována tak aby po průchodu, místem působení, byla vlákna ponechána v zorientované poloze (Obr. 9)“ [2].

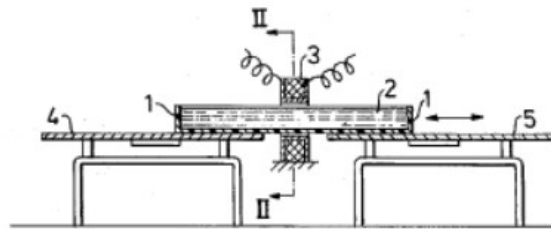


FIG. 1

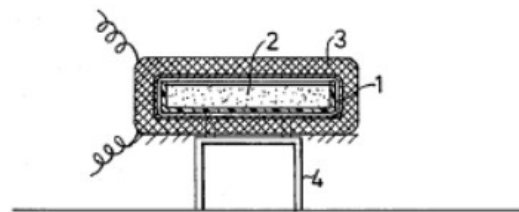


FIG. 2

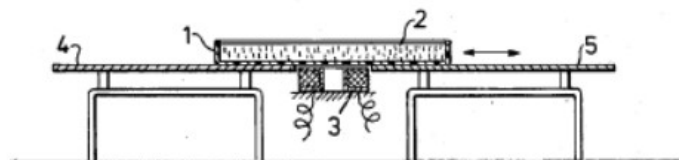
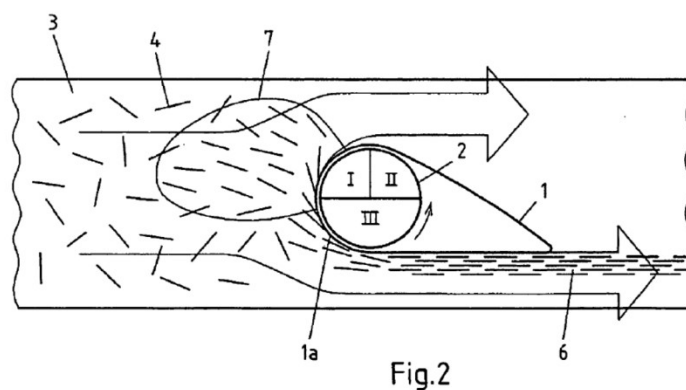


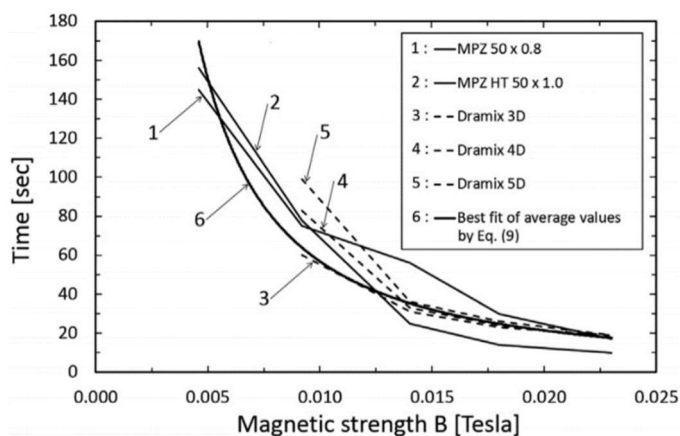
FIG. 3

Obr. 8 U.S. Patent 4,062,913, 1-forma z neferomagnetického materiálu, 2-cementová matrice s ocelovými vlákny, 3-elektromagnet, cívka, 4,5 – mechanické vibrátory [15]



Obr. 9 Přístroj pro orientaci vláken dle patentu US 2006/0244168 A1 [16]

V roce 2017 publikovali nizozemští autoři článek [17] (Magnetic orientation of steel fibres in self-compacting concrete beams: Effect on failure behavior) v němž provedli podobné experimenty, jaké byly provedeny v této práci a v bakalářské práci, na kterou tato práce navazuje. Autoři čerpali také ze dvou výše uvedených patentů. Nejdříve ověřili princip magnetické orientace v silikonovém oleji a experimentálně stanovili minimální magnetickou indukci pro orientaci 6 mm ocelových vláken v SCC (self compacting concrete). Z výsledků prvního experimentu s cementovou matricí byla hodnota minimální magnetické indukce stanovena na 0,25 T, ale dle grafu níže zřejmě autoři mysleli 0,025 T. Dále provedli sadu měření zjišťující závislost magnetické indukce na čase potřebném pro orientaci vlákna (Obr. 10), pro tyto experiment použili silikonový olej s podobnými reologickými vlastnostmi jako cementová matrice. Podle naměřených hodnot čas rapidně klesá s rostoucí intenzitou magnetického pole podle očekávání.



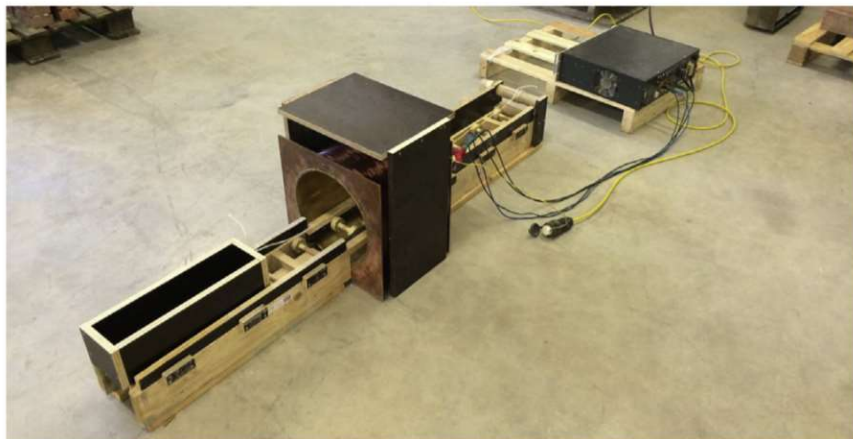
Obr. 10 Závislost potřebného času k orientaci vláken na magnetické indukci [17]

Autoři tvrdí, že orientaci vláken je dobré provádět určitou rychlostí, jež zamezí nežádoucím účinkům, jako je shlukování a přesun agregátů. Pro další fázi experimentů autoři sestrojili zařízení pro orientaci vláken ve vzorcích o velikosti 100 mm x 100 mm x 400 mm (Obr. 11).

Experimentální sestava byla tvořena cívkou z drátu o průměru 2,36 mm, cívka měla 16 vrstev, 121 závitů, délku 300 mm a vnitřní průměr 310 mm. Cívka byla napájena proudem o velikosti 3,5 A, napětím 26 V a generovala magnetickou indukci 0,02 T ve svém středu.

Autoři uvedeného příspěvku patrně neuvádějí parametry cívky správně, protože magnetické pole cívky uvedených parametrů protékané proudem 3,5 A bude o několik řádů slabší, což dokládají výpočty i praktická měření v této práci.

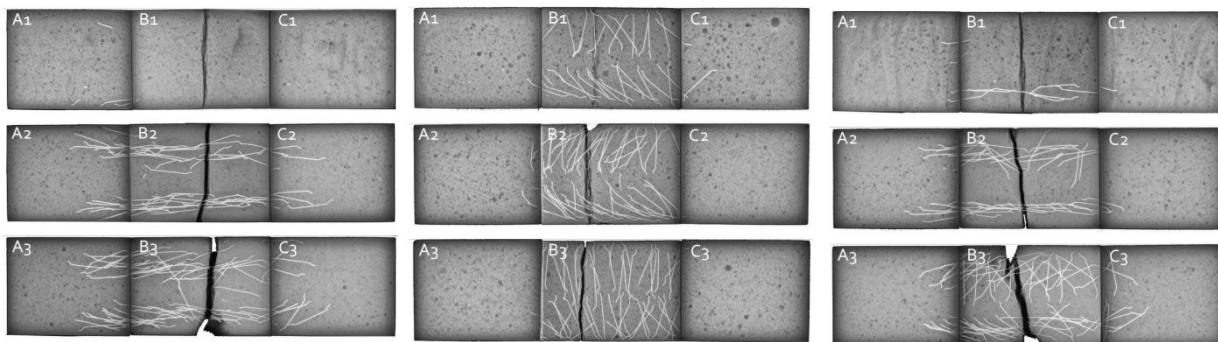
Autoři [17] prováděli výrobu vzorků následujícím způsobem. Vlákna do vzorků byla vkládána ručně v 10 vrstvách pouze ve střední části vzorku. Vzorky byly následně pomocí ručního navijáku protaženy cívkou rychlostí cca 5 mm/s. Vzorky byly vystaveny účinkům magnetického pole po dobu 80 sekund. Následně nechali vzorky 28 dní zrát při 100% relativní vlhkosti. Po 28 dnech byla provedena tříbodová zkouška ohybem. Každý rozlomený vzorek byl rozřezán svisle a vodorovně na 9 kusů a následně všechny kusy zrentgenovány pro přesnou detekci ocelových vláken. Výsledky experimentu byly neprůkazné, a to hlavně z důvodů že autoři vytvořili pouze 3 vzorky, z rentgenových snímků bylo patrné, že jeden vzorek nebyl ovlivněn skoro vůbec účinky magnetického pole a k požadované orientaci došlo také pouze u jednoho (Obr. 13).



Obr. 11 Zařízení pro magnetickou orientaci vláken [17]

A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>
A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>
A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>

Obr. 12 Rozřezaný vzorek, označení jednotlivých segmentů



Obr. 13 Rentgenové snímky zorientovaných vzorků [17]

## 2.2 Účinky technologie MOF na degradaci materiálu

Tato řešeršní část práce se zabývá degradací materiálu vyrobeným novou technologií MOF, tedy UHPFRC s orientovanými vlákny pomocí magnetického pole. Jedná se o řešerši pozitivních i negativních vlivů na téma degradace tohoto materiálu a to zejména účinků magnetické pole na životnost materiálu. Ocelová vlákna vykazují zbytkovou remanenci, což znamená, že i po ukončení působení magnetického pole si ocelová vlákna uchovávají zbytkové magnetické pole, chovají se tedy jako malé magnety, což může ovlivnit průběh případné koroze vláken. Dále podle některých autorů [18]–[22], lze magnetickým polem ovlivnit záměsovou vodu a tím také změnit finální vlastnosti betonu. V následujících podkapitolách jsou zohledněny všechny pozitivní a negativní vlivy na degradaci materiálu vyrobeným technologií MOF. Poslední kapitola obsahuje shrnutí a autorův předpoklad vlivu MOF na degradaci.

### 2.2.1 Degradace UHPFRC

UHPC se od běžného betonu liší, vysokými dávkami cementu, použitím jemnozrnného kameniva, mikroplniva, vysokými dávkami přísad (zejména superplastifikátorů) a nízkým vodním součinitelem. UHPC se zejména vyznačuje vysokou pevností, 150 MPa a více.

Nicméně největší slabinou tohoto materiálu je jeho křehkost, které lze však zabránit přidáním vláken, a tím vytvořit velice pevný a odolný kompozit.

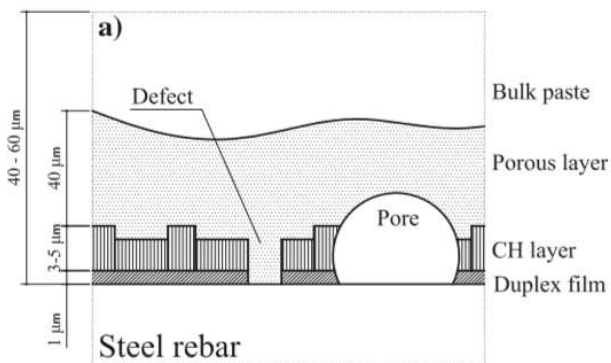
Zásadní dopad na životnost a degradaci betonu má pórová struktura. Díky pórové struktuře se škodlivé plyny a kapaliny mohou dostávat do struktury betonu. Avšak díky nízkému vodnímu součiniteli a použití mikrosiliky, se UHPC vyznačuje značně menší pórovitostí než běžný beton a to v řádu několik desítek. Dle [23] je hodnota permeability UHPC okolo  $10^{-19}$  v porovnání s betonem normálních pevností s hodnotou okolo  $10^{-15}$ .

Dále autoři článku [23] provedli sadu laboratorních testů s UHPC a UHPFRC. Testy prokázali vysokou životnost a daleko lepší odolnost vůči všem testovaným typům degradace v porovnání s normálním betonem. Autoři testovali celkem tři směsi, které se lišily v objemovém zastoupení mikrosiliky, cementu, přísad a příměsí. Vzorky byly testovány na odolnost proti chloridům, karbonatoci, sulfátům a zmrazovacím cyklům.

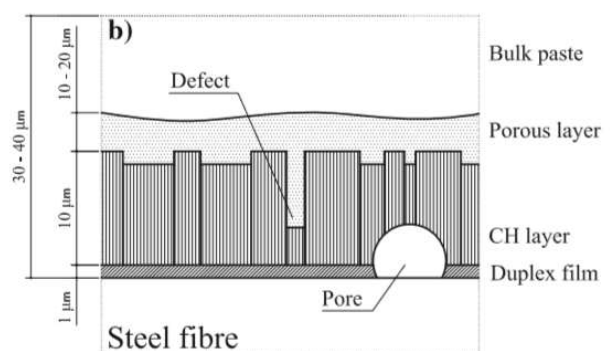
Ke korozi vláken dochází až po narušení pasivační vrstvy kolem vláken. Příčina narušení pasivační vrstvy je většinou způsobena vlivem chloridů, nebo karbonatace. Vlákná zabraňují vzniku mikrotrhlin a tímto i zvyšují odolnost proti pronikání chloridů do struktury betonu [24], [25]. Dle Berrocal [24] lze vlákna v kombinaci s konvenční výztuží použít také jako obětovanou anodu a tím ochránit hlavní výztuž před korozi. UHPC se vyznačuje vysokou odolností vůči karbonatoci a chloridům, dle Piérard [23] hodnoty koeficientů karbonatace pro UHPC je  $K_c = 0,1 \text{ mm} \cdot \text{den}^{-1/2}$  a pro běžný beton  $K_c = 1,5 \text{ mm} \cdot \text{den}^{-1/2}$ .

Dále je rozptýlená výztuž z ocelových vláken méně náchylná ke korozi než běžná ocelová výztuž, a to z důvodů [25] :

- a) vlákna jsou malá a nespojitá – pomalejší rychlost šíření koroze
- b) vlákna tažená za studena mají více uniformní povrch – jsou tedy méně náchylná ke korozi
- c) hustá a jednotná mezifázová vrstva - vlákno x matrice, viz (Obr. 14, Obr. 15) [25].



Obr. 14 mezifázová vrstva\_ konvenční výztuž



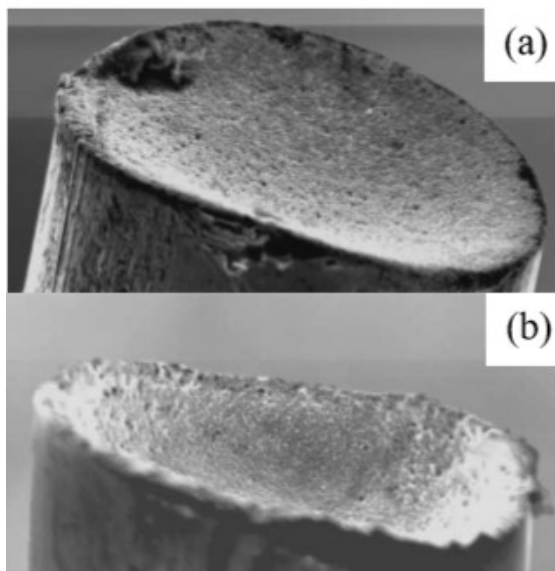
Obr. 15 mezifázová vrstva\_ ocelová vlákna



## 2.2.2 Vliv magnetického pole na korozi vláken

Vliv magnetické pole na průběh koroze je potvrzen mnoha autory [26]–[29]. Magnetické pole ovlivňuje kinetiku elektrod, hromadný transport, tvorbu mezifázové oxid/hydroxid vrstvy a potenciální rozdíl v kovovém roztoku na rozhraní.

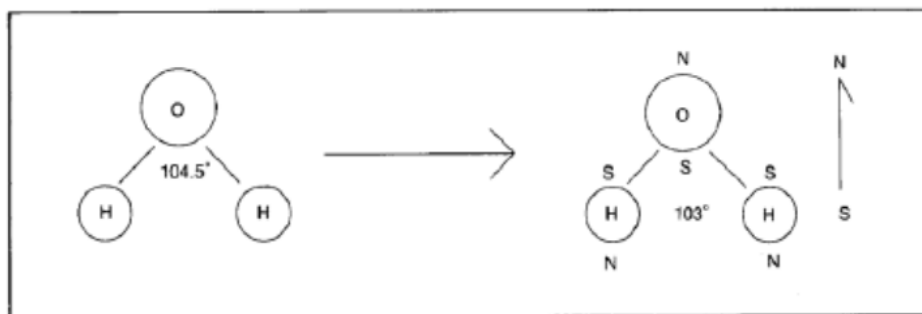
Důvodem vlivu magnetické pole na průběh koroze jsou dvě síly. Síla gradientu magnetického pole, která má zanedbatelný vliv, a síla Lorentzova která má značný vliv na urychlení či zpomalení koroze. Lorentzova síla je síla, která působí na náboj pohybující se v magnetickém poli (a podobně také na vodič protékající elektrickým proudem vložený do magnetického pole), směr jejího působení je kolmo na magnetické siločáry a na směr pohybu elektricky nabitých částic (směr proudu). Tato síla tedy bude vždy působit kolmo k siločáram magnetického pole. Pokud je magnetické pole aplikováno paralelně k povrchu, Lorentzova síla směřuje kolmo od povrchu a tím tedy i urychluje transport elektronů. Pokud je magnetické pole aplikováno kolmo k povrchu, Lorentzova síla působí paralelně s povrchem, čímž dochází k zadržení paramagnetických iontů u povrchu a zvýšení pasivačního potenciálu se posouvá k ušlechtlejší hodnotě, tím pádem se průběh koroze zpomaluje. Tento efekt zpomalení, ale nefunguje pro všechny typy ocelí. Některé korozivzdorné ocele nemusí ovlivnit tento efekt vůbec, nebo dokonce může i korozi urychlit [26]. Rapidní zrychlení koroze při působení silného magnetického pole bylo potvrzeno mnoha autory [26], [27], [29]. Alison [27] na základě svého experimentu, tvrdí, že i když magnetické pole urychluje korozi železa v NaCl, tak i zabraňuje pittingové korozi (Obr. 16)[27].



Obr. 16 a) koroze Fe bez magnetického pole, b) koroze Fe s působením magnetického pole 0,35 T

### 2.2.3 Magneticky upravená voda

Magneticky upravená voda neboli zkráceně MUV, je velmi kontroverzní téma. Princip MUV je založen na tom, že molekula vody je dipólová, tedy má svůj severní a jižní pól a tudíž se chová jako malý magnet i když se nejedná o feromagnetický materiál. Severní a jižní pól je u molekuly vody způsoben vychylením drah elektronů vodíků a kyslíku. Pokud tedy molekulu umístíme do magnetického pole, bude mít tendenci se orientovat ve směru siločár tohoto pole. Dle některých autorů dojde i k poklesu úhlu mezi molekulami vodíku, čímž se změní i tvar celé molekuly [20].



Obr. 17 Pokles úhlu mezi atomy vodík v molekule vody při vystavení magnetickému poli [22]

*„Magnetickou orientací molekul vody dochází k roztrhání, nebo alespoň k zmenšení počtu shluků molekul vody [21]. MUV má menší povrchové napětí [30], Sadam M. Ahmed[20] tvrdí, že MUV se liší i pH, menší viskozitou, elektrickou vodivostí a permeabilitou tlaku od neupravené vody“[2].*

Zařízení je principiálně jednoduché, jedná se o soustavu magnetů či elektromagnetů osazených na vodovodní potrubí. Magnetické pole je buď střídavé, nebo stejnosměrné. Zařízení bylo účelně sestrojeno pro pozdržení vytváření vápenatých usazenin a rozrušení stávající inkrustace [31].

První poznatky MUV v souvislosti s betonem publikovali autoři Wulachoufuski a Alnanina [8], posléze se touto problematikou začalo zabývat více autorů. Pro přípravu MUV většina autorů použila speciální zařízení pro magnetickou úpravu vody [19]–[21], [30], Reddy [22] dosáhl MUV pomocí skleněné nádoby obklopenou magnety. Intenzita magnetického pole se většinou pohybovala okolo 0,1 T.

*„Hlavní výhodou MUV je, že díky svým vlastnostem je schopna daleko lépe prostoupit mezi zrna cementu, lépe ho obalit, aby cement mohl lépe zhydratovat, což vede především ke zvýšení pevnosti betonu v tlaku, ale i ke změně reologických vlastností čerstvého betonu, lepší zpracovatelnosti a vyšší hodnotě sednutí kužele [20], [21], [30]“ [2].*

Dle mikroskopických snímků, pořízených autory Su a Wu[19], lze ovlivnit tuhnutí betonu při použití MUV. Ze snímků je dobře patrný rozdíl. Při použití obyčejné vody probíhá hydratace ve tvarech shluků, výsledný produkt má tvar hexagonálních plátů.

Při použití MUV dochází ke vzniku většího množství menších krystalických zrn. Tento rozdíl v tuhnutí betonu může mít za následek rozdílnou pevnost betonu v tlaku.

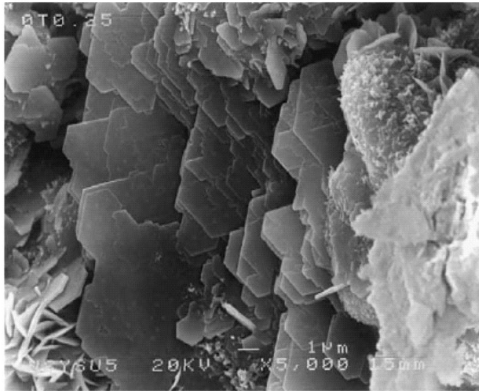


Fig. 8. SEM micrograph of calcium hydroxide crystals in pastes prepared with tap water (5000×).

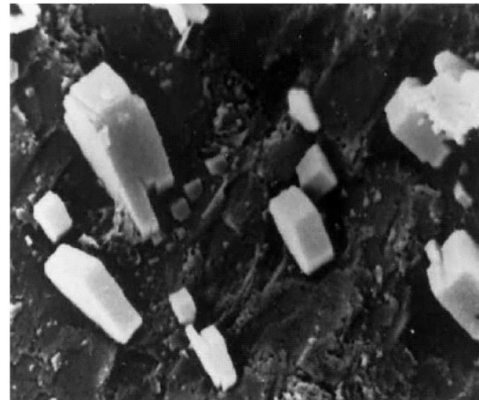


Fig. 9. SEM micrograph of calcium hydroxide crystals in pastes prepared with MFTW (5000×).

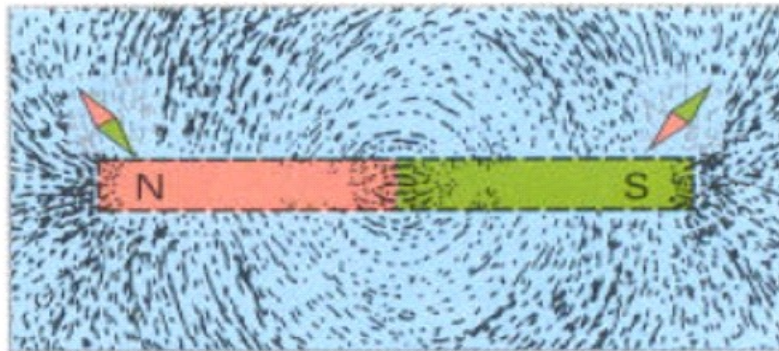
#### Obr. 18 Mikroskopické snímky hydratace cementu [21]

Ve výsledcích o kolik se zvýší pevnost v tlaku betonu, se autoři článků dost liší. Su, Wu[19] publikují zvýšení pevnosti v tlaku o 15 až 20 %, Ahmed [20] o 10 až 20 %, Gholizadeh a Arabshahi[30] až o 23 % a Afshin a kol.[21] zmiňuje, že pokud je obsah cementu menší než  $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  betonu, nemá MUV žádný vliv na pevnost betonu a pokud je vyšší, zvyšuje se i pevnost betonu cca o 18 %. Změna tuhnutí betonu při použití MUV jako záměsové vody, také pozitivně ovlivní pórovou strukturu betonu. Díky většímu počtu hydratovaných zrn bude objem póru nižší. Nižší pórovitost bude zajišťovat větší odolnost vůči agresivnímu prostředí.

Téma MUV je stále předmětem sporů a diskuzí. Celkově se touto problematikou mnoho autorů nezabývá a některé články týkající se MUV pocházejí z nedůvěryhodných zdrojů. Je tedy třeba vědecky zhodnotit veškeré faktory a nejlépe vlastním měřením experimentálně potvrdit či vyvrátit vliv MUV v souvislosti s betonem.

#### 2.2.4 Závěr a celkové zhodnocení předpokládané degradace UHPFRC vyrobeného metodou MOF

Dle autorů [26]–[29] se paralelně se s růstem intenzity magnetického pole zvyšuje rychlost koroze. V našem případě používáme vlákna z vysoko-pevnostní oceli **Weidacon FM** tažená za studena s mosaznou úpravou na povrchu. Délka vláken  $L_f = 13$  mm, průměr vláken  $d = 0,15$  mm. Tato vlákna se vyznačují zbytkovou remanencí 1,16 mT, což znamená, že po MOF si ponechávají zbytkové magnetické pole. Vlákna mají jednoduchý tvar, a proto si jejich magnetické pole lze představit jako pole malého magnetu (viz Obr. 19). [14]



Obr. 19 Průběh magnetických indukčních čar u tyčového magnetu [14]

Toto pole bude na vlákno jak kolmé, tak i v některých místech paralelní. Tedy působení tohoto pole může v některých místech urychlovat korozi a v jiných zase zpomalovat rychlost koroze. Také se může stát, že i v místech kde je pole kolmé k povrchu, bude koroze urychlena, protože vlákna jsou pokryta mosazí a u některých korozivzdorných ocelí dochází k zrychlení koroze, i pokud je magnetické pole orientováno kolmo k povrchu. Avšak zbytkové magnetické pole je tak malé že by nemělo nějak výrazně ovlivnit korozi vláken.

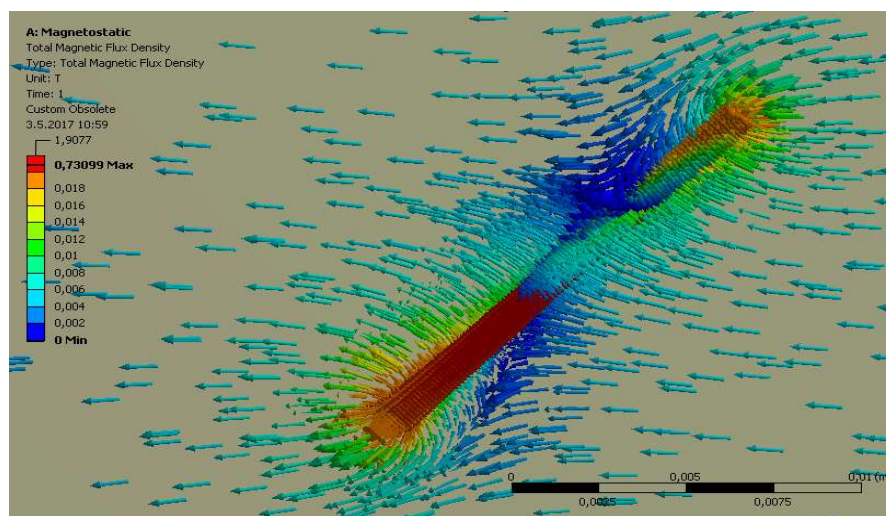
Na druhou stranu, aby ke korozi vůbec došlo, musí dojít k narušení pasivační vrstvy kolem vláken. K tomu dochází vlivem průniku škodlivých kapalin a plynů porézním systémem do struktury betonu. Obecně má UHPC (díky malé pórovitosti) dobrou odolnost vůči průniku škodlivých látek do struktury betonu [23]. Toto může být jen umocněno vlivem MUV na tuhnutí betonu, jenž by měl snížit pórovitost a tím zvýšit odolnost vůči agresivnímu prostředí.

Dle názoru autorky této práce, který se opírá o poznatky odborných publikací shrnutých výše v rešerši, technologie MOF zásadním způsobem negativně neovlivní odolnost UHPFRC a vláken především vůči agresivnímu prostředí. Lze se dokonce domnívat, že vliv magnetického pole může při tuhnutí betonu pozitivně ovlivnit jeho strukturu, čímž dojde ke zvýšení odolnosti vůči agresivnímu prostředí.

### 3 Souhrn experimentů a výsledků z předchozího výzkumu

Tato kapitola obsahuje souhrn experimentů a výsledků předcházející bakalářské práce [2] na niž tato práce navazuje. V předchozí práci byly ověřeny principy MOF a experimentálně stanoveny mezní hodnoty pro funkčnost zařízení MOF. Experimenty a výsledky předchozího výzkumu jsou shrnuty v následujících bodech:

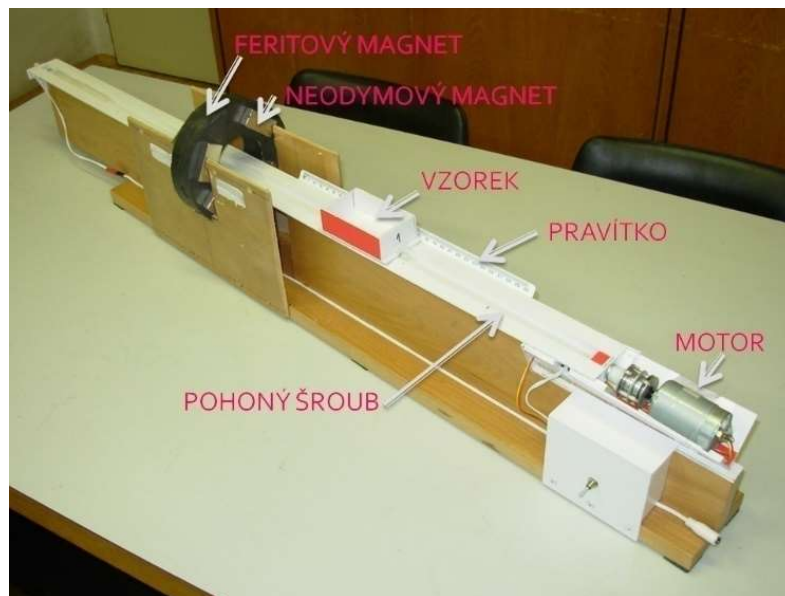
- Byla naměřena zbytková remanence ocelových vláken Weidcon FM v hodnotě 1,16 mT. Zbytková remanence vyjadřuje, do jaké míry zůstává materiál zmagnetizován po ukončení působení magnetického pole. Hodnota 1,16 mT nijak neovlivní užívání konstrukce vyrobených pomocí MOF.



Obr. 20 Silové působení magnetické pole na jedno ocelové vlákno

- Pomocí programu ANSYS byl nasimulován vliv magnetického pole na vlákno (Obr. 20). Dále byly v programu ANSYS provedeny simulace magnetického pole pro různá prostorová uspořádání permanentních magnetů. Vybraná uspořádání byla následně experimentálně ověřena. Bylo zjištěno, že nejvhodnějším uspořádáním je feritový prstenec s přidanými neodymovými magnety. Tato soustava magnetů generuje poměrně homogenní magnetické pole požadované intenzity. Podobné magnetické pole generuje cívka vhodného tvaru protékaná proudem. Toto uspořádání bylo posléze experimentálně ověřeno také. Dále simulace ukázaly, že se zvyšujícím počtem vláken dochází k zesílení magnetické indukce, což může být žádoucí. Na druhou stranu dle experimentů se zvyšující hustotou vláken si vlákna více překáží a magnetická orientace probíhá méně ochotně.

- Pro magnetickou orientaci vláken bylo sestaveno zařízení MOF s pracovním názvem „Drátkodráha“ (Obr. 21), dále bude použit název zařízení č. 1. MOF pomocí tohoto zařízení probíhala následujícím způsobem. Vzorky byly pomocí pohonného šroubu dopravovány středem prstencové soustavy magnetů, které vytvářely potřebné magnetické pole, ve kterém docházelo k prostorové orientaci vláken.



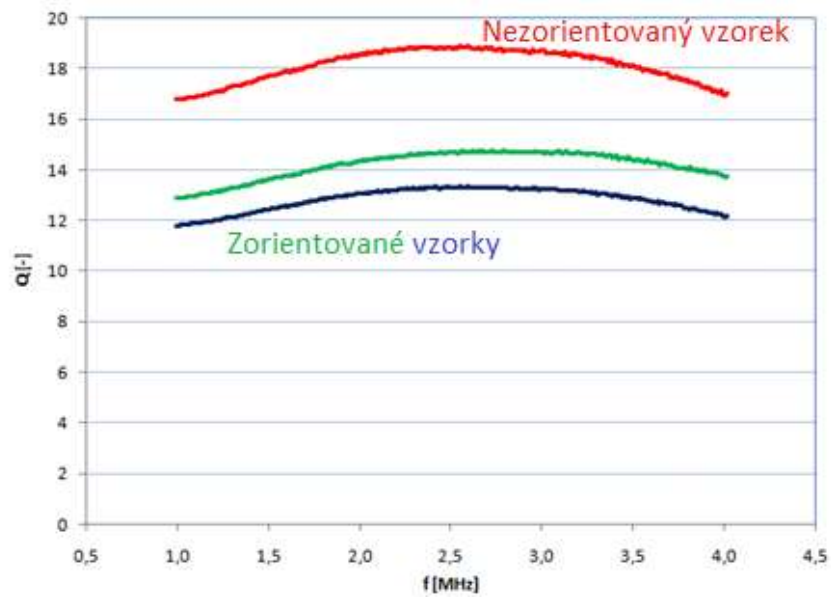
Obr. 21 MOF zařízení č.1

- V první experimentální fázi byla cementová matrice zaměněna za sonogel, vzorky se tedy skládaly z výše uvedených vláken a sonogelu. Sonogel byl použit z důvodů jeho transparentnosti a podobných reologických vlastností s cementovou matricí. Neuspořádaná ocelová vlákna ve vzorcích s náhodnou orientací byla magneticky orientována pomocí zařízení č. 1. Vzorky byly posléze vyhodnocovány stupnicí 1-5 dle míry orientace vláken, 1 pro vzorky s vlákny nejlépe orientovanými v požadovaném směru, a 5 pro vzorky, které vůbec či minimálně změnilo svoji pozici a směr poté, co byly vystaveny účinkům magnetického pole. Sadou experimentů byla potvrzena závislost magnetické orientace na intenzitě magnetického pole, viskozitě prostředí a rychlosti průniku vzorku magnetickým polem, respektive na době působení magnetického pole na vzorek. Výsledek experimentů ukázal, že minimální potřebná intenzita magnetického pole je 55 mT pro vzorky hodnocené známkou 1 v prostředí o viskozitě 452,4 Pa·s. Optimální rychlost byla stanovena na 2 cm/s.

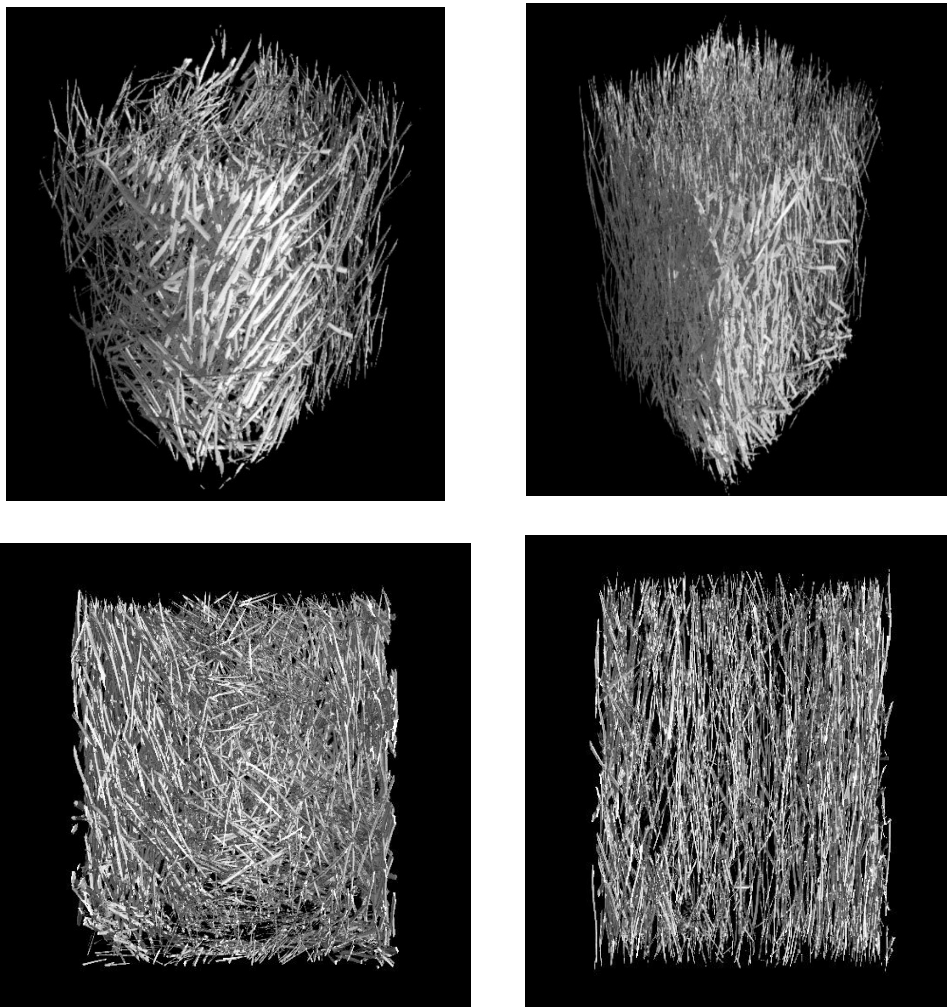


Obr. 22 Vzorek sonogelu s ocelovými vlákny

- V druhé experimentální fázi byly vyrobeny vzorky z UHPFRC. Rozměry vzorků byly 40 mm x 40 mm x 160 mm. Pro výrobu vzorku byla použita suchá prefabrikovaná směs UHPFRC, navržená a používaná Experimentálním centrem ČVUT v Praze [32]. Pro MOF bylo použito stejné zařízení „drátkodráha“ uvedené výše. Objemové zastoupení použitých vláken bylo 1,5 % a 0,75 %. Zorientované vzorky byly porovnány se vzorky, na nichž technologie MOF nebyla použita. Pro zjištění reálné orientace vláken ve vzorcích z UHPFRC byly použity dvě nedestruktivní metody, metoda měření činitele jakosti  $Q$  a CT-skeny. Metod měření činitele jakosti  $Q$  byla provedena pomocí měřicí cívky a měřiče impedance Agilent E4991A. Vzorky byly vkládány do měřicí cívky a na cívce byl posléze měřen činitel jakosti  $Q$  **pro frekvence do 4 MHz**. Pokud byla vlákna ve vzorcích orientována požadovaným směrem, byl činitel jakosti menší než u vzorků s nezorientovanými vlákny, které nebyly vystaveny magnetickému poli (Obr. 23). Dále byly na vzorcích provedeny CT-skeny (Obr. 24), které potvrdily zorientování vláken ve vzorcích v souladu s měřením pomocí činitele jakosti  $Q$ . Z CT-skenů bylo dobře viditelné, na kterých vzorcích byla použita technologie MOF a na kterých ne.



Obr. 23 Průběh činitelejakosti Q pro nezorientované (červeně) a zorientované (zeleně a modře) vzorky s objemem vláken 1,5 %



Obr. 24 CT\_Skeny pro zorientovane a nezorientované vzorky UHPFRC

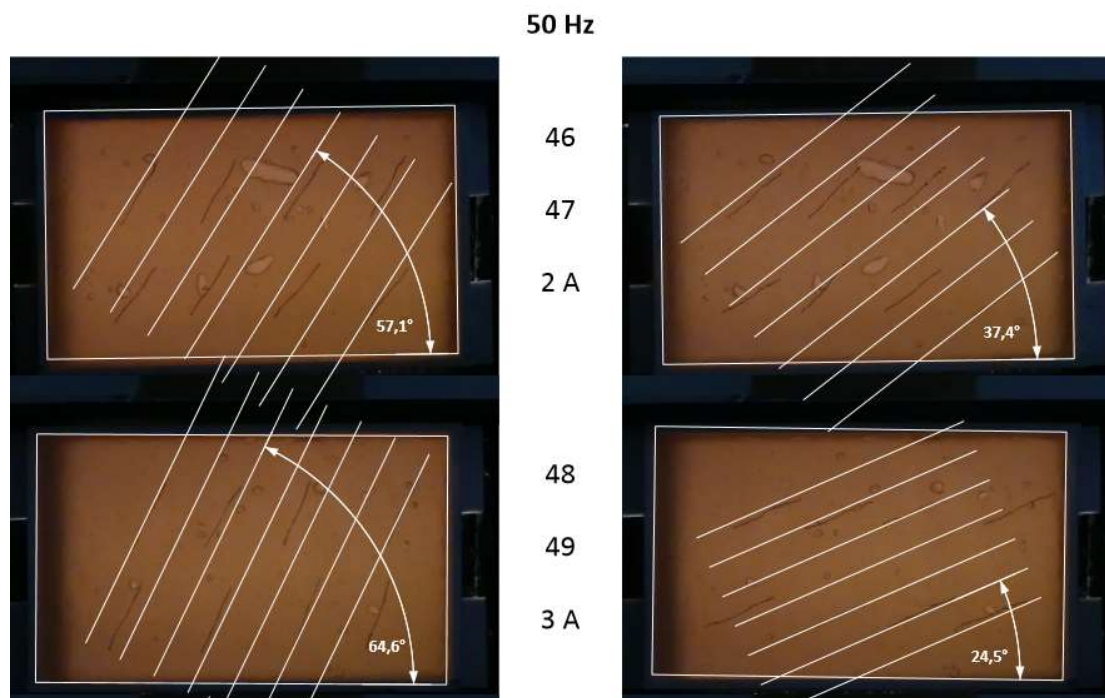


## 4 Experimentální část

### 4.1 Vliv frekvence elektromagnetického pole na MOF

V rámci individuálního projektu na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze pod vedením Ing. Karla Künzela, CSc, byla zkoumána závislost úhlu srovnání ocelových vláken v sonogelu na frekvenci elektromagnetického pole. Cílem tohoto měření bylo zjistit jaká je nejvhodnější frekvence proudu, (magnetického pole), pro cílenou magnetickou orientaci vláken v čerstvé směsi UHPC. Dle odborné literatury [16], pokud je cívka napájena střídavým proudem, je směs zároveň, při magnetické orientaci, vibrována, což je žádoucí. Z toho důvodu bylo pro další experimenty zvoleno střídavé magnetické pole generované cívkou napájenou střídavým proudem.

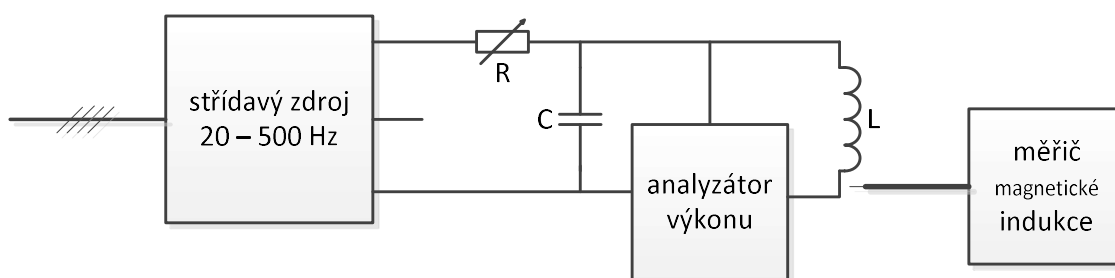
Beton a cementové pasty se řadí mezi neneutronovské kapaliny. Neneutronovské kapaliny se vyznačují tím, že jejich deformace není přímo úměrná napětí. Beton a cementové pasty se pak dle většiny autorů [5], [6], [8], [33] řadí mezi Binghamovské kapaliny. Binghamovské kapaliny jsou speciálním případem neneutronovských kapalin, které jsou schopny téct až po překročení meze kluzu  $\tau_0$  a jejich viskozita s působící silou klesá. Vibrováním betonu dochází k poklesu smykového napětí, tedy odpor cementové matrice způsobený pohybem vlákna bude klesat.



Obr. 25 Fotografie vzorků pro různou magnetickou indukci, vlevo před vystavení magnetickému poli, v pravo po vystavení magnetickému poli

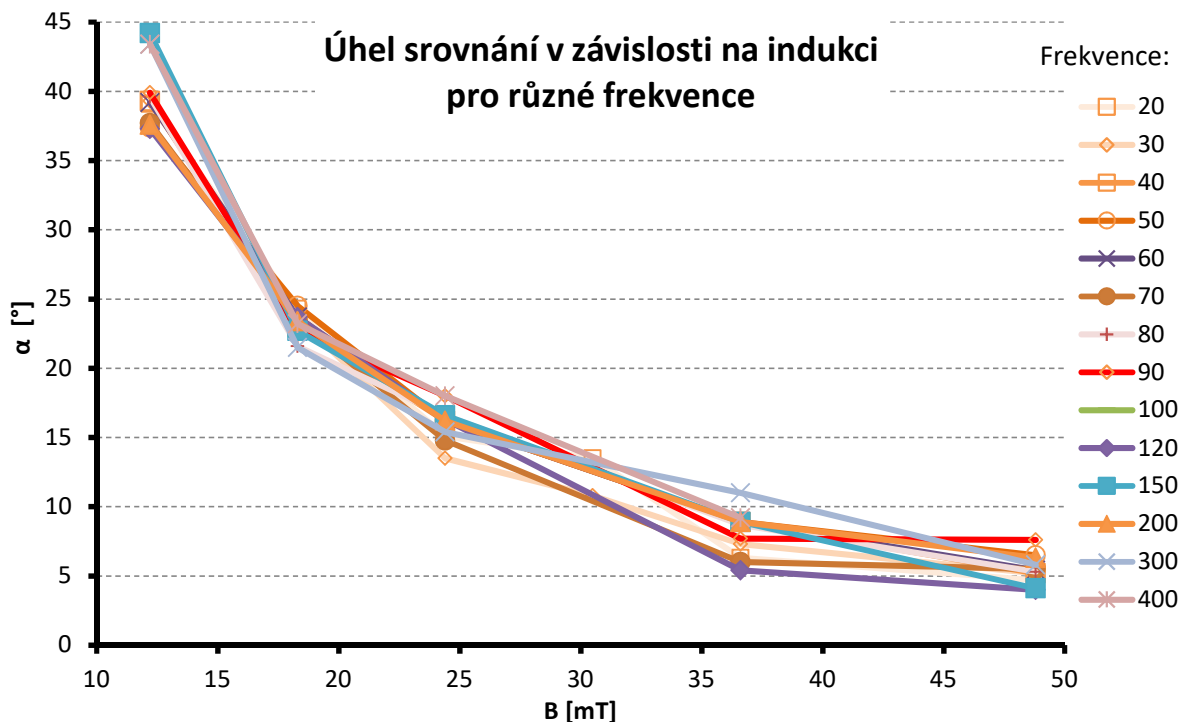
Předpokladem bylo najít frekvenci takovou, aby vibrační účinky působící síly maximálně usnadnily orientaci drátků. Předpokládalo se, že vliv frekvence na orientaci vláken bude značný. Tedy že bude nalezena frekvence, kdy dochází k velmi ochotné orientaci vláken, a naopak frekvenci kdy nedochází k orientaci vláken, při stejné magnetické indukci. Předpokládalo se, že nalezená frekvence bude velmi podobná frekvenci mechanických vibrátorů nebo optimální frekvenci pro MOF použitou v patentu [16]. Frekvence mechanického vibrátoru je 200 Hz, dle patentu [16] je optimální frekvence 3000-9000 vibrací za minutu, tedy 50-150Hz.

Měření probíhalo následujícím způsobem, byly vyrobeny vzorky sonogelu, do kterých byla ručně umístěna vlákna pod úhlem cca 60°, vůči ose magnetizace. Vzorky byly následně vystaveny magnetickému poli pomocí zařízení č. 1' (stejné zařízení, které bylo používáno v předchozím výzkumu, viz výše, jen s rozdílem, že feritový prstenec byl zaměněn za cívku s názvem KATKA 2). Vzorky byly fotografovány před a po vystavení magnetickému poli. Výsledky byly vyhodnocovány graficky na základě pořízených fotografií (Obr. 25). Úhel srovnání (změna úhlu vlákna vůči počátečnímu úhlu) byl vyhodnocován v závislosti na magnetické indukci  $B$  a frekvenci.



Obr. 26 Schéma zapojení při měření vlivu frekvence na magnetickou orientaci vláken v sonogelu

Parametry cívky KATKA 2, byly následující, vnitřní průměr 90 mm, vnější průměr 130 mm, počet závitů 1000, navinuta měděným drátem o průměru 1,8 mm, s indukčností 34 mH a odporem 2  $\Omega$ . Jako zdroj pro napájení cívky KATKA 2 byl použit zdroj California iX 3000. Pomocí tohoto zdroje byla měněna frekvence od 20 Hz do 400 Hz a proud od 2 A do 8 A. Změnou proudu byla měněna magnetická indukce, která byla měřena pomocí měřiče magnetického pole, model 410 LakeShore.



Obr. 27 Výsledný graf závislosti úhlu srovnání na magnetické indukci pro různé frekvence od 20-400 Hz

Měření neprokázalo závislost frekvence magnetického pole na magnetickou orientaci ocelových vláken v sonogelu. Sonogel byl použit pro svoji transparentnost a podobné reologické vlastnosti jako UHPC, konkrétně tixotropie a dynamické viskozity. Lze se tedy domnívat, že ani pro cementovou matici nemá frekvence významný vliv na magnetickou orientaci vláken. Závěrem měření bylo, že frekvence má zanedbatelný vliv na magnetickou orientaci a hlavním parametrem k úspěšné magnetické orientaci je dostatečná magnetická indukce. Z tohoto důvodu bude pro jednoduchost použita frekvence 50 Hz, což je frekvence sítě.

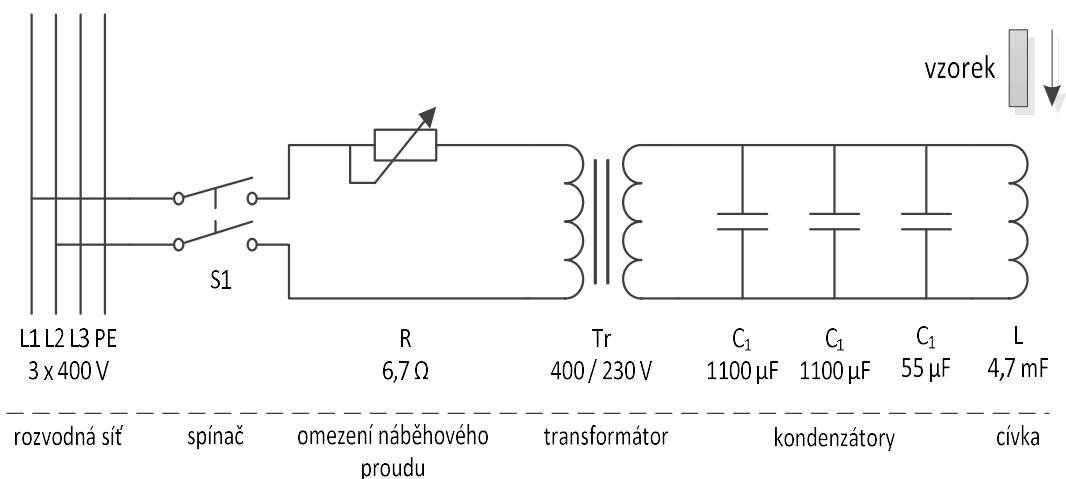
## 4.2 Výroba zařízení č. 2 pro MOF

Na základě experimentů z předchozí práce [2], kde bylo použito zařízení č. 1, byla stanovena minimální intenzita stejnosměrného magnetického pole na 55 mT. Zařízení č. 2 bylo konstruováno pro prvky čtvercového průřezu o rozměrech 150 mm x 150 mm a nedefinované délky. Na základě těchto vstupních parametrů byl proveden návrh cívky KATKA 3. KATKA 3 byla navinuta měděnou trubkou DN 8 mm, dn 6 mm s izolací 1,5 mm. Na základě orientačních výpočtů se ukázalo, že bude nutno cívku napájet velkým proudem minimálně 90 A, takto velký proud by generoval i velké ztráty projevující se zahříváním cívky a z toho důvodů byla použita trubka pro možnost chlazení vodou. Počet závitů byl 112, vnitřní průměr 315 mm, vnější průměr 535 mm a délka byla 302 mm. Z důvodů tvaru magnetického pole, jež cívka generovala, měla KATKA 3 lichoběžníkový tvar.



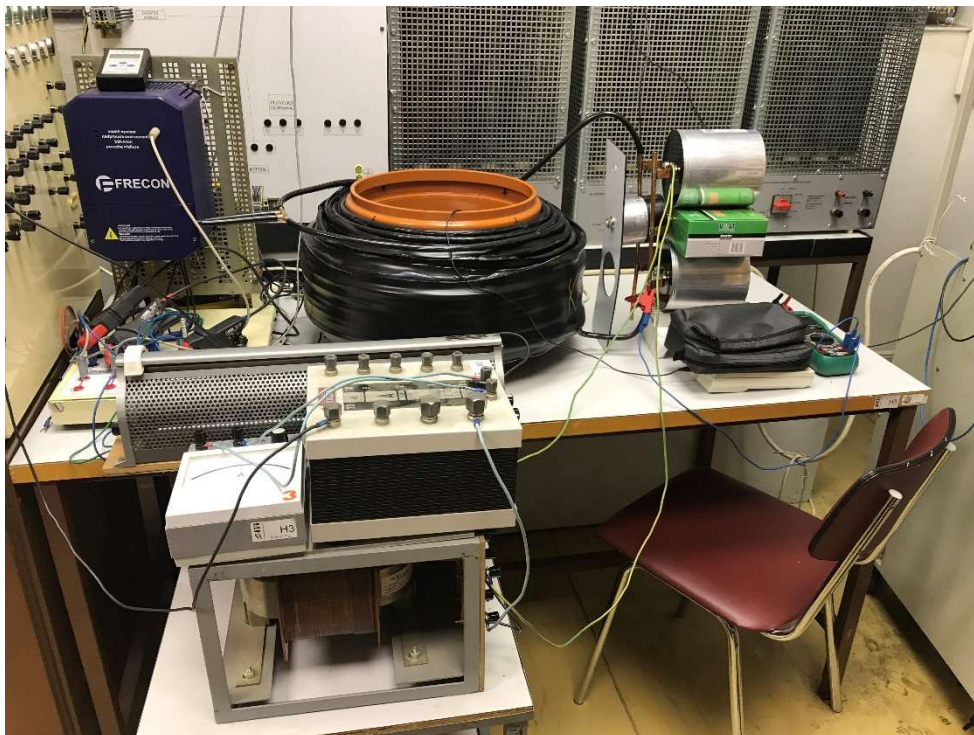
Obr. 28 Výroby cívky KATKA 3

Výroba zařízení probíhala následujícím způsobem. Cívka byla navijena ručně na kanalizační přesuvku KG 315. Každá vrstva se zmenšovala o 2 závity pro dosažení lichoběžníkového průřezu. Po navinutí každé vrstvy byly závity přetaženy smršťovací bužírkou pro zpevnění a zabránění posunu jednotlivých závitů. Spoje trubky byly provedeny pájením. V jedné třetině vinutí byla provedena odbočka pro měření a dvojí chlazení vodou. Celkem bylo provedeno 7 vrstev o celkovém počtu 112 závitů.



Obr. 29 Schéma zapojení zařízení č. 2

Po navinutí cívky KATKA 3 byla cívka paralelně zapojena s kondenzátory. Hodnota kondenzátoru byla vypočtena, tak aby s cívkou rezonovali na 50 Hz. Tím bylo dosaženo, že napájecí proud má prakticky pouze činnou složku, zatímco cívkou protéká násobek tohoto proudu, který zajišťuje potřebnou intenzitu magnetického pole. Toto zapojení bylo vyzkoušeno a bylo provedeno měření na Fakultě elektrotechnické ČVUT, které potvrdilo, že cívka KATKA 3 s konkrétními kondenzátory na dané frekvenci rezonuje. Dále byl experimentálně stanoven proud 150 A, jenž je třeba do cívky dodat, aby generovala střídavé magnetické pole s efektivní hodnotou intenzity 50 mT. Finální zapojení cívky je patrné z Obr. 29. Do obvodu byl zapojen vyřazovací odpor z důvodů omezení proudového nárazu při připojení. Další snížení napájecího proudu bylo zajištěno použitím snižovacího jednofázového transformátoru napájeného ze sdruženého napětí 400 V při sekundárním napětí 230 V.



Obr. 30 Testování a měření zařízení č.2

Funkčnost zařízení č. 2 byla ověřena pomocí vzorků ze sonogelu a ocelových vláken. Průhledná plastová forma byla naplněna směsí sonogelu a ocelových vláken. Poté byl vzorek protažen zařízením č. 2, pomocí něhož byl vystaven střídavému magnetickému poli o intenzitě 55 mT efektivní hodnoty. Po protažení vzorku zařízením č. 2 byla pozorována úspěšná magnetická orientace vláken.



Obr. 31 Testování funkčnosti zařízení č.2 pomocí sonogelu a ocelových vláken v průhledné plastové formě

### 4.3 Výroba vzorků z UHPFRC

Výroba vzorků probíhala na fakultě stavební ČVUT v betonářské hale, a proto bylo nutné před samotnou betonáží zkontrolovat, zda je zde možné zařízení č. 2 připojit na elektrické rozvody haly a zařízení popřípadě upravit. Pro výrobu vzorků bylo použito jak zařízení č. 2 tak i zařízení č. 1'. Z důvodů rychlého tuhnutí směsi a složitosti pracovního postupu bylo třeba pro betonáž vzorků většího počtu pracovníků. Vzorky byly vyrobeny z prefabrikované směsi UHPFRC, navržené a používané v Experimentálním centru ČVUT v Praze [32].

**Složení suché prefabrikované směsi, množství vyjádřené v hmotnostních podílech pojivové složky:**

- 1 hmotnostní díl cementu 42,5 R
- 0,1 hmotnostního dílu amorfního  $\text{SiO}_2$ , mikrosiliky
- 0,25 hmotnostního dílu křemičité moučky se střední velikostí zrna  $6 \mu\text{m}$
- 1,6 hmotnostního dílu čistého křemičitého písku plynulé granulometrie 0,1 až 1,2 mm, střední velikosti zrna  $d_{50} = 500 \mu\text{m}$
- 0,01 hmotnostního dílu plastifikační přísady
- 0,001 hmotnostního dílu odpěňovací přísady

Celkem bylo vyrobeno 20 vzorků, 10 vzorků o velikosti 40 mm x 40 mm x 160 mm (malé trámečky) a 10 vzorků o velikosti 100 mm x 100 mm x 400 mm (velké trámečky). Z toho množství 5 velkých trámečků a 5 malých trámečků prošlo magnetickou orientací vláken. Všechny vzorky obsahovaly stejné objemové zastoupení vláken 1,5 %.

**Tabulka 1 Použité množství jednotlivých složek pro betonáž**

Prefabrikovaná směs	90014 g
Voda	8816 g
Ocelová vlákna, Weidcon FM	5101 g

Prefabrikovaná směs, voda a vlákna byly naváženy v daném množství, viz Tabulka 1 Použité množství jednotlivých složek pro betonáž. Množství jednotlivých složek bylo vypočteno z požadovaného objemu 42,6 l plus ztráty. K míchání směsi byla použita cyklonová míchačka M125 s nuceným oběhem.

Do míchačky byla přidána nejprve suchá směs a polovina objemu požadované vody. Po pěti minutách byla za stálého míchání asi cca 5 minut přidávána vlákna, tak aby nedocházelo k jejich shlukování. S přidávanými vlákny byl přidán i zbytek vody a směs byla dalších 5 minut míchána. Směs byla plněna do předem připravených forem ošetřených odbedňovacím přípravkem.

Vzorky, které nebyly vystavovány magnetickému poli, byly plněny do standardizovaných ocelových forem. Po naplnění byly vzorky přikryty PE folií, jež zabraňovala nadměrnému odpařování vody.



**Obr. 32 Připravené formy**

Vzorky pro magnetickou orientaci vláken byly plněny do plastových forem z pěněného PVC, po naplnění byly opatřeny víčkem. Víčka byla použita na základě předchozích experimentů, ve kterých se ukázalo, že při MOF má magnetické pole tendenci vytahovat vlákna ze vzorku. Po naplnění a zavíčkování byly vzorky vystaveny magnetickému poli pomocí zařízení č. 1' a 2. V zařízení č. 1' byly vzorky protahovány cívku pomocí pohonného šroubu. V zařízení č. 2 byly vzorky protahovány cívku ručně pomocí popruhu. Již při samotném plnění forem, se zdálo, že čerstvá směs má hustší konzistenci, než když byly vzorky připravovány v předchozím experimentu. Z důvodu rychlého tuhnutí směsi byl zvolen následující postup plnění forem, nejprve byly naplněny velké formy pro MOF, poté malé formy pro MOF, následně velké ocelové formy pro nezorientované vzorky a jako poslední malé ocelové formy pro nezorientované vzorky.



Obr. 33 Odbedněné vzorky 40 mm x 40 mm x 160 mm, rozdílná kvalita povrchu, v levo zorientovaný vzorek, vpravo nezorientovaný vzorek

Zorientované vzorky "S" (srovnané, vystavené MOF) a nezorientované vzorky "N" (nesrovnané, nevystavené MOF) byly odbedněny po 24 hodinách a uloženy k zrání. Při odbedňování byla pozorována horší kvalita povrchu u nezorientovaných vzorků, to mohlo být zapříčiněno způsobem plnění nebo tím, že zorientované vzorky byly vibrovány střídavým proudem (Obr. 33).





Obr. 34 Zařízení č. 1' \_výroba vzorků z UHPFRC



Obr. 35 Zařízení č.2\_výroba vzorků z UHPFRC

## 4.4 Testování vzorků z UHPFRC

Testovány byly všechny vzorky nové (male i velké trámečky) a čtyři staré malé trámečky, které byly vyrobeny v rámci předchozího výzkumu. Tyto 3 roky staré vzorky byly tytéž vzorky, na nichž byly provedeny CT-skeny, bylo tedy jasné, že na těchto vzorcích proběhla magnetická orientace úspěšně. Všechny vzorky byly změřeny a zváženy. U všech malých vzorků byl měřen činitel jakosti cívky. Dále byly všechny vzorky podrobeny zkoušce pevnosti tahu za ohybu. Malé vzorky byly testovány tříbodovým ohybem a velké vzorky čtyřbodovým ohybem. Na všech nových vzorcích byla provedena zkouška pevnosti v tlaku na úlomcích.

### 4.4.1 Měření činitele jakosti cívky $Q$

V předchozím výzkumu se ukázala metoda měření činitele jakosti cívky  $Q$ , jako účinná a spolehlivá metoda pro nedestruktivní měření orientace vláken ve vzorcích. Bylo zjištěno, že u vzorků s více orientovanými vlákny dojde k poklesu činitele jakosti cívky  $Q$  v porovnání se vzorky s neorientovanými vlákny. Toto měření bylo potvrzeno v předchozí práci pomocí CT-skenů. Avšak stále je tato metoda ve fázi výzkumu a zatím ji lze použít pouze pro porovnání zorientovaných vzorků vůči nezorientovaným, a tak si ověřit, jestli měla magnetická orientace nějaký efekt na zorientované vzorky. Také je důležité zmínit, aby porovnávání vzorků bylo funkční, musí mít vzorky stejné objemové zastoupení vláken.

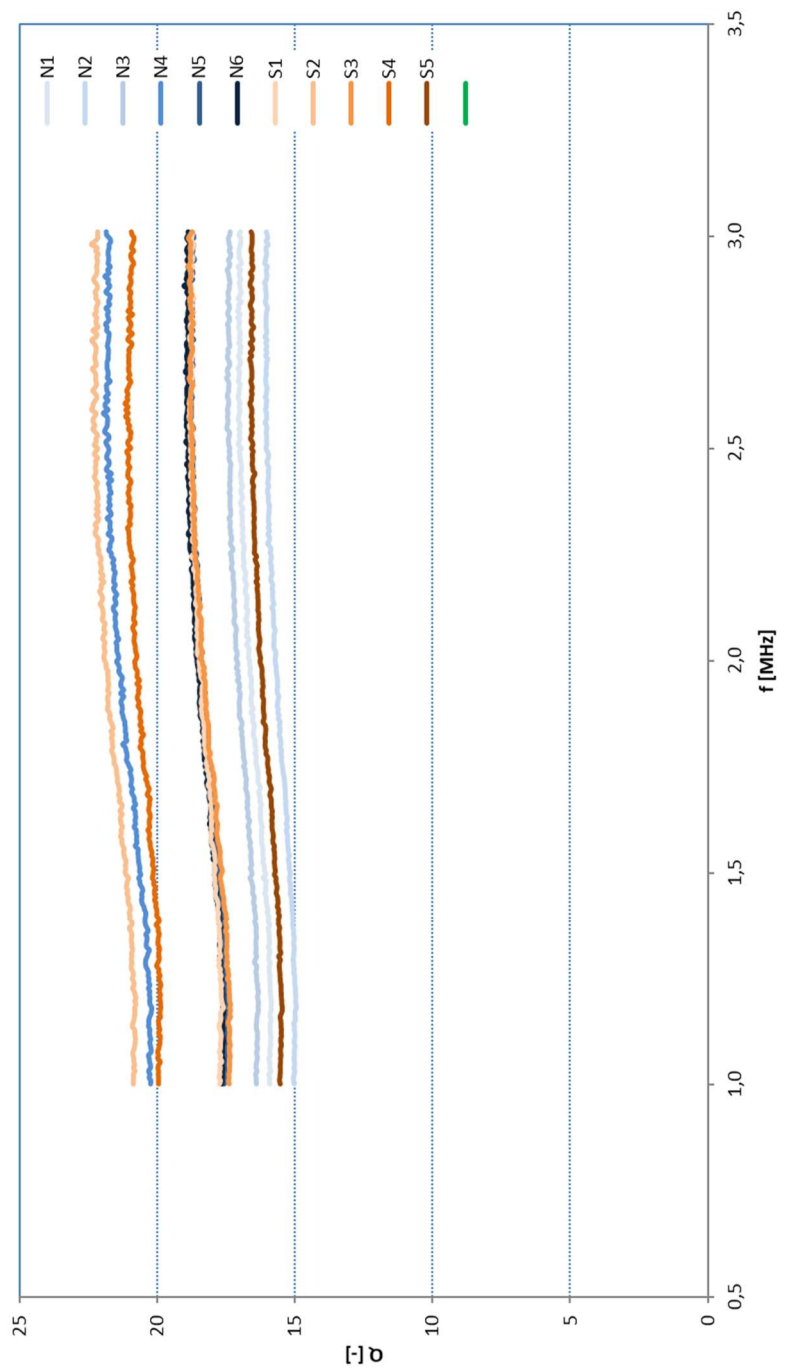
Měření činitele jakosti cívky  $Q$  bylo provedeno na všech starých i nových malých trámečkách o rozměrech 40 mm x 40 mm x 160 mm. Nové vzorky byly měřeny po pěti dnech, staré vzorky po 3 letech. Měření bylo provedeno následujícím způsobem, vzorky byly vkládány do měřicí cívky L3, která byla připojena k měřiči impedance Agilent E4991A. Pomocí tohoto přístroje byl měřen činitel jakosti měřicí cívky  $Q$ , jenž lze výrazně ovlivnit jádrem cívky (vzorkem). Měřicí cívka L3 byla navinuta drátem o průměru 1,8 mm a měla 28 závitů. Měření bylo provedeno od 1 MHz do 3 MHz.



Obr. 36 Měření činitele jakosti cívky  $Q$

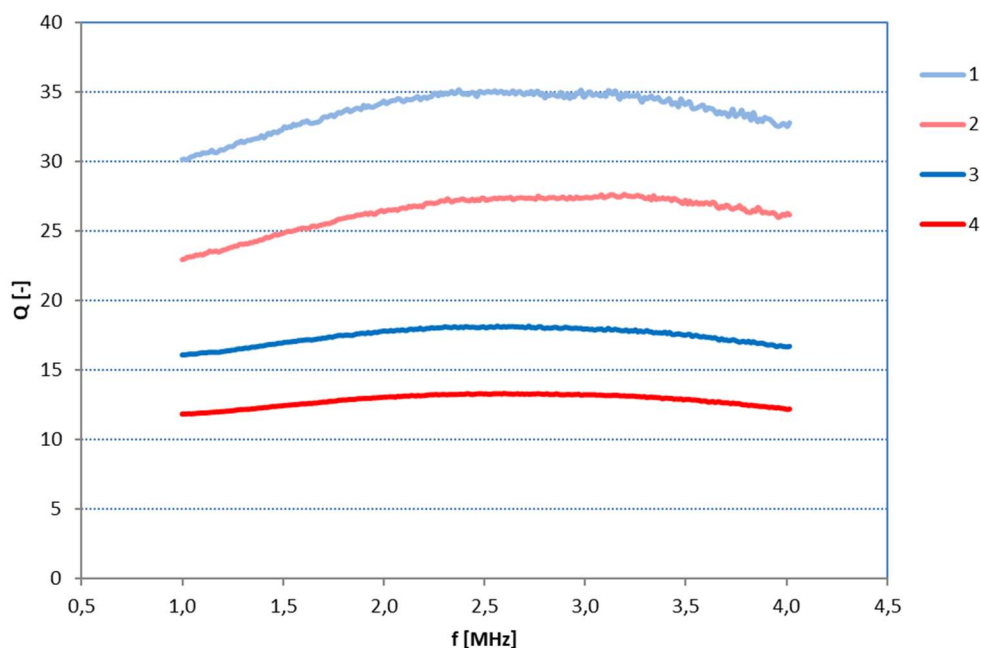
Výsledky měření pro nové vzorky měly veliký rozptyl a nebylo možné z výsledků měření určit, které vzorky jsou zorientované a které ne. Bylo očekáváno, že u vzorků označených písmenem S, jež byly vystaveny magnetické orientaci vláken, bude pozorován výrazný pokles činitele jakosti cívky  $Q$ . Tento pokles vůči průměrným hodnotám se objevil výrazně pouze u vzorku S5. Bohužel tento pokles byl pozorován u některých nezorientovaných vzorků také, konkrétně N1, N2, N3. Výsledky byly tedy neprůkazné. Důvodů proč měření nevyšlo podle očekávání je více. Buď k cílené orientaci magnetickým polem nedošlo a vlákna nezměnila svoji polohu, magnetické pole nebylo dostatečně silné, aby překonalo odpor cementové matice. Nebo obsah vláken ve vzorcích byl odlišný, to mohlo být zapříčiněno způsobem plnění forem, nejprve byly plněny vzorky S (vzorky pro MOF) a poté N (nezorientované vzorky).

vzorky nové prosinec 2019 malé											
	N1	N2	N3	N4	N5	N6	S1	S2	S3	S4	S5
1	12.12.2019	12.12.2019	12.12.2019	12.12.2019	12.12.2019	12.12.2019	12.12.2019	12.12.2019	12.12.2019	12.12.2019	12.12.2019
křivka	N1	N2	N3	N4	N5	N6	S1	S2	S3	S4	S5
den	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
měření	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
cívka	N1	N2	N3	N4	N5	N6	S1	S2	S3	S4	S5
vzorek	40x40x160	40x40x160	40x40x160	40x40x160	40x40x160	40x40x160	40x40x160	40x40x160	40x40x160	40x40x160	40x40x160
rozměr [mm]	beton	beton	beton	beton	beton	beton	beton	beton	beton	beton	beton
materiál	1,50%	1,50%	1,50%	1,50%	1,50%	1,50%	1,50%	1,50%	1,50%	1,50%	1,50%
drátky [množství]	N	N	N	N	N	N	Oxx	Oxx	Oxx	Oxx	Oxx
orientace	x-střed	x-střed	x-střed	x-střed	x-střed	x-střed	x-střed	x-střed	x-střed	x-střed	x-střed
místo	17,08	16,12	17,49	21,95	18,86	19,04	18,85	22,41	18,90	21,17	16,65
Qmax [-]											



Obr. 37 Výsledky měření činitele jakosti cívky Q pro nové vzorky, modré odstíny nezorientované vzorky, oranžové odstíny zorientované vzorky (vzorky, které prošly magnetickým pole)

49	staré vzorky 2017 (CT-skeny)			
křivka	1	2	3	4
den	20.04.2017	20.04.2017	06.04.2017	20.04.2017
měření	9	10	10	4
cívka	3	3	3	3
vzorek	66	56n	51	63
rozměr [mm]	40×40×160	40×40×160	40×40×160	40×40×160
materiál	beton	beton	beton	beton
drátky [množství]	1 [0,75 %]	1 [0,75 %]	1 [1,5 %]	1 [1,5 %]
orientace	N	Oxx	N	Oxx
místo	x-střed	x-střed	x-střed	x-střed
Qmax [-]	35,21	27,62	18,17	13,34

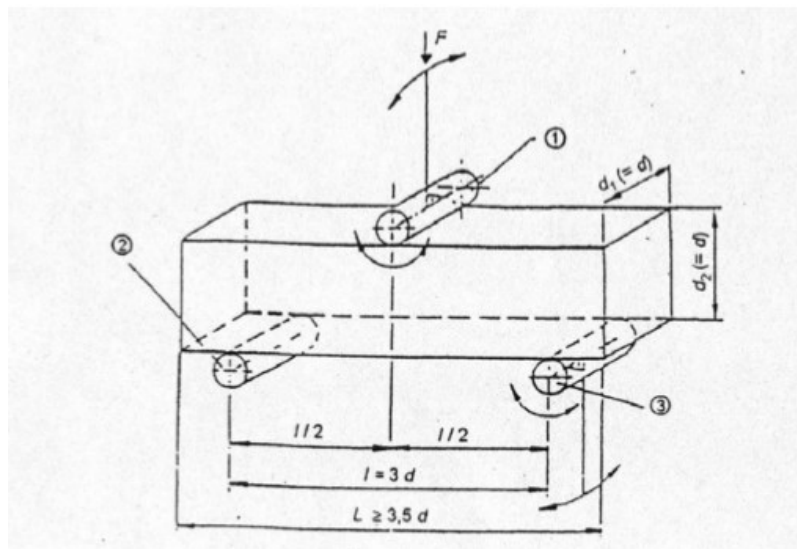


Obr. 38 Výsledky měření činitele jakosti cívky  $Q$  pro staré vzorky z roku 2017, modře nezorientované vzorky, červeně zorientované, světlé odstíny 0,75 % objemu vláken, tmavé odstíny 1,5 % objemu vláken

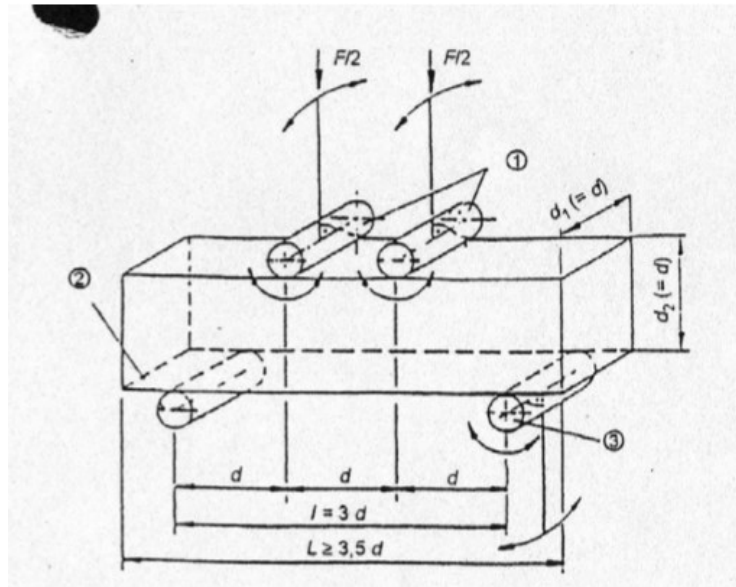
Na rozdíl od nových vzorků, byl u starých vzorků z roku 2017 již v předchozím výzkumu naměřen pokles činitele jakosti cívky  $Q$ . Metoda byla následně ověřena CT-skeny na stejných vzorcích. Jedná se konkrétně o dva vzorky s 1,5% objemovým zastoupením vláken (tmavé odstíny), dva vzorky s 0,75% objemovým zastoupením vláken (světlé odstíny). Vždy jeden z dvojice vzorků byl podroben magnetické orientaci. U zorientovaných vzorků (červeně) byl naměřen činitel jakosti cívky  $Q$  výrazně nižší než u vzorků nezorientovaných (modře) se stejným objemovým zastoupením vláken. Dále se podle předpokladů potvrdilo, že činitel jakosti cívky  $Q$  klesá i se zvyšujícím objemem vláken. Vzorky s 1,5% objemem vláken měly nižší činitel jakosti cívky  $Q$ , než vzorky s 0,75 % objemem vláken. Pokles činitele jakosti cívky byl procentuálně 30 % jak pro 0,75 % objemu vláken tak i 1,5 % objemu vláken.

#### 4.4.2 Zkouška pevnosti v tahu ohybem

Všechny vzorky z UHPFRC byly podrobeny zkoušce pevnosti v tahu ohybem. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 12390 -5 (73 1302) Zkoušení ztvrdlého betonu [34]. Tato norma popisuje metodu pro stanovení pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles ze ztvrdlého betonu. Před samotným započítáním zkoušky byla všechna zkušební tělesa změřena a zvážena. Nově vybetonované vzorky byly zkoušeny z časových důvodů po 7 dnech, staré vzorky po cca 3 letech. Vzorky byly zatěžovány kolmo na směr ukládání. Malé trámečky 40 mm x 40 mm x 160 mm byly zkoušeny tří bodovým ohybem, byl použit lis MTS Criterion<sup>TM</sup> Model 43. Zatěžování bylo řízeno posunem a probíhalo rychlostí 0,03 mm/s. Všechny malé vzorky byly zatěžovány stejnou dobu a to cca 20 minut. Velké trámečky 100 mm x 100 mm x 400 mm byly zkoušeny čtyřbodovým ohybem. Zkušební lis byl jiný a nebylo možno pomocí něho měřit posun, z tohoto důvodu byly vzorky opatřeny snímačem průhybu. Zatěžování probíhalo taktéž posunem a rychlost zatěžování byla 0,01 mm.



Obr. 39 Tříbodová zkouška ohybem 1) zatěžovací válečky 2) podpěrný váleček 3) podpěrný váleček [34]



Obr. 40 Čtyřbodová zkouška ohybem 1) zatěžovací válečky 2) podpěrný váleček 3) podpěrný váleček [34]

Pevnost v tahu ohybem byla vypočtena následujícím způsobem.

Pro čtyřbodový ohyb:

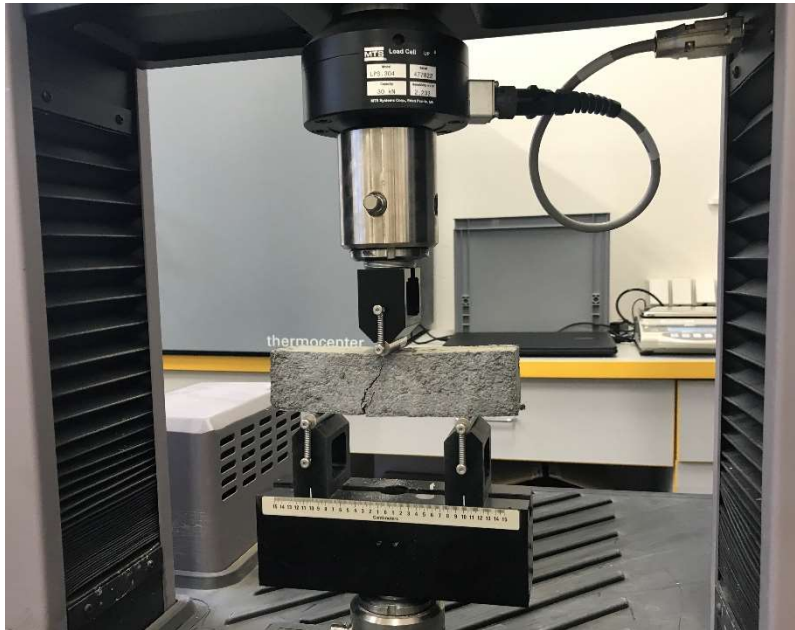
$$f_{cf} = \frac{F * L}{d_1 * d_2^2}$$

Pro tříbodový ohyb:

$$f_{cf} = \frac{3 * F * L}{2 * d_1 * d_2^2}$$

Příčemž:	$f_{cf}$	pevnost v tahu ohybem [MPa]
	F	maximální zatížení [N]
	L	vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]
	$d_1$ a $d_2$	rozměry příčného řezu (Obr. 40) [mm]

Získaná data ze všech zkoušek pevnosti v tahu ohybem byla zpracována pomocí softwaru MS\_Excel. Byly vytvořeny grafy závislosti působící síly na průhybu vzorku, takzvaný diagram odolnosti, byla vypočtena pevnost v tahu ohybem dle výše uvedeného vzorce, dále byl vypočten faktor ohybové tuhosti (viz další odstavec).



Obr. 41 Zkouška pevnosti v tahu ohybem (třibodová, lis MTS)



Obr. 42 Rozlomené vzorky 100 mm x 100 mm 400 mm, po zkoušce v tahu čtyřbodovým ohybem

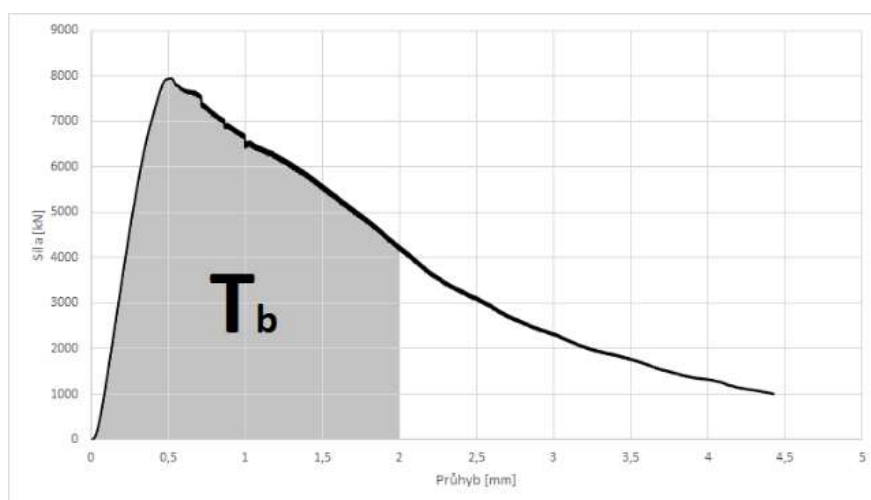


#### 4.4.3 Faktor ohybové tuhosti $FT$

Vláknobeton je charakterizován svojí duktilitou. Duktilitu vyjadřuje záznam síla/průhyb, zajištěný při zkoušce ohybem. Tento záznam je dle české přednormy nazýván diagramem odolnosti. Přítomnost vláken a jejich orientace, zásadně ovlivní chování prvku, při zatěžování ohybem, až po vzniku první trhliny. V české přednormě ČSN P 73 2452 VLÁKNOBETON – ZKOUŠENÍ ZTVRDLÉHO VLÁKNOBETONU, je vláknobeton charakterizován několika veličinami, jež zahrnují chování vláknobetonu i po dosažení maximálního napětí a tímto zohledňují působení vláken v prvku:

- Pevnost v tahu při vniku makrotrhliny, tedy při dosažení maximálního zatížení
- Pevnost v tahu při průhybu trámce 0,5 mm
- Pevnost v tahu při průhybu trámce 3,5 mm

Avšak tato práce se neřídila českou přednormou, ale byl použit faktor ohybové tuhosti  $FT$ , jenž by měl ještě lépe a přesněji zohlednit chování vláken při zatěžování prvku. Výpočet faktoru ohybové tuhosti je definován v japonské normě JSCE SF4 Method of Test For Flexural Strength and Flexural Toughness [35]. Tato norma popisuje, jak provést mechanickou zkoušku a následně výpočet faktoru ohybové tuhosti. K určení faktoru ohybové tuhosti je zapotřebí diagram odolnosti, ten je možno získat pomocí tříbodové nebo čtyřbodové zkoušky pevnosti v tahu ohybem. Výpočet  $FT$  byl, na doporučení docenta inženýra Radoslava Sovjáka, PhD., upraven tak, aby lépe zohledňoval chování materiálu po vniku makrotrhliny. V japonské normě se používá pro výpočet faktoru ohybové tuhosti  $FT$  plocha pod diagramem odolnosti počítána do průhybu  $L/150$ , kde  $L$  je délka mezi podporami při pevnostní zkoušce ohybem. Zda je hodnota  $L/150$  vhodná pro výpočet faktoru ohybové tuhosti je dle autorů [36] diskutabilní. V této práci byla hodnota  $L/150$  upravena na hodnotu  $L/50$ , tato hodnota je použita jak pro výpočet plochy pod diagramem odolnosti, tak i ve vzorci pro výpočet  $FT$ .



Obr. 43 Diagram odolnosti, vzorek 40 mm x 40 mm x 160 mm plocha  $T_b$  použita pro výpočet faktoru ohybové tuhosti  $FT$

Pro malé vzorky 40 mm x 40 mm x 160 mm byla počítána plocha diagramu odolnosti do průhybu 2 mm (100/50=2). Pro velké vzorky 100 mm x 100 mm x 400 mm byla brána plocha diagramu odolnosti do průhybu 6 mm (300/50=6).

Vzorec pro výpočet faktoru ohybové tuhosti FT:

$$FT = \frac{T_b * L}{(L/50) * d_1 * d_2^2}$$

Příčemž:	FT	pevnost v tahu ohybem [MPa]
	$T_b$	ohybová tuhost, plocha pod diagramem odolnosti od průhybu 0 do průhybu $L/50$ [J]
	$L$	vzdálenost mezi podpěrnými válečky (Obr. 40) [mm]
	$d_1$ a $d_2$	rozměry příčného řezu (Obr. 40) [mm]

#### 4.4.4 Zkouška pevnosti v tlaku

Na všech nových vzorcích byla provedena zkouška pevnosti v tlaku. Z časových důvodů nebyla zkouška provedena na malých starých tělesech z roku 2017. Zkouška byla provedena po 9 dnech stáří vzorků. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 12390-3 (73 1302) Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles [37]. Zkouška byla provedena pomocí lisu, jenž vyhovoval normě [38]. Zkouška pevnosti v tlaku probíhala na zlomcích, tedy na tělesech, na nichž byla již provedena zkouška ohybem. Pro každý trámeček byly provedeny dvě zkoušky pevnosti v tlaku, na každé straně trámečku jedna zkouška. Zlomky byly umístěny mezi ocelové roznášecí destičky normovaných velikostí a vloženy do lisu. Pro vzorky 40 mm x 40 mm x 160 mm měla roznášecí destička velikost 40 mm x 40 mm. Pro vzorky o velikosti 100 mm x 100 mm x 400 mm, měla roznášecí destička normovanou velikost 100 mm x 100 mm. Vzorky byly zatěžovány kolmo na směr ukládání. Vzorky byly zatěžovány konstantní rychlostí až do porušení. Byla zaznamenána maximální dosažená síla  $F_{cu}$ , ze které byla následně vypočtena pevnost v tlaku. Pro každý vzorek byly naměřeny dvě hodnoty maximální dosažené síly, následně spočteny dvě hodnoty tlakové pevnosti. Tyto dvě hodnoty pro jeden a ten samý vzorek byly zprůměrovány a zapsány do výsledů.

Pevnost v tlaku zkušebních těles byla vypočtena z maximální dosažené síly při zatěžování a rozměrů tělesa, respektive zatěžovací plochy:

$$f_c = \frac{F_{cu}}{A_c}$$

Příčemž:	$f_c$	pevnost v tlaku [MPa]
	$F_{cu}$	maximální zatížení při porušení [N]
	$A_c$	průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku, vypočtená ze jmenovité velikosti tělesa, v našem případě plocha zatěžovací, u malých trámečků 40 mm x 40 mm, u velkých trámečků 100 mm x 100 mm [mm]



Obr. 44 Příprava vzorku pro zkoušku pevnosti v tlaku, osazení roznášecí ocelové destičky

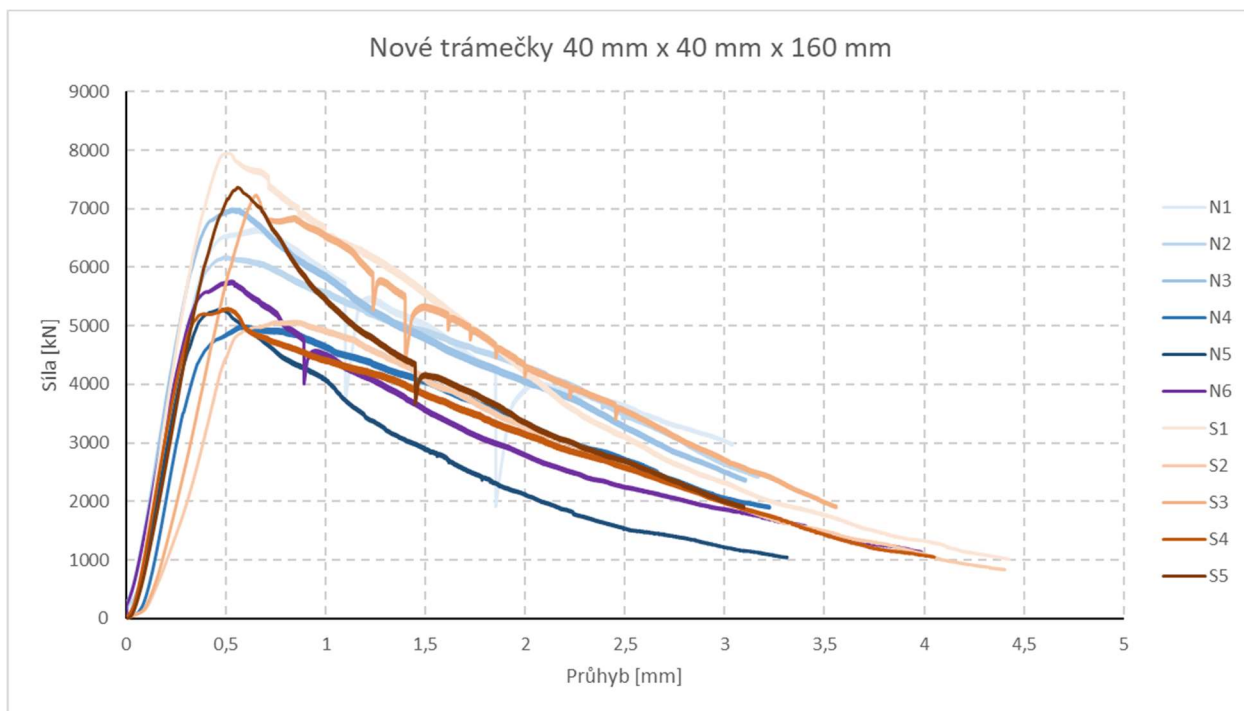
## 4.5 Výsledky

V následující kapitole jsou shrnuty a okomentovány veškeré výsledky mechanických zkoušek. Jsou zde obsažené diagramy odolnosti pro všechny vzorky, graficky znázorněné faktory ohybové tuhosti **FK** pro všechny vzorky, graficky znázorněné tlakové pevnosti pro nově vyrobené vzorky a v tabulkách shrnuty veškeré vypočtené hodnoty z naměřených výsledků včetně měření činitele jakosti cívky **Q** na malých vzorcích. Výsledky jsou vyhodnocovány v následujícím pořadí nejprve malé nové vzorky o rozměrech 40 mm x 40 mm x 160 mm, poté velké nové vzorky o rozměrech 100 mm x 100 mm x 400 mm a jako poslední malé staré vzorky z roku 2017 o rozměrech 40 mm x 40 mm x 160 mm.

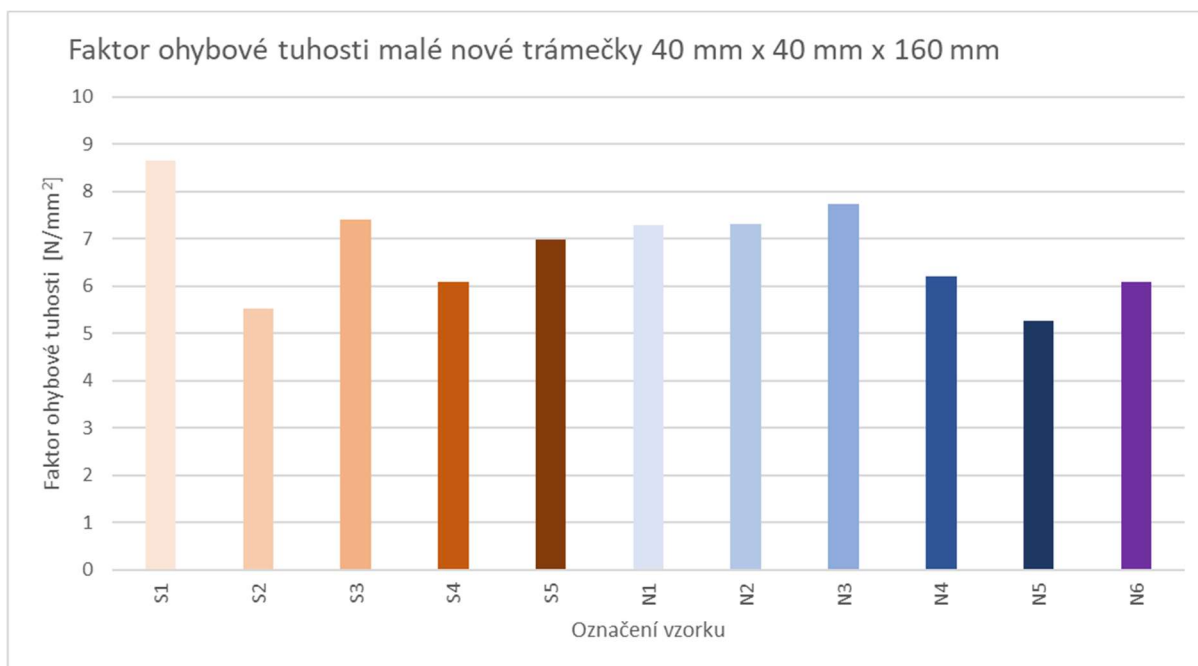
### 4.5.1 Malé nové vzorky 40 mm x 40 mm x 160 mm

Celkem bylo testováno 11 vzorků, z čehož 5 vzorků prošlo MOF. Objemové zastoupení vláken bylo 1,5 % u všech vzorků. Vzorky byly zváženy, změřeny a byla spočítána objemová hmotnost. Následně byla provedena tříbodová zkouška pevnosti v tahu za ohybu, postup zkoušky byl uveden výše. Z výsledků zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byly vytvořeny diagramy odolnosti pro jednotlivé vzorky (Obr. 45). V diagramu odolnosti jsou znázorněny v oranžových odstínech vzorky zorientované (vystavené magnetickému poli) a modrými odstíny vzorky nezorientované.

Bylo očekáváno, že zorientované vzorky budou vykazovat vyšší pevnost v tahu za ohybu, ale hlavně vyšší faktor ohybové tuhosti z důvodů vyšší reziduální pevnosti po vniku první makrotrhliny při přítomnosti vláken kolmo na trhlinu. Toto chování prvku s orientovanými vlákny v požadovaném směru již potvrdil Tvarog [4] ve své práci, v níž se zabýval mechanickou orientací vláken. Již z diagramu odolnosti (Obr. 45) je patrné, že žádný výrazný rozdíl mezi zorientovanými a nezorientovanými vzorky nebyl. Ačkoliv průměrná pevnost v tahu za ohybu byla u zorientovaných o cca 1 MPa vyšší, byl tento rozdíl tak malý, že úspěšná magnetická orientace vláken nebyla potvrzena. Toto také potvrdily výsledky faktoru ohybové tuhosti **FT**, které se průměrem jen nepatrně lišily.

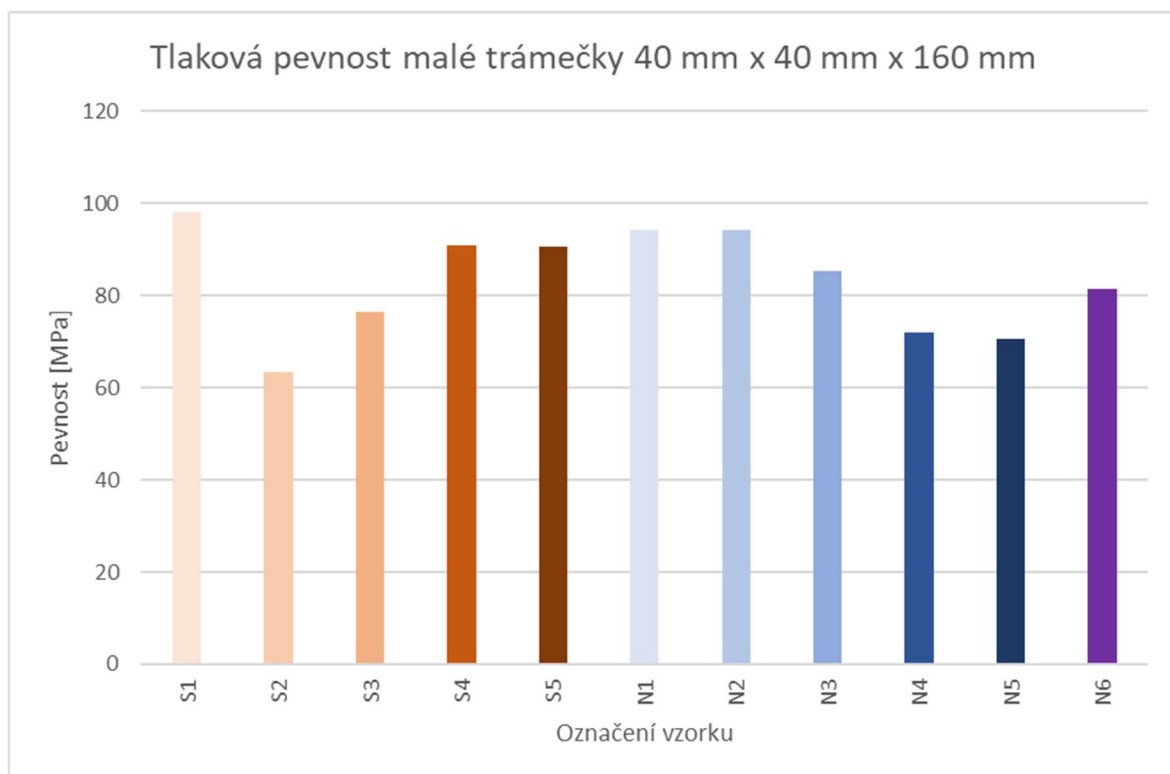


Obr. 45 Diagram odolnosti nové trámečky 40 mm x 40 mm x 160 mm, oranžové odstíny zorientované vzorky a modré odstíny nezorientované vzorky



Obr. 46 Graficky znázorněné hodnoty faktoru ohybové tuhosti, oranžové odstíny zorientované vzorky, modré odstíny nezorientované vzorky

Po zkoušce ohybem, byly tytéž vzorky podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku. Na každém vzorku byla provedena zkouška pevnosti v tlaku dvakrát, z každé strany jednou. Tlakové pevnosti se také nijak výrazně nelišily, nejspíše tato technologie nemá žádný, nebo jen zanedbatelný vliv na tuhnutí betonu. Směrodatná odchylka byla u všech hodnot u zorientovaných vzorků vyšší než nezorientovaných. Očekávalo se, že tomu bude naopak z důvodů lepší kvality povrchu u zorientovaných vzorků. Výsledky zkoušek pevnosti v tahu ohybem potvrdily měření činitele jakosti cívky  $Q$ . Tedy, pokud byl činitel jakosti cívky  $Q$  nižší než průměrná hodnota, měl vzorek oproti průměrnému vzorku vlákna více zorientovaná, toto také potvrdil faktor ohybové tuhosti, jenž u vzorků s nižším  $Q$  dosahoval vyšších hodnot. Avšak jak mechanické zkoušky, tak měření činitele jakosti cívky  $Q$  potvrdily, že k úspěšné magnetické orientaci vláken u této sady vzorků nedošlo.



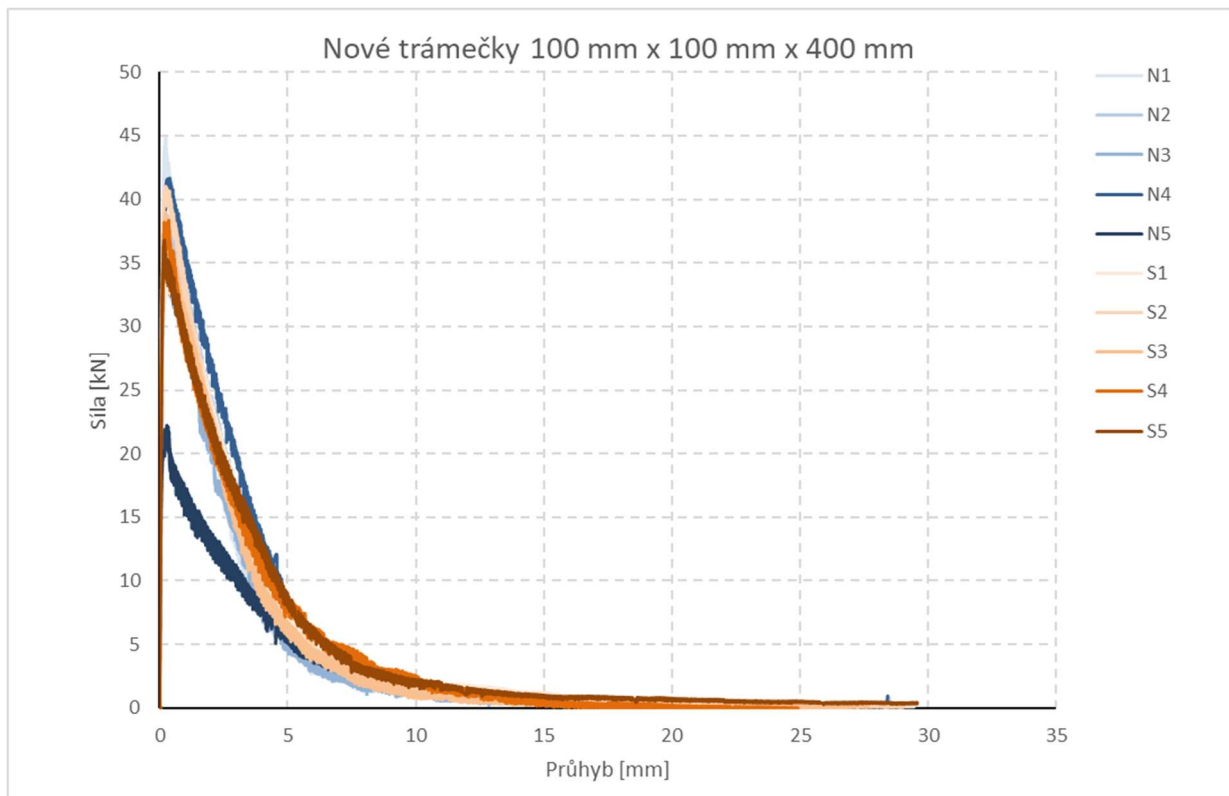
Obr. 47 Graficky znázorněné hodnoty tlakové pevnosti, oranžové odstíny zorientované vzorky, modré odstíny nezorientované vzorky

Tabulka 2 Výsledky nových vzorků 40 mm x 40 mm x 160 mm

Malé nové trámečky 40 mm x 40 mm x 160 mm					
Vzorek	Objemová hmotnost	$f_c$	$f_{cf}$	FT	Q
označení	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Mpa]	[Mpa]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]
S1	2326,2	98,10	18,30	8,66	18,85
S2	2114,4	63,40	11,30	5,54	22,41
S3	2125,7	76,40	16,40	7,40	18,9
S4	2314,5	90,80	12,30	6,09	21,17
S5	2266,0	90,50	16,60	6,98	16,65
Průměr	2229,3	83,84	14,98	6,93	19,60
Směrodatná odchylka	91,6	12,4	2,7	1,1	2,0
N1	2232,4	94,10	14,90	7,28	17,08
N2	2299,4	94,20	14,10	7,32	16,12
N3	2287,1	85,30	16,00	7,74	17,49
N4	2289,9	71,90	12,00	6,20	21,95
N5	2167,2	70,50	12,20	5,26	18,86
N6	2217,8	81,30	13,20	6,09	19,04
Průměr	2249,0	82,88	13,73	6,65	18,42
Směrodatná odchylka	47,6	9,5	1,4	0,9	1,9

#### 4.5.2 Velké nové vzorky 100 mm x 100 mm x 400 mm

Vzorky byly testovány obdobně, jako vzorky malé nové viz výše. Celkem bylo zkoušeno 10 vzorků, z čehož 5 vzorků bylo vystaveno magnetickému poli. Objem vláken byl u všech vzorků 1,5 %. Vzorky byly změřeny a zváženy a byla spočítána objemová hmotnost. Nejprve byla provedena čtyřbodová zkouška pevnosti v tahu ohybem. Z výsledků zkoušky pevnosti v tahu ohybem byl získán diagram odolnosti, byla spočítána pevnost v tahu za ohybu a faktor ohybové tuhosti. Následně byla provedena na zlomcích vzorků zkouška pevnosti v tlaku. Činitel jakosti cívky nebyl měřen z časových důvodů pro sestavení měřící cívky.



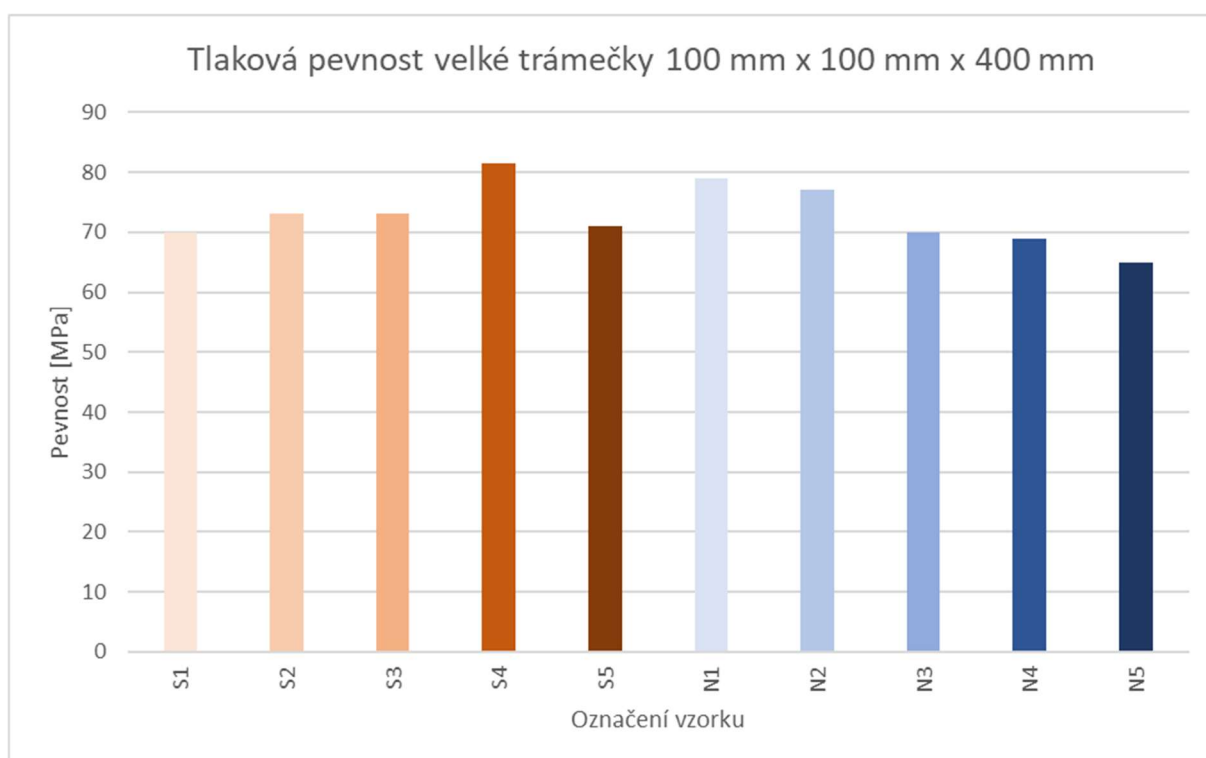
Obr. 48 Diagram odolnosti nové trámečky 100 mm x 100 mm x 400 mm, oranžové odstíny zorientované vzorky a modře nezorientované vzorky

Vliv orientace vláken na diagram odolnosti, se očekával ještě větší než u vzorků menších velikostí. Vzorky menších velikostí budou více ovlivněny efektem stěn bednění, to znamená, že vlákna do vzdálenosti menší, než polovina vlákna od stěny bednění nemohou být orientovány kolmo ke stěně bednění. Diagramy odolnosti pro zorientované vzorky (oranžové odstíny) se výrazně nelišily od diagramů odolnosti nezorientovaných vzorků, až na vzorek N5 jenž vykazoval výrazně nižší pevnost v tahu za ohybu, než ostatní vzorky. Ani faktor ohybové tuhosti  $FT$  se pro zorientované vzorky výrazně nelišil od vzorků nezorientovaných. Průměrná pevnost v tahu byla u zorientovaných vzorků nepatrně vyšší, ale úspěšná magnetická orientace vláken nebyla mechanickými zkouškami potvrzena.





Obr. 49 Graficky znázorněné hodnoty faktoru ohybové tuhosti, oranžové odstíny zorientované vzorky, modré odstíny nezorientované vzorky



Obr. 50 Graficky znázorněné hodnoty tlakové pevnosti, oranžové odstíny zorientované vzorky, modré odstíny nezorientované vzorky

Vliv technologie MOF na výslednou tlakovou pevnost nebyl prokázán ani u vzorků větších rozměrů. Průměrná pevnost zorientovaných vzorků vůči nezorientovaným se jen nepatrně lišila. Směrodatná odchylka u zorientovaných vzorků byla výrazně menší než u vzorků nezorientovaných, toto mohlo být způsobeno postupem plnění forem (zorientované vzorky byly plněny jako první a nezorientované jako poslední). Již při odbednění byla pozorována, obdobně jako u menších vzorků, horší kvalita povrchu u nezorientovaných vzorků.

Tabulka 3 Výsledky nových vzorků 100 mm x 100 mm x 400 mm

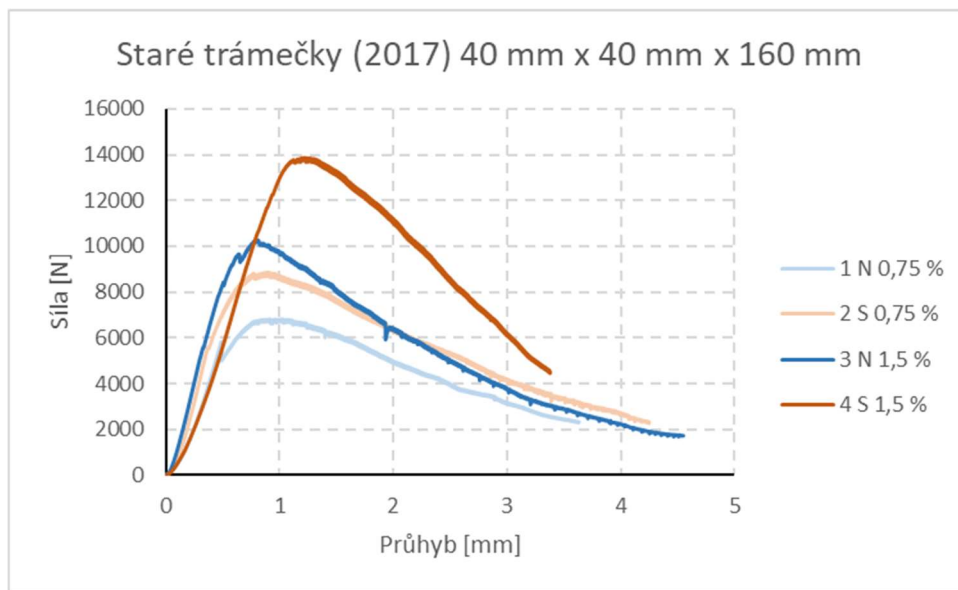
Velké nové trámečky 100 mm x 100 mm x 400 mm				
Vzorek	Objemová hmotnost	$f_c$	$f_{cf}$	FT
označení	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Mpa]	[Mpa]	[N/mm <sup>2</sup> ]
S1	2305,3	69,90	10,10	5,20
S2	2338,7	73,10	12,00	5,30
S3	2338,0	73,00	11,50	5,00
S4	2362,1	81,50	11,20	5,20
S5	2309,2	71,00	10,90	5,10
Průměr	2330,6	73,70	11,14	5,16
Směrodatná odchylka	21,0	4,1	0,6	0,1
N1	2320,5	79,00	13,30	5,10
N2	2329,4	77,10	11,50	5,50
N3	2308,5	70,00	10,30	4,70
N4	2257,8	69,00	12,30	6,10
N5	2236,2	65,00	6,60	3,20
Průměr	2290,5	72,02	10,80	4,92
Směrodatná odchylka	36,7	5,2	2,3	1,0

#### 4.5.3 Malé staré vzorky z roku 2017\_ 40 mm x 40 mm x 160 mm

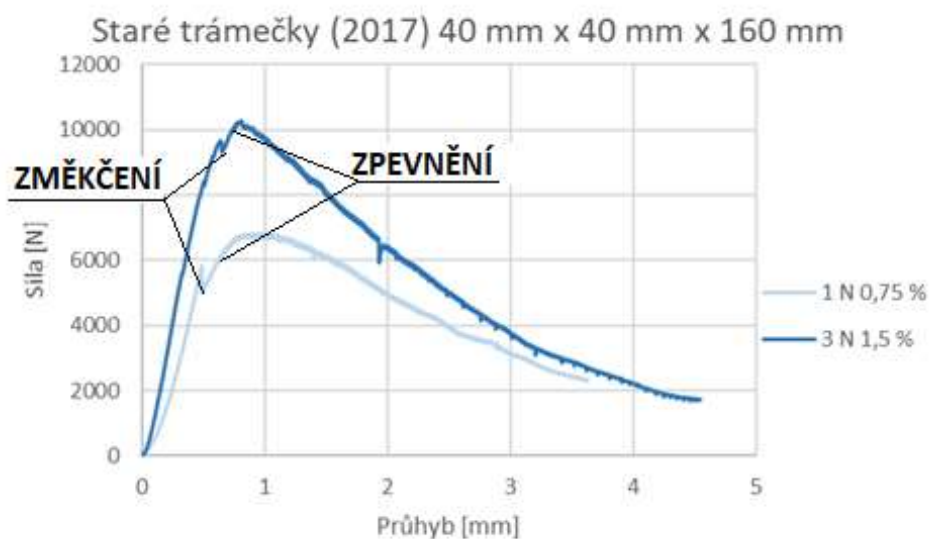
Tyto vzorky byly vyrobeny v rámci předchozí práce, na kterou tento výzkum navazuje. Vzorky byly zkoušeny po 3 letech stáří. Celkem byly zkoušeny 4 vzorky, 2 vzorky s 1,5% objemem vláken a 2 vzorky s 0,75% objemem vláken. Z každé dvojice byl vždy jeden vzorek vystaven magnetickému a poli a jeden ponechán s náhodnou orientací vláken. Úspěšná orientace vláken byla již v předchozím výzkumu dokázána měřením činitele jakosti cívky a CT-skeny. Z tohoto důvodu nebylo o úspěšné magnetické orientaci vláken pochyb a bylo jen otázkou, jaký bude mít orientace vláken dopad na mechanické vlastnosti vzorků.

Vzorky byly podrobeny tříbodové zkoušce pevnosti v tahu ohybem. Z časových důvodů zkouška pevnosti v tlaku nebyla na této sadě vzorků provedena. Z výsledků tříbodové zkoušky pevnosti v tahu ohybem byl sestaven diagram odolnosti, byla vypočtena pevnost v tahu za ohybu a faktor ohybové tuhosti **FT**.

Výrazný rozdíl mezi zorientovanými a nezorientovanými vzorky byl již dobře viditelný z diagramu odolnosti (Obr. 51). Maximální dosažená síla se pro zorientované vzorky zvýšila o 30 % vůči nezorientovaným vzorkům, a to jak pro 1,5% objemové zastoupení tak i 0,75 % objemové zastoupení.

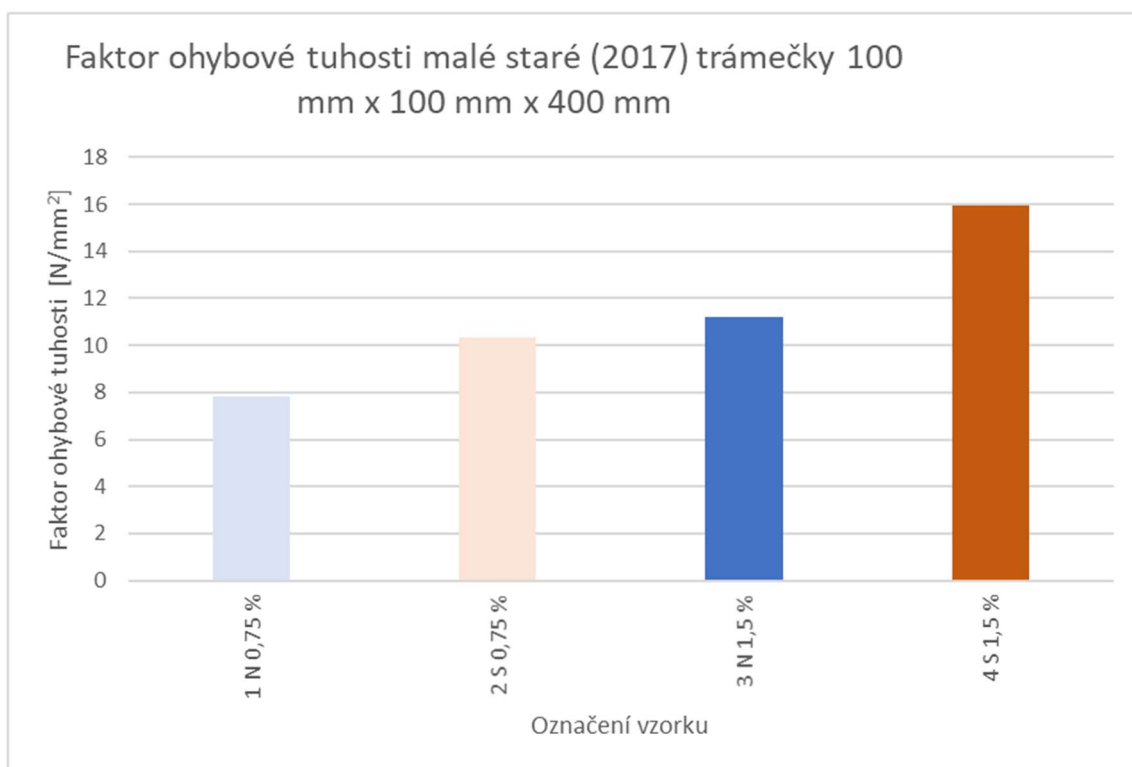


Obr. 51 Diagram odolnosti staré trámečky 40 mm x 40 mm x 160 mm, oranžové odstíny zorientované vzorky a modře nezorientované vzorky, světlé odstíny 0,75 % vláken, tmavé odstíny 1,5 % vláken



Obr. 52 Diagram odolnosti staré nezorientované trámečky 40 mm x 40 mm x 160 mm, modře nezorientované vzorky, světlé odstíny 0,75 % vláken, tmavé odstíny 1,5 % vláken

Diagramy odolnosti pro zorientované a nezorientované vzorky se lišily nejen maximální dosaženou silou, ale také tvarem křivky popisující závislost síly na průhybu. V obou případech nezorientovaných vzorků, po dosažení maximální síly, bylo pozorováno změkčení a následné zpevnění materiálu v plastickém stavu (Obr. 52). Oproti tomu u zorientovaných vzorků byla křivka diagramu odolnosti plynulá a po dosažení maximální síly docházelo k postupnému snižování síly s narůstajícím průhybem.



Obr. 53 Graficky znázorněné hodnoty faktoru ohybové tuhosti, oranžové odstíny zorientované vzorky, modré odstíny nezorientované vzorky, světlé odstíny 0,75 % vláken, tmavé odstíny 1,5 % vláken

Tabulka 4 Výsledky starých vzorků 40 mm x 40 mm x 160 mm z roku 2017

Malé staré (2017) trámečky 40 mm x 40 mm x 160 mm							
Vzorek	Objemová hmotnost	$f_{cf}$	FT	Q	Poměr $f_{cf}$	Poměr FT	Poměr Q
označení	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Mpa]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]
1 N 0,75 %	2244,6	15,50	7,80	35,21	1,322581	1,320513	0,784436
2 S 0,75 %	2305,3	20,50	10,30	27,62			
3 N 1,5 %	2307,8	23,20	11,20	18,17	1,521552	1,419643	0,734177
4 S 1,5 %	2416,9	35,30	15,90	13,34			

Pevnost v tahu za ohybu se pro zorientované vzorky zvýšila o 30 %, pro 0,75% objemového zastoupení vláken a o 50 % při 1,5% zastoupení vláken, vůči nezorientovaným vzorkům stejného objemového zastoupení vláken. Faktor ohybové tuhosti FT zvýšil svoji hodnotu oproti nezorientovaným vzorkům o stejném objemovém zastoupení vláken o 30 % pro zorientované vzorky s 0,75% zastoupením vláken a o 40 % pro zorientované vzorky s 1,5% zastoupením vláken. Činitel jakosti cívky  $Q$  se pro porovnání zorientovaných vzorků vůči nezorientovaným lišil o 30 % pro obě objemová zastoupení vláken. O 30 % se také lišily vzorky maximální dosaženou silou v tříbodové zkoušce pevnosti v tahu ohybem.

#### 4.5.4 Souhrn a zhodnocení výsledků mechanických zkoušek

Výsledky měření činitele jakosti cívky  $Q$  a mechanické zkoušky, prokázaly, že k úspěšné magnetické orientaci vláken u nově vybetonovaných vzorků nedošlo. K magnetické orientaci nedošlo pravděpodobně z důvodů slabého magnetického pole. Již při výrobě bylo sledováno, že směs vykazuje větší hustotu, než když byly vyráběny vzorky v předchozím výzkumu. V předchozím výzkumu byla směs míchána pro každý jeden vzorek zvlášť. Míchání bylo prováděno ručně, po kratší čas míchání a s lepší kontrolou obsahu záměsové vody. V této práci byla směs míchána ve větším objemu po delší čas za pomoci talířové míchačky. Směs velice rychle tuhla, což znesnadňovalo jak plnění forem, tak magnetickou orientaci vláken. I když by tomu tak být nemělo, mohla se použitá pytlovaná směs v této práci trochu lišit od směsi použité v předchozí práci. Dle zkušenosti techniků nejsou pytle stejné z důvodů nedostatečného promísení cementu s příměsemi ve výrobě.

Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku neukazoval významný rozdíl mezi vzorky vystavené MOF a vzorky nezorientovanými. Technologie MOF tedy zřejmě nemá žádný, či zanedbatelný vliv na pevnost UHPFRC v tlaku. Pravděpodobně, aby princip zvýšení pevnosti betonu v tlaku pomocí MUV fungoval, musí být voda vystavena magnetickému poli pravděpodobně před přidáním do směsi, toto tvrzení musí být experimentálně ověřeno.

U starých vzorků z roku 2017 byla zkouškou pevnosti v tahu ohybem potvrzena magnetická orientace vláken ve vzorcích. Ukázalo se, že při funkčnosti této technologie dojde k nárůstu pevnosti v tahu za ohybu a faktoru ohybové tuhosti pro stejné objemové zastoupení vláken. Je možné touto technologií efektivně zvýšit pevnost v tahu za ohybu, nebo uspořit vlákna použitá pro výrobu.

## 5 Závěr

Práce je zaměřena na magnetickou orientaci vláken v UHPFRC a navazuje na předchozí práci Studie orientace ocelových vláken v cementovém kompozitu pomocí magnetického pole [2].

V rámci rešerše byl nalezen pouze jeden nový zdroj a to práce nizozemských autorů [17]. Autoři [17] sestrojili podobné zařízení a provedli podobné experimenty jako v této práci. Avšak je tato práce diskutabilní z hlediska některých hodnot týkajících se zařízení pro magnetickou orientaci vláken.

Dle rešeršní části týkající se degradace, by technologie MOF neměla mít negativní účinky na degradaci materiálu vyrobeným pomocí technologie MOF.

Sada měření závislosti frekvence na úhlu srovnání vláken v sonogelu ukázala, že frekvence magnetického pole nemá žádný, či zanedbatelný vliv na magnetickou orientaci vlákna v sonogelu. Z důvodu podobných reologických vlastností UHPC se sonogelem by tomu tak mělo být i pro magnetickou orientaci vláken v UHPFRC.

Na základě měření frekvence a experimentů z předchozího výzkumu bylo sestrojeno zařízení č. 2 napájené střídavým proudem pro magnetickou orientaci vláken. Zařízení č. 2 je schopno magneticky orientovat vlákna ve vzorcích o průřezu 150 mm x 150 mm a neomezené délky.

Byly vyrobeny vzorky standardizovaných velikostí z UHPFRC. Celkem bylo vyrobeno 10 vzorků o velikosti 100 mm x 100 mm x 400 mm, z čehož 5 vzorků bylo vystaveno MOF pomocí zařízení č. 2. Dále bylo vyrobeno 11 vzorků o velikosti 40 mm x 40 mm x 160 mm, z čehož 5 vzorků bylo vystaveno MOF pomocí zařízení č. 1'. Již při betonáži bylo pozorováno, že směs má hustší charakter než v předchozím výzkumu. Ukázalo se, že při betonáži většího počtu vzorků je tato směs nevhodná, protože velice rychle tuhne, což znesnadňuje jak plnění forem, tak i magnetickou orientaci vláken.

Vyrobené vzorky (viz výše) byly testovány zkouškou pevnosti v tahu ohybem a pevnosti v tlaku. Velké trámečky byly vystaveny čtyřbodovému ohybu a malé trámečky třibodovému ohybu. Na malých trámečkách bylo provedeno měření orientace vláken pomocí činitele jakosti cívky Q. Měření činitele jakosti cívky Q a zkouška pevnosti v tahu ohybem potvrdila neúspěšnou magnetickou orientaci vláken ve vzorcích.

K magnetické orientaci u nově vyrobených vzorků nedošlo zřejmě z důvodu, že intenzita magnetického pole, tedy síla působící na vlákna byla menší než potřebná síla pro překonání odporu, a to zejména počáteční meze kluzu  $\tau_0$ . Směs se při plnění forem zdála být hustší, a tudíž měla zřejmě i vyšší mez kluzu  $\tau_0$ , než v předchozím výzkumu, kde k cílené magnetické orientaci vláken v UHPFRC úspěšně došlo. Odlišné reologické vlastnosti čerstvé směsi mohly být způsobeny rozdílnou suchou

směsí použitou pro výrobu vzorků, nebo časem míchání čerstvé směsi. V předchozím výzkumu byly vzorky vyráběny ručně a směs byla ručně míchána pro každý jeden vzorek zvlášť, jak z důvodů zajištění lepší kontroly objemového zastoupení složek, tak i z důvodů rychlého tuhnutí směsi.

Dále byla provedena na zlomcích vzorků zkouška pevnosti v tlaku. Technologie MOF nijak, či jen zanedbatelně ovlivnila pevnost v tlaku těles, jež byly magnetické orientaci vystaveny. Je možné, aby magnetické pole ovlivnilo tuhnutí betonu a pevnost betonu v tlaku, musí být záměsová voda vystavena magnetickému poli před přidáním do směsi.

Celkové výsledky mechanických zkoušek a měření UHPFRC nových vzorků jsou neprůkazné a je třeba experiment zopakovat s větší kontrolou výroby a možná i vhodnější směsí UHPFRC a větším počtem vzorků.

Staré vzorky z roku 2017 o rozměrech 40 mm x 40 mm x 160 mm, byly podrobeny zkoušce pevnosti v tahu ohybem. Celkem se jednalo o 4 vzorky, 2 s 1,5% zastoupením vláken a 2 s 0,75% zastoupením vláken. Vždy jeden vzorek z dvojice se stejným zastoupením vláken byl podroben magnetické orientaci vláken. Cílená orientace vláken, či neuspořádání vláken bylo na těchto vzorcích dokázáno již v předchozím výzkumu, a to metodou měření činitele jakosti cívky Q a CT-skeny. Zkouška pevnosti v tahu ohybem jen potvrdila orientaci vláken ve vzorcích, jež byly magnetickému poli vystaveny. Činitel jakosti cívky klesl o 30 % pro zorientované vzorky, o 30 % se také zvýšila maximální dosažená síla pro zorientované vzorky při zkoušce pevnosti v tahu ohybem. Pevnost v tahu za ohybu se pro zorientované vzorky zvýšila o 30 %, pro 0,75% objemového zastoupení vláken a o 50 % při 1,5% zastoupení vláken, vůči nezorientovaným vzorkům stejného objemového zastoupení vláken. Faktor ohybové tuhosti FT zvýšil svoji hodnotu oproti nezorientovaným vzorkům pro stejné objemové zastoupení vláken, a to sice o 30 % pro zorientované vzorky s 0,75% zastoupením vláken a o 40 % pro zorientované vzorky s 1,5% zastoupením vláken.

Výsledky mechanických zkoušek starých vzorků z roku 2017, u kterých byla orientace vláken potvrzena, potvrdily, že při funkčnosti této technologie dojde k nárůstu pevnosti v tahu za ohybu a faktoru ohybové tuhosti pro stejné objemové zastoupení vláken. Dle očekávání je možné touto technologií efektivně zvýšit pevnost v tahu za ohybu, nebo uspořít vlákna použita pro výrobu prvků z UHPFRC.

## 6 Návrh postupu pro další výzkum

Využití technologie MOF má vysoký potenciál. Předchozí práce zvítězila na soutěži SVOČ ve školním i mezinárodním kole. Pro další výzkum magnetické orientace vláken v cementových kompozitech bylo získáno financování od Grantové agentury České republiky. V následujících bodech je předaslán návrh autorky této práce pro další výzkum.

- Návrh speciální směsi UHPFRC pro technologii MOF. Návrh směsi by mohl být inspirován článkem autora [39], jenž ve svém článku zmiňuje takzvaný SCUHPC (self-compacting-ultra-high-performance-concrete). Dále se autor [39] zabývá vlivem objemového zastoupení jednotlivých složek SCUHPC na reologické vlastnosti čerstvé směsi.
- Vyšetření vztahu mezi potřebnou intenzitou magnetického pole a reologickými vlastnostmi směsi. Určení, pro které směsi je technologie MOF při dané intenzitě magnetického pole vhodná.
- Výroba a testování mechanickými zkouškami větší počet vzorků o různém objemovém zastoupení.
- Sestavení výpočetního modelu pro stanovení únosnosti prvků vyrobených technologií MOF. Stanovení postupu výpočtu pro ověření MSÚ a MSP prvků s orientovanými vlákny pomocí MOF.
- Posouzení ekonomického hlediska MOF. Výpočet ceny zařízení, úspory materiálu pro různé směsi a objemová zastoupení. Stanovení návratnosti investice do MOF v praxi.
- Sestavení finálního zařízení pro magnetickou orientaci vláken se schopností kontroly výroby.



## Seznam použité literatury:

- [1] V. C. Li, „Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering“, *J. Appl. Polym. Sci.*, roč. 83, č. 3, s. 660–686, 2002.
- [2] K. Takáčová, „Studie orientace vláken v cementovém kompozitu pomocí magnetického pole“, B.S. thesis, České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum., 2017.
- [3] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, a S. Amziane, „Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material“, *Constr. Build. Mater.*, roč. 24, č. 9, s. 1664–1671, 2010.
- [4] Bc. Michal Tvarog, „DIPLOMOVÁ PRÁCE Vliv orientace vláken na mechanické vlastnosti cementových kompozitů“. České vysoké učení technické, experimentální centrum. Vedoucí práce Ing. Jindřich Fornůsek, 2016.
- [5] R. Hela, Vysoké učení technické v Brně, a Ústav technologie stavebních hmot a dílců, *Problematika čerstvých samozhutnitelných betonů = Problems of fresh self-compacting concrete: teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství*. Brno: VUTIU, 2010.
- [6] „The Rheology of Fresh Cement and Concrete - A Review by PFG Banfill“. [Online]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/92854372/The-Rheology-of-Fresh-Cement-and-Concrete-A-Review-by-PFG-Banfill>. [Viděno: 11-pro-2016].
- [7] F. Mahmoodzadeh a S. E. Chidiac, „Rheological models for predicting plastic viscosity and yield stress of fresh concrete“, *Cem. Concr. Res.*, roč. 49, s. 1–9, červenec 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.03.004.
- [8] C. Hu a F. de Larrard, „The rheology of fresh high-performance concrete“, *Cem. Concr. Res.*, roč. 26, č. 2, s. 283–294, listopad 1996, doi: 10.1016/0008-8846(95)00213-8.
- [9] M. Sepehr, G. Ausias, a P. J. Carreau, „Rheological properties of short fiber filled polypropylene in transient shear flow“, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, roč. 123, č. 1, s. 19–32, 2004.
- [10] R. Lapasin, V. Longo, a S. Rajgelj, „Thixotropic behaviour of cement pastes“, *Cem. Concr. Res.*, roč. 9, č. 3, s. 309–318, květen 1979, doi: 10.1016/0008-8846(79)90123-6.
- [11] O. Švec, G. Žirgulis, J. E. Bolander, a H. Stang, „Influence of formwork surface on the orientation of steel fibres within self-compacting concrete and on the mechanical properties of cast structural elements“, *Cem. Concr. Compos.*, roč. 50, s. 60–72, 2014.
- [12] L. Martinie a N. Roussel, „Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice“, *Cem. Concr. Res.*, roč. 41, č. 10, s. 993–1000, 2011.
- [13] L. Ferrara, M. Faifer, a S. Toscani, „A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fiber reinforced cementitious composites—part 1: method calibration“, *Mater. Struct.*, roč. 45, č. 4, s. 575–589, duben 2012, doi: 10.1617/s11527-011-9793-y.
- [14] K. Tkotz, *Příručka pro elektrotechnika*. Praha: Europa-Sobotáles, 2006.
- [15] A. I. Miller a F. R. Bjorklund, „Method of reinforcing concrete with fibres“, pro. 1977.
- [16] S. Zhang, „Method and device for orienting magnetizable particles in a kneadable material“, lis. 2006.
- [17] M. J. H. Wijffels, R. J. M. Wolfs, A. S. J. Suiker, a T. A. M. Salet, „Magnetic orientation of steel fibres in self-compacting concrete beams: Effect on failure behaviour“, *Cem. Concr. Compos.*, roč. 80, s. 342–355, čer. 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.04.005.

- [18] N. Su, Y.-H. Wu, a C.-Y. Mar, „Effect of magnetic water on the engineering properties of concrete containing granulated blast-furnace slag", *Cem. Concr. Res.*, roč. 30, č. 4, s. 599–605, dub. 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00215-5.
- [19] N. Su a C.-F. Wu, „Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash", *Cem. Concr. Compos.*, roč. 25, č. 7, s. 681–688, jen 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(02)00098-7.
- [20] S. M. Ahmed, „Effect of Magnetic Water on Engineering Properties of Concrete", *ResearchGate*.
- [21] H. Afshin, M. Gholizadeh, a N. Khorshidi, „Improving Mechanical Properties of High Strength Concrete by Magnetic Water Technology", *ResearchGate*, roč. 17, č. 1, led. 2010.
- [22] B. S. K. Reddy, V. G. Ghorpade, a H. S. Rao, „Influence of Magnetic Water on Strength Properties of Concrete", *Indian J. Sci. Technol.*, roč. 7, č. 1, s. 14–18, led. 2014, doi: 10.17485/ijst/2014/v7i1/46674.
- [23] J. Piérard, B. Dooms, a N. Cauberg, „Evaluation of durability parameters of UHPC using accelerated lab tests", in *Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, Germany, 2012*, s. 371–376.
- [24] C. G. Berrocal, K. Lundgren, a I. Löfgren, „Influence of steel fibres on corrosion of reinforcement in concrete in chloride environments: a review", in *7th International Conference FIBRE CONCRETE 2013 Proceedings*, 2013.
- [25] V. Marcos-Meson, A. Michel, A. Solgaard, G. Fischer, C. Edvardsen, a T. L. Skovhus, „Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete-A literature review", *Cem. Concr. Res.*, roč. 103, s. 1–20, 2018.
- [26] S. Pondichery, „A study on the effect of magnetic field on the corrosion behavior of materials", 2015.
- [27] A. J. Davenport, Y. C. Tang, M. Gonzalez-Torreira, S. Yang, a R. Harris, „Effects of Magnetic Fields on Corrosion".
- [28] T. Z. Fahidy, „Magnetoelectrolysis", *J. Appl. Electrochem.*, roč. 13, č. 5, s. 553–563, 1983.
- [29] L. B. T. Shalash a L. S. H. Nasher, „Study the effect of magnetic field on the corrosion of steel in sodium chloride solution (NaCl)", *Misan J. Academic Stud.*, roč. 9, č. 17, s. 30–38, 2010.
- [30] M. Gholizadeh a H. Arabshahi, „The Effect of Magnetic Water on Strength Parameters of Concrete", *ResearchGate*, roč. 6, č. 1, s. 66–69, led. 2011, doi: 10.3923/rjasci.2011.66.69.
- [31] Ing. Jaroslav Blažík a Ing. Václav Mergl, CSc., „Magnetická úprava vody". Vodárenská akciová společnost, a.s.Brno.
- [32] Karel Kolář doc. Ing., CSc., Praha 6, CZ, Zdeňka Bažantová Ing. arch., CSc., Praha 4, CZ, a Petr Konvalinka prof. Ing., CSc., Praha 10, CZ, „Užitný vzor: Suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu". České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha 6, CZ, 01-zář-2015.
- [33] N. Roussel, „A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications", *Cem. Concr. Res.*, roč. 36, č. 10, s. 1797–1806, jen 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.05.025.
- [34] „ČSN EN 12390-5 (731302) Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles". .
- [35] J. S. of C. Engineers, „JSCE-SF4: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete", *Concr. Libr. JSCE Part III-2 Method Tests Steel Fiber Reinf. Concr.*, č. 3, 1984.

- [36] N. Banthia a J.-F. Trottier, „Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete: Some concerns and a proposition“, *Mater. J.*, roč. 92, č. 1, s. 48–57, 1995.
- [37] „ČSN EN 12390-3 (731302) Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles“.
- [38] „ČSN EN 12390-4 (73 1302) Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 4: Pevnost v tlaku – Požadavky na zkušební lisy“.
- [39] R. Deeb a B. L. Karihaloo, „Mix proportioning of self-compacting normal and high-strength concretes“, *Mag. Concr. Res.*, roč. 65, č. 9, s. 546–556, 2013.