



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

## NÁVRH NDT METODY PRO HODNOCENÍ DRÁTKOBETONU

DESIGN OF NON-DESTRUCTIVE METHOD OF TESTING OF HOMOGENITY OF STEEL FIBRES  
REINFORCED CONCRETE

### TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Tereza Komárková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Anton, Ph.D.

BRNO 2019

## **Abstrakt**

Dizertační práce se zabývá návrhem nedestruktivní metody testování (NDT) určené pro hodnocení rovnoměrnosti rozložení a stanovení koncentrace ocelových drátků v drátkobetonu. V současné době na poli diagnostiky stavebních konstrukcí není dostupná žádná nedestruktivní metoda umožňující hodnotit koncentraci a současně homogenitu drátkobetonu. Ústav stavebního zkušebnictví (SZK FAST VUT v Brně) disponuje několika diagnostickými přístroji, avšak jejich využitelnost pro hodnocení vybraných parametrů drátkobetonu nebyla během dosavadní výzkumné činnosti prokázána jako vhodná pro NDT požadované parametry. Tyto poznatky vedly k výzkumu a návrhu nové NDT a metody dále realizované do nového měřicího přístroje. Ten vznikl ve spolupráci s Ústavem teoretické a experimentální elektrotechniky fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií (UTEE FEKT VUT v Brně). Byla popsána a testována, na experimentech ověřena metodika hodnocení vybraných parametrů kompozitních vzorků betonu. Navržená NDT metoda byla experimentálně testována a ověřována jak v laboratorních podmínkách, tak podmínkách blízcích se průmyslovému nasazení, byla vyhodnocena její využitelnost pro hodnocení drátkobetonu ve stavební praxi.

## **Abstrakt**

The doctoral thesis deals with the design of non-destructive testing method (NDT) designed for evaluation of the distribution uniformity and determination of steel fibers concentration in steel fiber reinforced concrete (SFRC). At present, there is no non-destructive method available in the field of diagnostic of building construction that allows to evaluate the concentration and homogeneity of SFRC. The Institute of Building Testing (SZK FAST VUT in Brno) has several diagnostic devices, but their applicability for evaluation of selected parameters of SFRC has not been proven to be suitable for NDT parameters. These findings led to the research and design of the new NDT and the methods further implemented in the new measuring instrument. It was created in cooperation with the Institute of Theoretical and Experimental Electrical Engineering of the Faculty of Electrical Engineering and Communication (UTEE FEET BUT). The methodology of evaluation of selected parameters of composite concrete samples was tested and tested on experiments. The proposed NDT method was experimentally tested and verified in both laboratory conditions and conditions close to industrial use. Its applicability for evaluation of reinforced concrete in building practice was evaluated.

## **Klíčová slova**

Nedestruktivní testování stavebních materiálů (NDT), drátkobeton, koncentrace ocelových drátků, homogenita drátkobetonu, radiační metody, elektromagnetické metody, elektromagnetická cívka, elektrická impedance.

## **Key words**

Non-destructive testing of construction materials (NDT), steel fibre reinforced concrete (SFRC), concentration of fibres in SFRC, homogeneity of SFRC, radiography, electromagnetic methods, electromagnetic coil, electric impedance.

## **OBSAH**

1 ÚVOD .....	4
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ.....	4
3 CÍLE PRÁCE.....	6
4 NÁVRH METODIKY A KOCEPTU MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ .....	6
4.1 NDT metodika hodnocení drátkobetonu .....	9
4.2 Kalibrace navrženého zařízení.....	10
5 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VYUŽITELNOSTI NAVRŽENÉ NDT METODY.....	13
5.1 Testování dosahu elektromagnetické cívky .....	13
5.2 Testování navržené metodiky na drátkobetonových zkušebních tělesech ....	15
5.3 Validace dosažených výsledků.....	19
6 DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	21
7 ZÁVĚR.....	26
LITERATURA .....	27

## 1 ÚVOD

Kompozitní materiály obecně jsou materiály vyžadující odpovědný přístup jak z pohledu návrhu, tak i jejich výroby a zkoušení. Vlastnosti výsledného kompozitu jsou dány nejen vlastnostmi jednotlivých komponentů, ale i vzájemným poměrem jejich dávkování. Drátkobeton vzniklé přidáním ocelových vláken do čerstvého betonu nejsou stavební praxí dnešní doby neznámé. Jelikož drátkobetonové konstrukce mají u nás poměrně velké zastoupení, vyvstal v posledních několika letech požadavek stavební praxe na možnosti provádění diagnostiky, a to především pomocí nedestruktivních metod zkoušení (dále jen NDT). Na základě těchto požadavků byla část výzkumné činnosti Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně zaměřena na možnosti provádění diagnostiky drátkobetonu.

Autorka práce se během svého působení na Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT specializovala na NDT testování drátkobetonu a byla řešitelkou či spoluřešitelkou projektů zaměřených na tuto problematiku. Předmětem dizertační práce jsou experimentálně navržený měřicí přístroj určený pro nedestruktivní testování drátkobetonu a navržená metodika hodnocení homogenity a stanovení koncentrace ocelových drátků v drátkobetonu. Součástí je také ověření využitelnosti nové NDT metody ve stavební praxi. Zjišťovanými parametry jsou koncentrace a rovnoměrnost rozložení ocelových drátků v daném objemu, jelikož na těchto parametrech závisí výsledné mechanické vlastnosti drátkobetonu.

## 2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Současný obor NDT je charakteristický nejen nutností rozsáhlých znalostí vlastností materiálů a užívaných technologií 21. století, ale i širokým využitím možností elektroniky a moderní výpočetní techniky, fyziky a metrologie. Výsledky nejnovějších výzkumů vykazují pokrok ve všech technických vědních oborech. Pro hodnocení zkoušeného materiálu či stavebního prvku jsou zapotřebí nejen dostatečné znalosti o hodnoceném materiálu a zkušenosti s měřicími přístroji, ale také správná interpretace naměřených výsledků.

V odborných publikacích je metoda nedestruktivního zkoušení zmiňována dlouhodobě, například pro testování materiálů, které byly posuzovány zpočátku pouze na základě vizuálního hodnocení a dlouholetých zkušeností experta [1]. Nedestruktivní metody zkoušení mají několik výhod, k nimž patří především jejich povaha nedestruktivnosti, opakovatelnosti zkoušek a v neposlední řadě i ekonomické hledisko. Zároveň je potřeba nezapomínat, že se jedná o metody nepřímé. Hodnocené parametry jsou určeny pomocí kalibračních křivek či výpočtů [2]. Stále častěji jsou objednateli stavebně technických průzkumů kladeny dotazy na možnosti provádění kontroly kvality drátkobetonových konstrukcí. Upřednostňovány jsou NDT metody, z důvodu nedestruktivnosti jejich podstaty. V návaznosti na tyto požadavky byla část výzkumné práce na SZK FAST VUT v Brně zaměřena na možnosti využitelnosti dostupných NDT přístrojů při diagnostice drátkobetonu či vývoji metod nových [3-8].

Drátkobeton je název pro vláknobeton, u kterého jsou použita při výrobě ocelová vlákna - drátky. Toto označení je třeba chápat jako úzus. Jednodušší název přispívá k jeho popularizaci a rozšíření použití. Charakteristiky drátkobetonu většinou předčí charakteristiky vláknobetonů s nekovovými vlákny a mohou být proto navrhovány i pro nosné prvky konstrukcí. Výroba drátkobetonů se však donedávna neřídila žádnými pravidly a společnými normami. Mezi hlavní kritéria při výrobě drátkobetonu patřilo především ekonomické hledisko. To mělo za následek nejen nejednotnost v technologii výroby, neexistovala pravidla pro návrh a výrobu drátkobetonových prvků a konstrukcí. Tato situace vedla v roce 2010 k ustanovení subkomise SK 10 Vláknobeton při TNK 36 Beton, která pracovala při Úřadu pro normalizaci a metrologii v České republice. Jejím cílem bylo sjednocení dostupných technických norem a technických předpisů pro zkoušení vláknobetonu obecně, zejména z hlediska jeho charakteristik nutných pro navrhování. Výsledky jednání subkomise vedla k zavedení tří nových technických přednorem pro vláknobeton z roku 2015:

- ČSN P 73 2450 – Vláknobeton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda [9]
- ČSN P 73 2451 – Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu [10]
- ČSN P 73 2452 – Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu [11].

Normy obsahují požadavky na vlastnosti, tedy na požadavky na vláknobeton jako výrobek a na prokazování shody. Definují specifika zkoušení čerstvého a ztvrdlého vláknobetonu. Tyto nové normy mají obecný charakter. Zásady v nich uvedené mají platnost pro všechny typy a druhy v současnosti vyráběných vláknobetonů.

Obecně není možné držet krok v celé oblasti vývoje diagnostických metod a měřicích přístrojů s novými technologickými postupy modifikovaných či nových stavebních materiálů. Ale v jedné oblasti, úzce specifické, lze sledovat a navrhnout NDT metody, které jsou na vysoké světové úrovni, to je případ drátkobetonu. Jeho pole aplikací ve stavební praxi je čím dál tím více rozšiřováno, ale vývoj v oblasti diagnostiky drátkobetonových konstrukcí velmi dlouho stagnoval. Mezi NDT metody používané pro hodnocení homogenity drátkobetonu patří metody radiační a elektromagnetické. Obě vycházejí ze základního předpokladu rozdílnosti fyzikálních (elektromagnetických) vlastností cementové matrice a jedné z přidaných složek kompozitu – ocelových vláken. Všechny tyto metody však s sebou nesou poměrně velká omezení, ať už se jedná o časovou náročnost měření, relevanci získaných informací o testovaném materiálu či v neposlední řadě ekonomické hledisko aplikované metody testování. Problematika kontroly rovnoměrnosti rozložení a koncentrace ocelových drátků v drátkobetonu se v posledních letech stala velmi aktuálním tématem a věnuje se jí řada zahraničních i tuzemských pracovišť [12-19]. Dosavadní poznatky vedly k modernizaci či vývoji nových měřicích zařízení, které pracují na elektromagnetickém principu. Jsou založeny na vyhodnocení fyzikálních/elektromagnetických parametrů pole [20, 21]. V současnosti je tedy upřednostňována normativní destruktivní metoda pro hodnocení kontroly kvality drátkobetonových prvků za pomoci odběru jádrových vývrtů [22]. Tyto poznatky vedly k závěru, že využitelnost měřicího přístroje či zařízení, metody pracujících na nedestruktivním principu určeného pro určení koncentrace a homogenity drátkobetonu, by byla velká a v současné době velmi žádaná [23].

### 3 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem dizertační práce je návrh metodiky hodnocení koncentrace, rozložení a orientace ocelových drátků v kompozitním materiálu jako je např. drátkobeton nedestruktivní metodou (NDT). Koncept práce je dále členěn do několika dílčích cílů:

1. Návrh zjišťování koncentrace a orientace ocelových drátků v drátkobetonu
  - Nalezení a popsání podstaty návrhu NDT na základě vlastností elektrické a elektromagnetické vodivosti přidávané složky (drátků) do prostého betonu
  - Návrh elektromagnetického obvodu, jha a elektrické cívky, nalezení elektrického schéma a způsobu zapojení náhradního modelu do elektrického obvodu modelu za účelem vzniku silné magnetické vazby s testovaným materiálem.
2. Koncept měřicího zařízení
  - Návrh a zhotovení měřicího zařízení,
  - odvození frekvence rezonančního stavu NDT metody v závislosti na požadovaném dosahu elektromagnetického pole v testovaném vzorku kompozitního materiálu.
3. Návrh metodiky hodnocení koncentrace a rozložení ocelových drátků v drátkobetonu.
  - Nalezení a ověření dosahu elektromagnetického pole navrženého přístroje v závislosti na volené frekvenci rezonance na speciálních zkušebních tělesech,
  - kalibrace přístroje a popis metodiky vyhodnocení posuzovaných parametrů, její ověření.
4. Testování metodiky hodnocení na drátkobetonových zkušebních tělesech.
  - Provedení ověření funkčnosti měřicího zařízení na drátkobetonových tělesech,
  - validace dosažených výsledků pomocí běžně užívaných diagnostických metod, popis navrženého NDT měření a vyhodnocení.

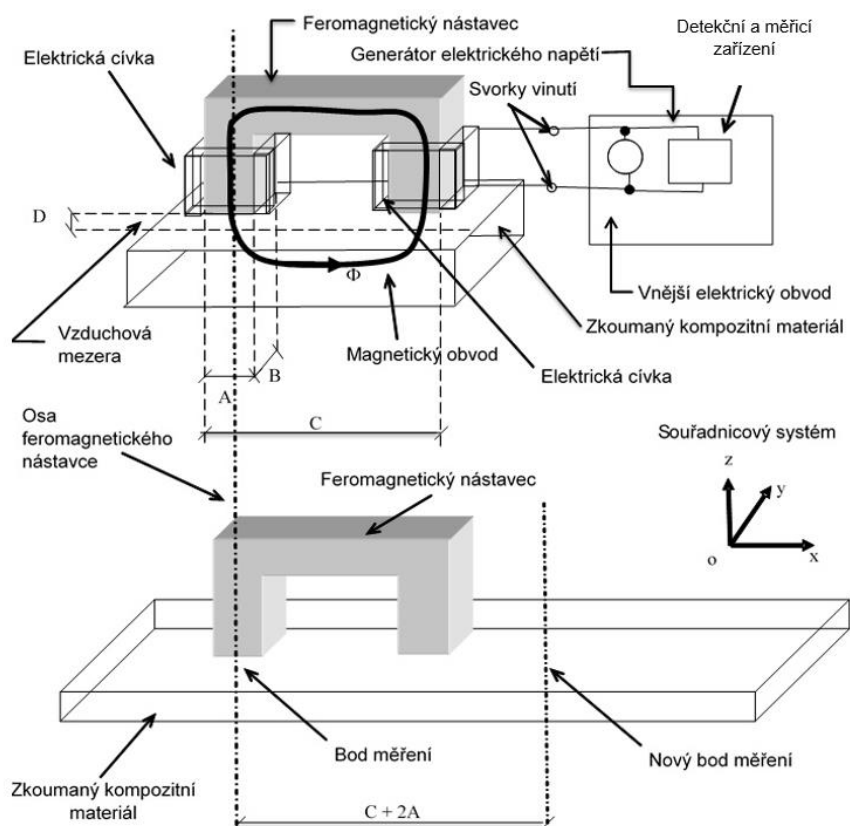
Cílem experimentů popisovaných v dizertační práci je prokázání využitelnosti navrženého měřicího zařízení při diagnostice drátkobetonových konstrukcí a postupné zavedení této NDT metody mimo laboratorní prostředí do stavební praxe.

### 4 NÁVRH METODIKY A KOCEPTU MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

Výsledky prvotních výzkumných prací [20, 24, 25] dále provedených a rozpracovaných v rámci předložené dizertační práce vedly k navázání výzkumné spolupráce s ústavem UTEE na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Během té bylo navrženo několik experimentů pro vyhodnocení způsobu a metody NDT testování kompozitních materiálů s ocelovými vlákny [26] založené na vyhodnocení parametrů elektromagnetického pole blízkého okolí snímacího prvku. Metoda NDT je založena na vyhodnocení elektromagnetických poměrů ve sledovaném vzorku a spočívá ve vyhodnocení velmi citlivých změn impedance  $Z$  konfigurace magnetického obvodu a testovaného prostoru vzorku, Obr. 4.1, v závislosti na parametrech sledované složky kompozitního materiálu. Citlivost změn impedance  $Z$  je dosažena vhodným nastavením frekvence budicího obvodu  $f$  detekčního a měřicího zařízení (měřiče impedance) a to tak, aby se malá změna parametrů testovaného vzorku projevila výrazně na změně komplexní impedance  $Z$  (modulu, fáze), a to ve více hodnotách v intervalu od  $f_d$  do  $f_r$ . Uspořádání snímacího prvku a testovaného vzorku lze schematicky zobrazit pomocí soustředěných parametrů s vazbami navržené metody NDT vzorku kompozitního materiálu [26].

V procesu ověření navržené metodiky a metody testování je jako součást výzkumu předkládán návrh a výroba speciálních zkušebních těles z epoxidové pryskyřice určených pro ověření a kalibraci měřící metody, ověření a vymezení nejvhodnějšího nastavení navrženého postupu a přístroje, s cílem stanovení opakovatelnosti, spolehlivosti a přesnosti vyhodnocení parametrů testovaného/kalibračního kompozitu s ocelovými vlákny.

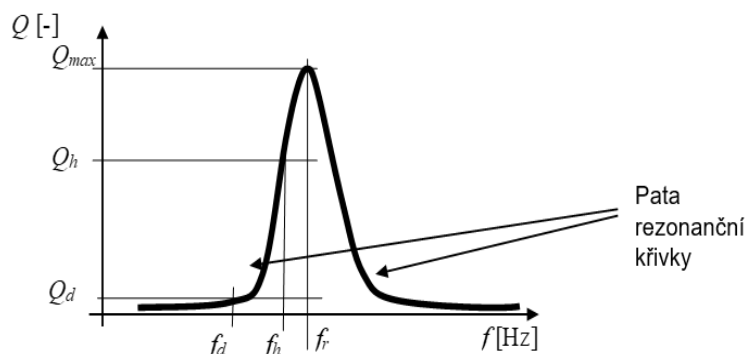
Pro zařízení k provádění vyhodnocení elektromagnetických vlastností feromagnetických elektricky vodivých částí kompozitního materiálu byla navržena základní konstrukce feromagnetického nástavce s elektrickým vinutím tvaru písmene C, které je provedeno jako částečně rozložené nebo plně rovnoměrné elektrické vinutí elektrické cívky. Toto zařízení slouží k vyhodnocení elektrické impedance  $Z$ . Elektrické vinutí je rozděleno na ramena feromagnetického nástavce, aby docházelo k silné magnetické vazbě nástavce s testovaným kompozitním vzorkem materiálu, který je složen z plniva (ocelová vlákna) a pojiva. Detekční zařízení k provádění NDT je při prvních laboratorních testech připojeno k elektrickému obvodu navrženému tak, aby jeho rezonanční frekvence  $f_r$  ve volném prostoru ležela v intervalu frekvencí  $f_{\text{test}} = 10 \text{ MHz}$  do  $2 \text{ GHz}$ .



Obr. 4.1 Schéma měřícího zařízení – vzájemné uspořádání feromagnetického nástavce a elektrické cívky vzhledem ke zkoušenému materiálu [26]

Ke vzorku kompozitního materiálu je přikládán feromagnetický nástavec s elektrickým vinutím budící elektrické cívky napájené okamžitou hodnotou proudu  $i(t)$  a je detekováno elektrické napětí  $u(t)$ . Měřič impedance realizovaný ve vnějším elektrickém obvodu vyhodnocuje komplexní veličinu impedance  $\hat{Z}$  a její změny jak ve složkovém tvaru ( $Z_{\text{Re}}, Z_{\text{Im}}$ ),

tak exponenciálním tvaru ( $Z_{\text{mod}}$ ,  $Z_{\varphi}$ ). Frekvence budicího obvodu  $f$  detekčního a měřicího zařízení (měřiče impedance) je nastavena tak, že se nachází na patě rezonanční křivky, viz Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Rezonanční křivka průběhu koeficientu kvality [26]

Po provedených laboratorních testech a hledání vhodných frekvencí v laboratorních podmínkách byl navržen a realizován měřicí systém, který je koncipován jako dálkově řízené zařízení-voztítko s ručním ovládáním. Dálkové řízení je možné pomocí tabletu. Měřicí cívka je zabudována ve středu mechanické konstrukce a lze s ní otáčet kolem své vlastní osy pomocí velkého ovládacího prvku na horní stěně přístroje. Celý systém je zobrazen na Obr. 4.3 [27-29].



Obr. 4.3 Měřicí vozítko – celkový náhled, upevnění elektromagnetické cívky, ovládací panel [28]

Používání měřicího zařízení spočívá v několika krocích. Po zapnutí přístroje je nezbytné nastavit vhodný kmitočet  $f$  pro měřicí cívku. Výchozí pozice pro měření impedance  $Z$  je při nastavení měřicí cívky na polohu s úhlem  $0^\circ$ . Na impedance-metru je zobrazována



aktuální hodnota impedance  $Z$ , která je manuálně ukládána po jednotlivých krocích – otáčení elektromagnetické cívky ve zvoleném intervalu dokud není provedeno poslední měření v daném bodu testovaného vzorku. Cívka je tedy vždy vrácena do své původní polohy, její poloha pro první a poslední měření je totožná. Do své původní polohy, její poloha pro první a poslední měření je totožná.

#### 4.1 NDT METODIKA HODNOCENÍ DRÁTKOBETONU

Po uložení přístroje na zkušební těleso je nastavena zvolená frekvence rezonance a kapacita elektrického obvodu. Na řídicí jednotce je nastaveno pořadí měření, po té cívka je otáčena kolem své vlastní osy a vždy po ustálení je manuálně uložena hodnota modulu  $dP$  a úhlu impedance  $Z_\varphi$  a zároveň odečtena hodnota výkonu  $dP$ . Pro jeden měřený bod na zkušebním tělese je odečteno 33 kombinací sledovaných hodnot popisující elektromagnetické pole. Otáčením elektromagnetické cívky kolem své vlastní osy je dosažena korekce chyby měření – pro každou polohu cívky jsou sledované hodnoty odečítány dvakrát, oproti původnímu předpokladu otáčení cívky kolem osy jednoho ze dvou ramen nástavce za účelem proměření větší plochy, respektive objemu zkušebního tělesa, ve kterém vzniká odezva elektromagnetické pole. Po uložení naměřených hodnot je cívka přemístěna na další bod měření. Z korekcí upravených hodnot modulu impedance  $Z_m$  a úhlu impedance  $Z_\varphi$  testovaného tělesa, určených z rovnic

$$Z_m = \frac{Z_i + Z_{i+16}}{2}, \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{\varphi_i + \varphi_{i+16}}{2}, \quad (2)$$

kde  $i$  nabývá hodnot 1–17 je stanovena komplexní impedance  $Z$ . Stejnou korekcí jsou upraveny naměřené hodnoty napětí  $U$

$$U = \frac{U_i + U_{i+16}}{2}, \quad (3)$$

Ze zvolené frekvence a kapacity elektrického obvodu je určena hodnota modulu impedance kondenzátoru  $Z_c$  určena dle:

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C}, \quad (4)$$

kde  $C$  je kapacita kondenzátoru a  $\omega$  úhlová frekvence. Z rozdílu hodnot

$$Z_L = Z - Z_c \quad (5)$$

je určena impedance indukce a následně stanovena její reálná hodnota. Ze vztahu:

$$P = \mathbf{Re} \left\{ \frac{U^2}{Z_L} \right\} \quad (6)$$

je určen ztrátový výkon měřeného kompozitu včetně přidaných ocelových vláken. Z těchto hodnot je závěrem určen koeficient vazby  $k_v$  sledované složky kompozitu

$$k_v = \frac{4\pi(dP - dP_{fant})}{U^2}, \quad (7)$$

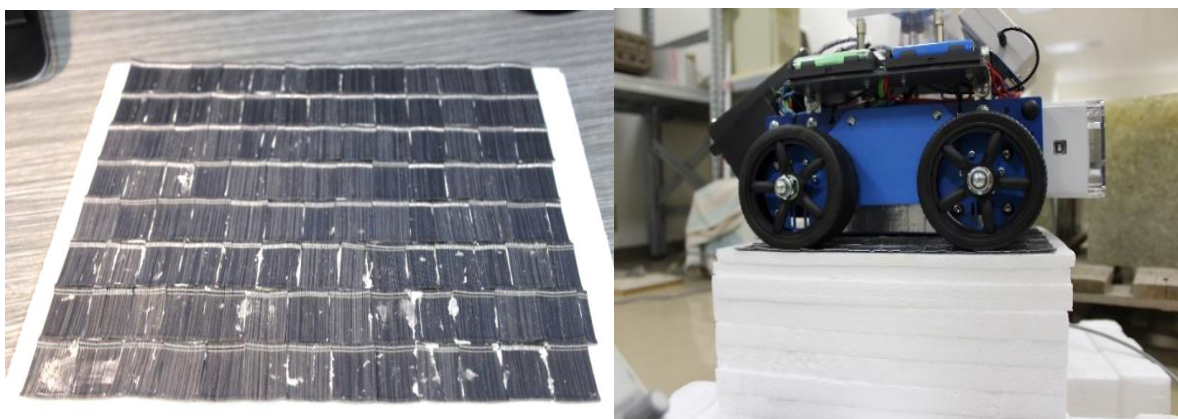
kde  $dP$  je střední hodnota ztrátového výkonu kompozitu s ocelovými vlákny a  $dP_{fant}$  střední hodnota ztrátového výkonu kompozitu bez ocelových vláken. Ze znalosti hustoty

oceli  $\rho_{Fe}$ , ze kterých jsou sledovaná drátky vyrobená je určena jejich koncentrace  $\rho_{sam}$  ve sledovaném objemu v  $\text{kg/m}^3$ :

$$\rho_{sam} = \rho_{Fe} * k_v. \quad (8)$$

## 4.2 KALIBRACE NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ

Při testování nového zařízení bylo z počátku snahou prokázat dosah vytvářeného elektromagnetického pole zapojením elektromagnetické cívky do elektrického obvodu a tím prokázat správnost nastavení měřicí sestavy. Bylo voleno 5 rezonančních frekvencí –  $f_{r1} = 328,6 \text{ kHz}$ ,  $f_{r2} = 146,0 \text{ kHz}$ ,  $f_{r3} = 50,12 \text{ kHz}$ ,  $f_{r4} = 21,90 \text{ kHz}$ ,  $f_{r5} = 3,450 \text{ kHz}$  za předpokladu očekávané odlišené citlivosti měření a hlavně rozdílů v parametru maximální hloubky dosahu elektromagnetického pole pod povrch vzorku. Pro všech 5 variant nastavení měřicího přístroje byl testován dosah pomocí elektromagneticky nevodivého materiálu – polystyrenových desek tloušťky 1 cm Obr. 4.4.

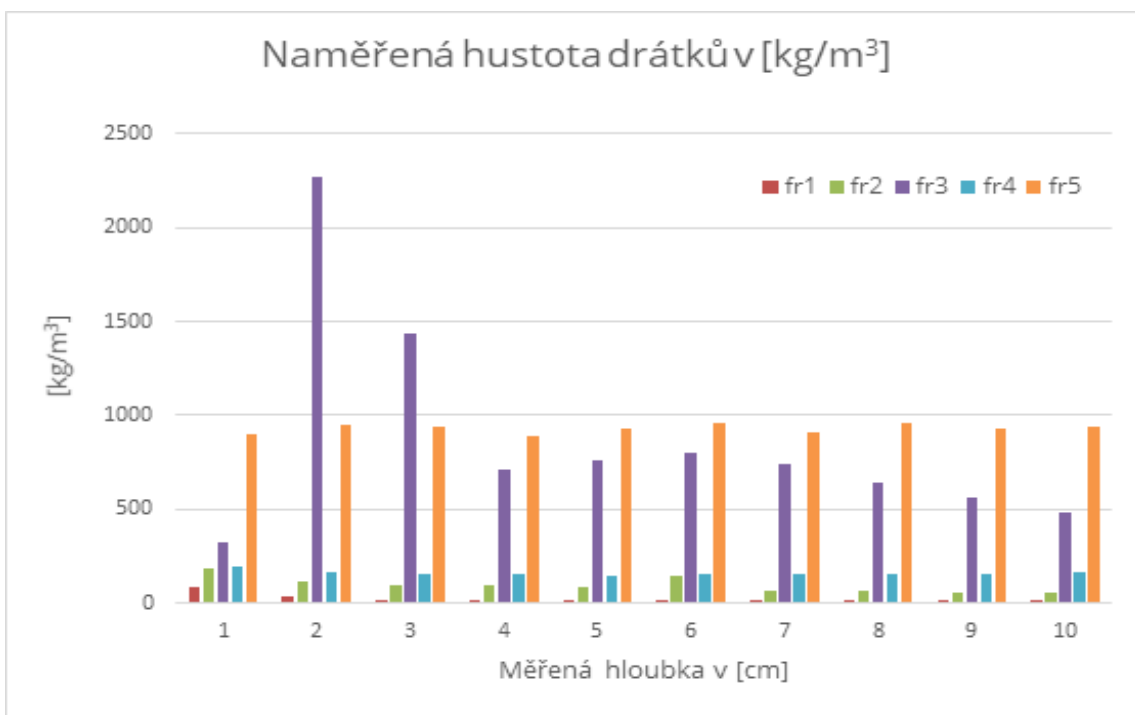


*Obr. 4.4 Polystyrenová deska s upevněnými ocelovými vlákny (fantomový vzorek pro test dosahu nastavení metody) - vlevo*

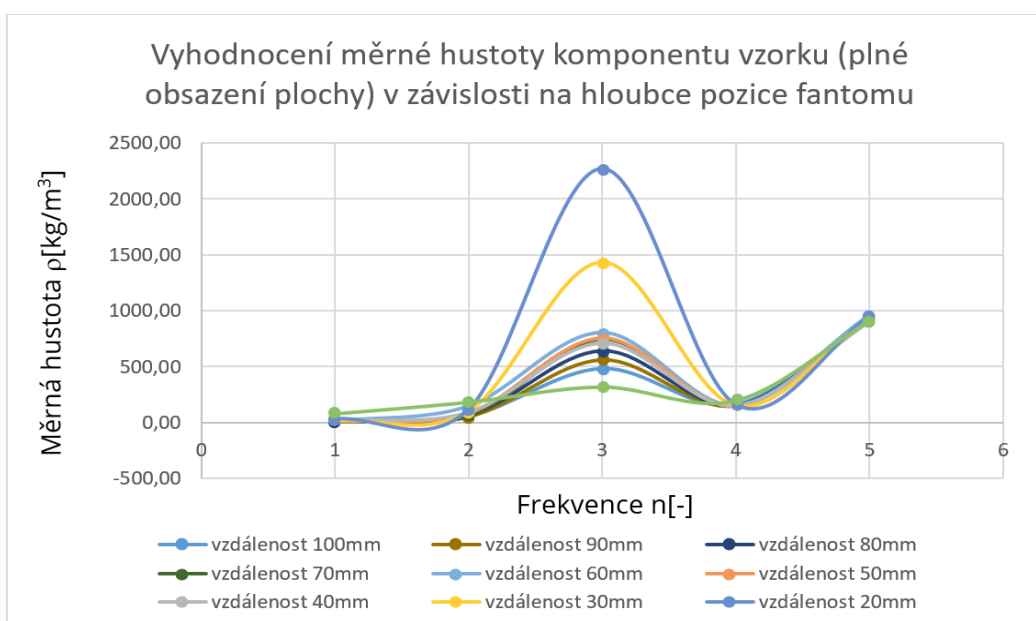
*Testování dosahu elektromagnetické cívky pro různá nastavení pomocí polystyrenových desek - vpravo*

Sledovanými parametry byly změny v hodnotách měřených parametrů popisující elektromagnetické pole. Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány.

Ze souhrnného grafického vyhodnocení na Obr. 4.5, je zřejmé, že pro jednotlivé volené frekvence rezonance se mění parametry vznikajícího výsledného elektromagnetického pole a je potřeba brát zřetel na samotné nastavení navrženého měřicího zařízení a také vhodně interpretovat výsledky měření.



Obr. 4.5 Grafické vyhodnocení výpočtových hodnot koncentrací pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky

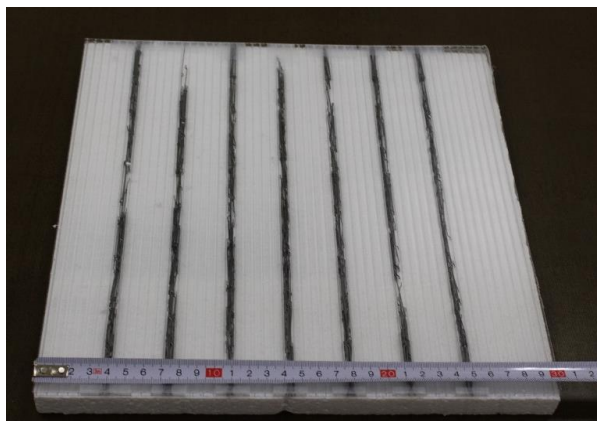


Obr. 4.6 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot hustoty komponentu  $\rho$  v závislosti na frekvencích  $f_n = f_{r1} - f_{r5}$  a vzdálenosti uložení fantomového vzorku (plně obsazení) s ocelovými drátky (Obr.F-9-1)

Pro plné obsazení fantomové struktury (Obr. 4.4) je měrná hustota  $\rho_{fa10} = 7130\text{kg/m}^3$ . Z vyhodnocení, uvedeném na Obr. 4.6 s přihlédnutím k teoretickému vyjádření vyhodnocované impedance  $Z$ , relace, výkonu  $P$  relace se jeví jako nejméně citlivou frekvenci na nelinearitu závislosti impedance na hustotě drátků ve vzorku  $f_r = 3,450\text{ kHz}$ . Pro tuto frekvenci se jeví první nastavení nekorigovaného vyhodnocení hustoty drátků jako nejméně citlivé a necitlivé k hloubce změn koncentrace.

Ostatní frekvence  $f_{r1} - f_{r4}$  jsou vhodné pro měření a vyhodnocení hustoty koncentrace a orientace drátků, ale je nutné provést určení nelineárního koeficientu korekce měřené veličiny  $Z$  a výsledné hustoty  $\rho$  koncentrace materiálu složky kompozitního vzorku.

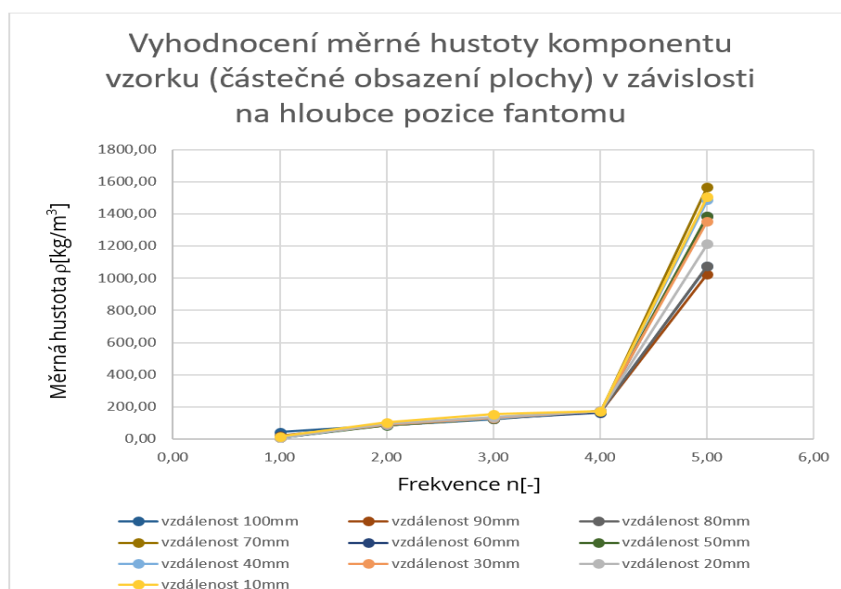
Dalším zkoumaným parametrem při laboratorním testování bylo nalezení vlivu převážného směru ocelových vláken v testovaném vzorku na měřené a vyhodnocované impedance  $Z$ . Proto byl vytvořen zkušební vzorek z polykarbonátu tloušťky 0,5 cm, ve kterém byly umístěny ocelové drátky v konstantních vzdálenostech a stejném počtu (100ks), viz Obr. 4.7. Stejně jako u předchozího měření byl polykarbonát s ocelovými vlákny vkládán mezi polystyrenové desky vždy ve vzdálenostech po 1 cm od povrchu, ke kterému byla přikládána elektromagnetická cívka. Měření byla provedena pro všech 5 frekvencí rezonance.



*Obr. 4.7 Testovací materiál testu směrovosti uspořádání složky kompozitního vzorku – polykarbonát směrové uspořádání drátků 100 ks drátků s hustotou na ploše 1/7*

Z dílčích výsledků měření při testování polykarbonového vzorku je možné konstatovat, že se snižující hodnotou frekvence nastavení se snižuje citlivost měření této metodiky a zvyšuje dosah, stejně jako tomu bylo prokázáno u testování dosahu elektromagnetického pole pomocí polystyrenových desek Obr. 4.8.

Elektromagnetické pole vznikající při přiložení cívky k povrchu zkušebního tělesa a interakcí s tímto prostředím je ovlivněno shlukem jednotlivých vláken do větších subjektů v kombinaci jejich převážného směru. Navržený testovací vzorek z polykarbonátu není vhodný pro prokázání a kalibraci vlivu převážného směru ocelových vláken, jelikož malá vzdálenost mezi vlákny nebyla vhodně zvolena. Pro částečné obsazení fantomové struktury (Obr. 4.7) je měrná hustota  $\rho_{fa2} = 1120\text{kg/m}^3$ .



Obr. 4.8 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot hustoty komponentu  $\rho$  v závislosti na frekvencích  $f_n = f_{r1} - f_{r5}$  a vzdálenosti uložení fantomového vzorku (polykarbonát) s ocelovými drátky (Obr. 4.7)

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VYUŽITELNOSTI NAVRŽENÉ NDT METODY

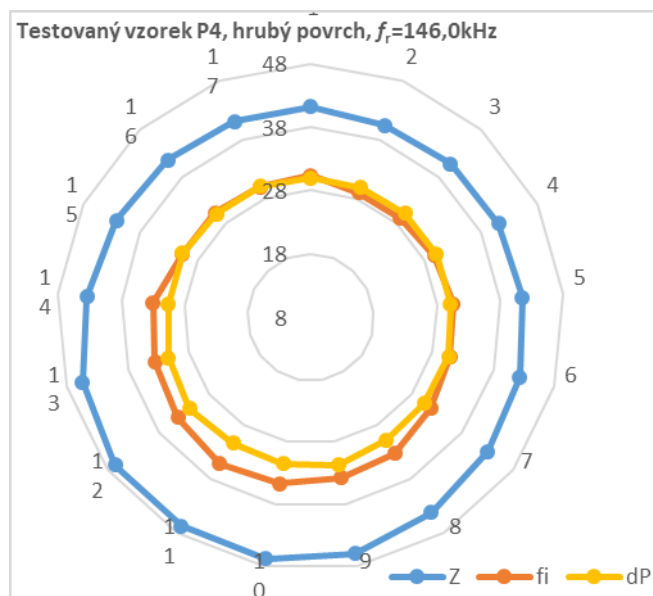
### 5.1 Testování dosahu elektromagnetické cívky

Jedním z dílčích výzkumů provedených v rámci dizertační práce bylo ověření využitelnosti navrženého měřicího zařízení [31] na speciálně vyrobených zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice. Nesmírnou výhodou těchto těles při provádění laboratorních zkoušek je právě transparentní charakter složky plniva vzorku. I když při jejich výrobě bylo snahou docílit co největší rovnoměrnosti rozložení ocelových vláken a jejich výrobu přiblížit výrobě drátkobetonových vzorků, není možné tuto rovnoměrnost vždy zaručit. Míru rovnoměrnosti rozložení vláken je právě u těchto těles možné vizuálně posoudit bez nutnosti provádění dalších testů pomocí různých diagnostických přístrojů a zařízení. Součástí celé sady zkušebních těles z epoxidové pryskyřice byl i tzv. referenční vzorek, který neobsahoval žádná ocelová vlákna.

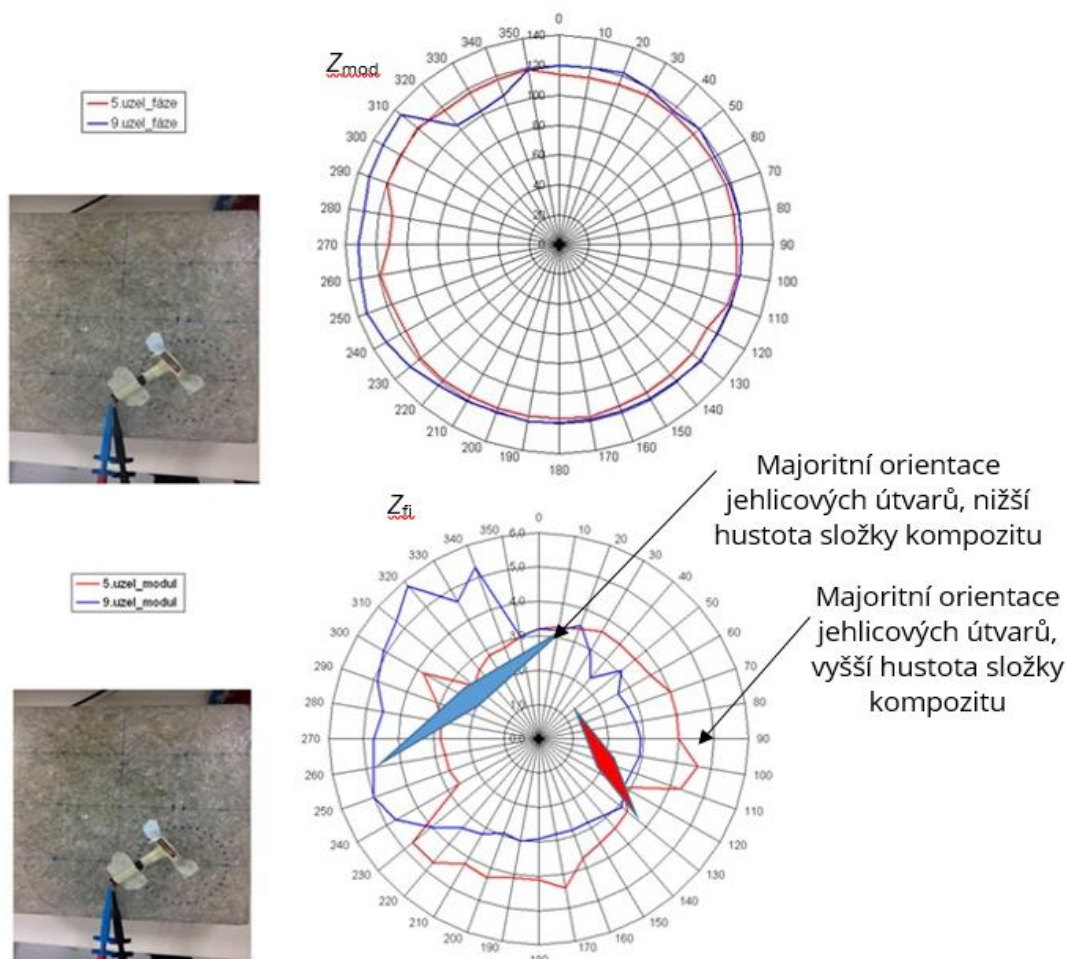
Výsledky testů provedených na zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice měřením v laboratoři lze zobecnit do dílčích závěrů takto:

1. Je vhodné vždy analýzy zohlednit/vztáhnout k referenčnímu vzorku, tedy vzorku s vyloučenou složkou kompozitu, jak bylo výše ukázáno, charakterizováno jako parameter  $dP_{fant}$ .
2. Nehomogenity rozložení sledované složky kompozitu lze hodnotit ze složek modulu impedance  $Z$ , fáze  $\varphi$  a ztrátového výkonu  $dP$  v grafické interpretaci radiálního zobrazení veličin.

3. Při analýzách, ve kterých jsou vlastnosti testovaného vzorku posuzovány s rozdílnou hloubkou pod povrchem, a při vyhodnocení je nutné zohlednit parametry elektromagnetického pole. Jak bylo výše popsáno, při nekvalitní úpravě povrchu vzorku (s vysokou mírou nerovnosti) pro analýzu do 10 mm, je patrný velký rozdíl vyhodnocených hustot sledované složky kompozitu, jak je patrné při srovnání parametrů a grafů činných ztrát  $dP_{co} = 39,1 \mu W$ ,  $dP_{fi} = 37,0 mW$ . Tyto údaje jsou tak rozdílné, že při uvážení použité technologie výroby vzorku je lze interpretovat jako neadekvátní analyzované hodnoty. To lze ověřit měřením provedeným pro větší hloubku sledované složky, a to například do 50 mm pod povrchem. Takto získané údaje pro hloubku 10 mm a 50 mm se zásadně liší. Shodný referenční vzorek je charakterizován ztrátami  $dP_{co} = 30,6 mW$ ,  $dP_{fi} = 36,6 mW$ , což odpovídá hodnotám použité technologii výroby testovaného vzorku.
4. Vyhodnocení hustoty kovových elementů jako sledované složky komponentu je odvozena od ztrátového výkonu  $dP$  v uvažovaném monitorovaném prostoru s objemem  $V$ . Při zahrnutí vlivu zbylých složek kompozitu formou ztrátového výkonu  $dP_{fant}$  se u měření s nevhodným nastavením (nekvalitní úpravu povrchu vzorku s vysokou mírou nerovnosti) projeví získáním chybného údaje o objemové hustotě materiálu komponentu. V našem příkladném měření tomu odpovídá údaj  $\rho_{P4,co,10mm} = 135 kg/m^3$ . Takto vyhodnocený údaj signalizuje chybné nastavení měření a analýzy vzorku.
5. Podle změn modulu a fáze v grafu, například Obr. 5.1, lze vyhodnotit nerovnoměrnost rozložení ocelových kompozitů v měřeném místě. Změna fáze signalizuje změnu /nerovnoměrnost rozložení složek, Obr. 5.2 [25].



Obr. 5.1 Měření a vyhodnocení modulu a fáze impedance složky sledované části kompozitu (červená barva) vzorku P4  $f_r = 146,0 kHz$ , měření ze strany s nerovnostmi  $\Delta x_{fi} \cong 10mm$



Obr. 5.2 Laboratorní vyhodnocení modulu a fáze impedance pro měřicí body 5 a 9 na zkušební vzorku, vyhodnocení homogenity rozložení sledované složky kompozitu

## 5.2 Testování navržené metodiky na drátkobetonových zkušebních tělesech

Posledním dílčím výzkumným dizertační práce bylo ověření funkčnosti a využitelnosti navržené NDT metodiky a měřicího zařízení, popsané metodiky vyhodnocení koncentrace a orientace ocelových drátků v drátkobetonu. K experimentům popsaným v práci bylo přistoupeno za účelem objektivizace a co nejvíce přiblížení se ke zvyklostem stavební praxe. Z toho důvodu byly provedeny i laboratorní zkoušky na vyrobených zkušebních tělesech na první pohled ne zcela související s problematikou řešenou v této práci.

Jedná se o zkoušky běžně prováděné při realizaci drátkobetonových konstrukcí, především o stanovení pevnosti v tahu za ohybu, stěžejní zkoušku tohoto materiálu, ověření pevnosti v tlaku a kontrolu koncentrace drátků. Vyrobená zkušební tělesa, mimo drátkobetonových hranolů určených pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu, byla nejprve testována elektromagnetickou cívkou. Pro validaci výsledků měření pomocí navrženého měřicího zařízení a navržené metodiky hodnocení drátkobetonu byly použity metody radiální (rentgen, počítačová tomografie) a normativní destruktivní metoda pro stanovení reálné hodnoty koncentrace drátků.

Celkem byly vyrobeny tři sady těles z drátkobetonu odlišných koncentrací označeny S1, S2 a S3. Receptury jsou uvedeny v Tabulce 5.1.

Tab. 5.1 Receptury drátkobetonových směsí [30]

SRFC	Cement	Voda	Vodní součinitel	Kamenivo			Plastifikátor	Ocelová drátky
	42,5 R			0 - 4	4 - 8	8 - 16		
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	
S 1	390	160	0,41	900	250	670	4	40
S 2	390	160	0,41	900	250	670	4	80
S 3	390	160	0,41	900	250	670	4	120

Rozměry desek těles 1000 × 1000 × 10 mm byly voleny tak, aby bylo možné simulovat deskové konstrukce větších rozměrů, na které primárně by měla být navržena metodika aplikována. Ke každé drátkobetonové desce byla vyrobena doprovodná - referenční tělesa, vždy tři krychle o hraně 150 mm a dva trámce 400 × 400 × 100 mm.

Zkušební tělesa tvaru krychle byla testována elektromagnetickou cívkou, pomocí které byly hodnoceny parametry popisující elektromagnetické pole. Z naměřených hodnot byla stanovena koncentrace drátků pro každé zkušební těleso tvaru krychle zvlášť. Následně byly určeny hodnoty obsahu drátků v kg/m<sup>3</sup> pomocí destruktivní metody zkoušení [11]. Určeny byly také pevnosti v tlaku pro každou betonovou záměs. Ocelové drátky byly pomocí magnetu separovány po rozdrčení zkušebního tělesa a následně zváženy, viz Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Destruktivní zkouška referenčních těles – drátkobetonové krychle; separace drátků (vpravo)

Z naměřených hodnot byl stanoven opravný součinitel, který byl určen pro každé zkušební těleso tvaru krychle zvlášť. Opravný součinitel byl určen ze vztahu:

$$k_o = \frac{\rho_{des}}{\rho_c} \quad (9)$$

kde  $\rho_{des}$  je hodnota koncentrace ocelových drátků určená destruktivní metodou dle a  $\rho_c$  koncentrace určená elektromagnetickou cívkou. Tento opravný součinitel byl určen pro každé zkušební těleso. Výsledné hodnoty koncentrací stanovené pomocí elektromagnetické cívky, metodou destruktivní a průměrné hodnoty opravných součinitelů pro všechna referenční tělesa jsou uvedeny v Tab. 5.2 až Tab. 5.4.



Tab. 5.2 Hodnoty koncentrací  $\rho_{des}$  a  $\rho_c$  a hodnoty opravného součinitele  $k_o$  pro S1

S1	$\rho_{des}$	$\rho_c$	$k_{o1,i}$	$k_{o1}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[-]
S1-K1	36	1102,8	0,0326	0,0319
S1-K2	36	1146,5	0,0314	
S1-K3	36	1136,9	0,0317	

Tab. 5.3 Hodnoty koncentrací  $\rho_{des}$  a  $\rho_c$  a hodnoty opravného součinitele  $k_o$  pro S2

S2	$\rho_{des}$	$\rho_c$	$k_{o2,i}$	$k_{o2}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[-]
S2-K1	80	1344,0	0,0595	0,0656
S2-K2	80	1155,4	0,0692	
S2-K3	80	1176,9	0,0680	

Tab. 5.4 Hodnoty koncentrací  $\rho_{des}$  a  $\rho_c$  a hodnoty opravného součinitele  $k_o$  pro S3

S3	$\rho_{des}$	$\rho_c$	$k_{o3,i}$	$k_{o3}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[-]
S3-K1	120	1218,9	0,0984	0,1020
S3-K2	120	1163,4	0,1031	
S3-K3	120	1148,8	0,1045	

Průměrné hodnoty koncentrací drátků v testovaných zkušebních tělesech u receptury S2 a S3 jsou rovny návrhovým hodnotám. U receptury S1 se tato hodnota lehce liší. Při drcení zkušebních těles dochází i k drcení samotných vláken. Při jejich separaci pomocí magnetu tak může docházet k malým ztrátám, které mohou být znatelné při vyhodnocení koncentrace, obzvláště u nižších koncentrací.

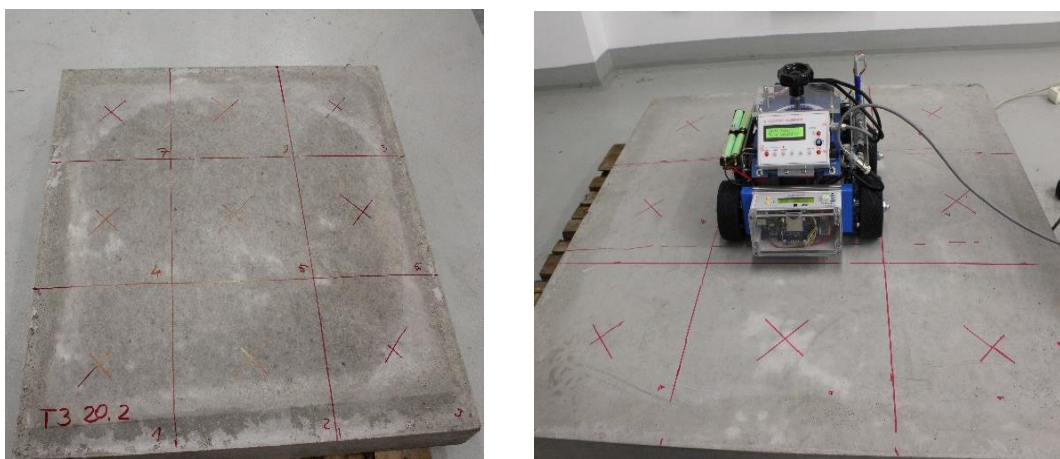
Přítomnost ocelových vláken ani jejich koncentrace nemá zásadní vliv na výsledné hodnoty pevností v tlaku, což prokazují výsledné hodnoty pevností v tlaku uvedené v Tabulce 5.5.

Tab. 5.5 Průměrné hodnoty pevností v tlaku a koncentrací ocelových vláken v drátkobetonových krychlich jednotlivých receptur

Označení sad zkušebních těles	Pevnost v tlaku	Koncentrace ocelových vláken		
		Návrhová hodnota	Průměrná hodnota	
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]
S1-K	64	40	36	1,6
S2-K	60	80	80	3,4
S3-K	67	120	120	5,0

Drátkobetonové desky D1, D2, a D3 byly vyrobeny za účelem simulace reálné situace ze stavební praxe, kdy je potřeba provést kontrolu kvality realizace drátkobetonové deskové konstrukce. Pro ověření byly ke kontrole rovnoměrnosti rozložení ocelových vláken v drátkobetonových deskách použity i v současnosti dostupné diagnostické metody.

Drátkobetonové desky byly nejprve tedy testovány elektromagnetickou cívkou, dále byly prozářeny rentgenem (YXLON SMART 300 HP) a závěrem z nich byly odebrány jádrové vývrty pro



Obr. 5.2 Drátkobetonová deska D3, vyznačené body měření, testování koncentrace elektromagnetickou cívkou

ověření koncentrace destruktivní metodou. Na každé z desek o ploše 1000 mm × 1000 mm bylo vyznačeno celkem 9 bodů měření symetricky, aby měření pomocí elektromagnetické cívky bylo prováděno v rastru, Obr. 5.2.

Pro testování drátkobetonových desek byly zvoleny pouze dvě frekvence rezonance  $f_{r4}$  a  $f_{r5}$ . Výsledky výpočtových hodnot koncentrace ocelových vláken v  $\text{kg/m}^3$  pro drátkobetonové desky jsou uvedeny v následujících tabulkách Tab. 5.6 až Tab. 5.8.

Tab. 5.6 Výpočtové hodnoty koncentrace ocelových vláken desky D1 v jednotlivých bodech měření v  $[\text{kg/m}^3]$

frekvence	Koncentrace ocelových vláken v $[\text{kg/m}^3]$ pro jednotlivé body měření								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_{r4}$	118,8	128,5	122,2	51,5	132,1	128,0	137,4	126,1	138,9
$f_{r5}$	986,5	988,6	1014,8	944,8	983,9	1153,4	1146,0	1166,7	1155,5

Tab. 5.7 Výpočtové hodnoty koncentrace ocelových vláken desky D2 v jednotlivých bodech měření v  $[\text{kg/m}^3]$

frekvence	Koncentrace ocelových vláken v $[\text{kg/m}^3]$ pro jednotlivé body měření								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_{r4}$	164,7	167,0	165,5	175,7	168,3	178,2	182,4	169,2	40,8
$f_{r5}$	1176,1	1174,3	1173,6	1165,8	1152,0	1151,5	1149,1	1134,2	1135,8

Tab. 5.8 Výpočtové hodnoty koncentrace ocelových vláken desky D3 v jednotlivých bodech měření v [kg/m<sup>3</sup>]

frekvence	Koncentrace ocelových vláken v [kg/m <sup>3</sup> ] pro jednotlivé body měření								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_{r4}$	206,3	201,4	202,3	201,9	221,7	243,3	223,2	213,1	217,8
$f_{r5}$	1220,9	1201,9	1154,5	1138,0	1144,4	1151,5	1123,3	1090,7	1070,6

Z výsledků měření vyplývá, že hodnoty koncentrací při různých nastaveních frekvence rezonancí yhodnocené elektromagnetickou metodou se vzájemně liší, a to až v řádech 10 kg/m<sup>3</sup> (což představuje řád 1-10% celkové hodnoty koncentrace). Pro lepší ilustraci dosažených výsledků byly výsledky graficky zpracovány.

### 5.3 Validace dosažených výsledků

Pro kontrolu homogenity rozptýlení drátků byla zvolena také radiografická metoda, založená na průchodu a zeslabení rentgenového záření. Jako zdroj záření byl použit rentgen YXLON SMART 300 HP, pro záznam prošlého a zeslabeného záření byly užity paměťové folie Dürr v kombinaci se Skenerem CR35 NDT Plus.

Pro radiografii desek byla zvolena ohnisková vzdálenost 1200 mm, expoziční parametry rentgenu byly stanoveny dle experimentálně stanoveného expozičního nomogramu a optimalizovány v hodnotách:

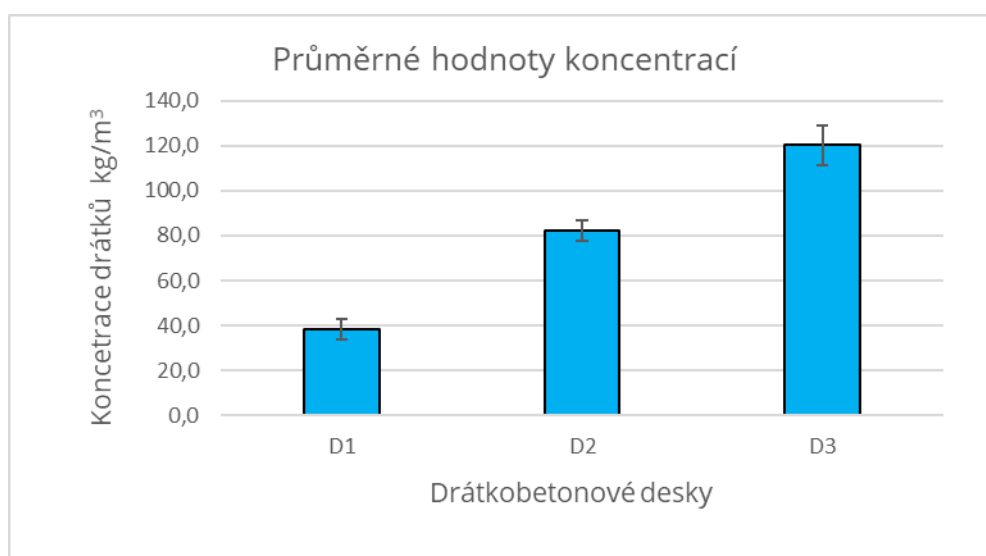
Proud na rentgence: 3mA  
 Napětí na rentgence: 200 kV  
 Doba expozice : 4,5 min

Z důvodu velké dynamiky zčernání paměťových folií, malé šířce svazku záření a vlivu rozptýleného záření na okrajích desky se jednotlivé snímky navzájem překrývaly, aby byly všechny oblasti desky vyhodnotitelné. Pro vyhodnocení snímků je vhodné kombinovat klasické a inverzní zobrazení radiogramů. Například na Obr. 5.3 je zobrazena inverzní varianta radiogramu části desky D1. Z radiogramu je možné konstatovat rovnoměrné rozložení ocelových drátků v prozařované ploše. Nejsou patrné shluky ocelových drátků ani žádné nevyztužené oblasti.

Po provedení zvolených NDT metod bylo v rámci ověření skutečných hodnot koncentrací k destruktivní metodě. Z každé desky bylo odebráno 9 jádrových vývrtů průměru 100 mm. Místa odběru byla totožná s místy přiřkládání osy elektromagnetické cívky. Jádrové vývrty byly upraveny a odzkoušeny na pevnost v tlaku. Po rozdrčení těles byly separovány ocelové drátky pomocí magnetu. Z jejich hmotnostního podílu byla stanovena koncentrace ocelových drátků pro každý jádrový vývrt. Dílčí hodnoty pevností a hodnoty koncentrací ocelových vláken jsou uvedeny Tabulce 5.9 a graficky zpracovány na Obr. 5.3. Průměrné hodnoty koncentrací ocelových vláken stanovené na jádrových vývrtech se nelišily o více jak 3 kg/m<sup>3</sup> od volených hodnot uvedených v recepturách. Průměrné hodnoty koncentrací byly stanoveny pro desku D1 38,4 kg/m<sup>3</sup>, desku D2 82,3 kg/m<sup>3</sup> a desku D3 120,4 kg/m<sup>3</sup>.

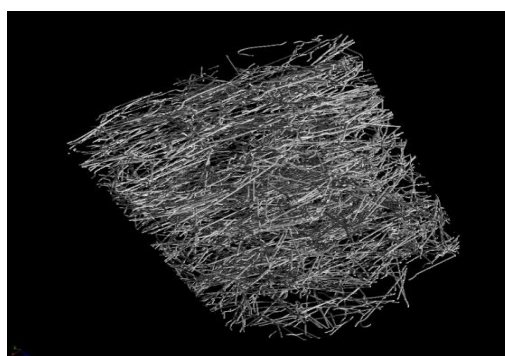
Tab. 5.9 Hodnoty koncentrací drátků pro jednotlivé vývrty odebrané ze drátkobetonových desek v kg/m<sup>3</sup>

Označení jádrového vývrtnu	Označení drátkobetonové desky		
	D1	D2	D3
1	36,6	80,5	110,0
2	44,1	84,4	115,6
3	42,5	77,0	128,4
4	30,8	83,1	137,6
5	38,2	89,1	114,2
6	37,3	75,7	127,5
7	40,0	85,3	117,5
8	33,3	80,8	114,1
9	43,3	81,7	118,4
<i>Aritmetický průměr</i>	<i>38,4</i>	<i>82,3</i>	<i>120,4</i>
<i>Směrodatná odchylka</i>	<i>4,55</i>	<i>4,47</i>	<i>8,88</i>



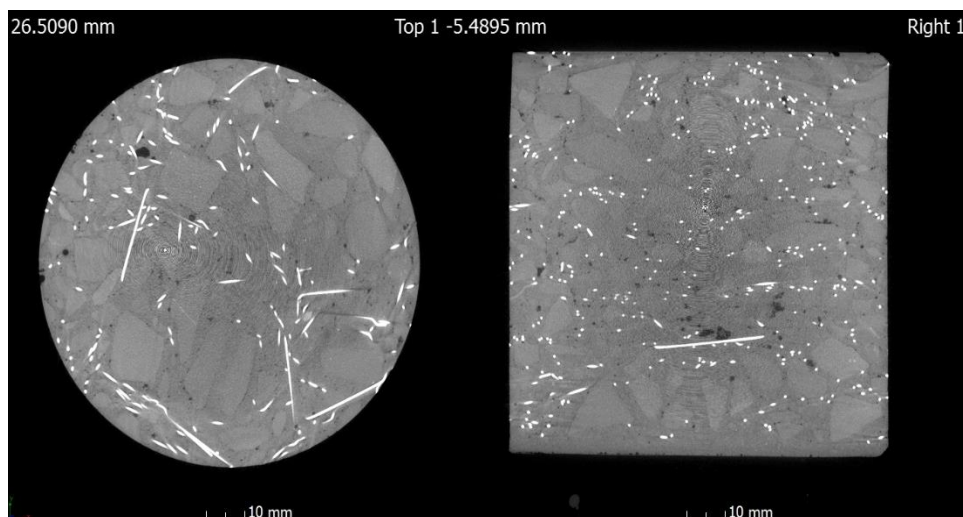
Obr. 5.3 Průměrné hodnoty koncentrací stanovené na jádrových vývrtech pro každou drátkobetonovou desku

Z hlediska snahy provedení komplexního hodnocení drátkobetonových desek byly na jádrových vývrtech odebraných z desky D2 provedeny laboratorní zkoušky pomocí



Obr. 5.4 Ukázka 3D vyhodnocení prozařování jádrového vývrtnu počítačovou tomografií

počítačové tomografie. Požadavkem byla pouze možnost vizuální kontroly rovnoměrnosti rozložení ocelových vláken v tělese, i když výsledky měření pomocí CT umožňují pomocí výpočtových modelů přesnější vyhodnocení v závislosti na požadavcích. Bohužel je tento způsob hodnocení vnitřní struktury zkušebních tělese časově a finančně velmi nákladný, a proto testování v rámci předkládané dizertační práce byla využita jen částečně. Nicméně z vizualizací získaných prozařováním tomografem je možné si udělat poměrně dobrou představu o uspořádání ocelových drátků ve zkušebním tělese, Obr. 5.4, Obr. 5.5. Z jednotlivých scanů jádrových vývrtů je možné hodnotit dobrou rovnoměrnost rozložení ocelových drátků, tedy se jedná o homogenní drátkobeton.



Obr. 5.5 Ukázka 2D vyhodnocení řezu jádrových vývrtů

## 6 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Navržené měřicí zařízení s popsanou metodou měření bylo nejprve laboratorně testováno pro ověření navržené metody, pro nalezení vhodného nastavení elektrických a magnetických parametrů. Laboratorně byla ověřena závislost frekvence a hloubky vniku elektromagnetického pole do materiálů s extrémními hustotami komponentu – ocelových vláken, pak správnost nastavení frekvence rezonančního stavu a upravena metodika hodnocení koncentrace a orientace ocelových drátků v drátkobetonu. Byla upravena metodika měření vzhledem k dosažení vysoké přesnosti a opakovatelnosti NDT měřicí metody, a to otáčením magnetického jha s elektrickými cívkami kolem své vlastní osy pro eliminaci nahodilých chyb tolerance nastavení jha a povrchu vzorku. Navržená metoda a jednoúčelový přístroj byl následně testován pro ověření dosahu elektromagnetické cívky, byla hodnocena maximální vzdálenost od povrchu elektromagnetické cívky, ve které podle teoreticky odvozených a hodnocených parametrů popisující elektromagnetické pole dochází ke změně naměřených hodnot impedance (modul, fáze). Původní odhad dosahu elektromagnetického pole vzniklého popsanou metodou byl, že dosah se pohybuje v řádu rozměru rozteče  $C$  elektromagnetického nastavec cívky. Z výsledků měření je možné konstatovat, že efektivní dosah elektromagnetického pole pro všech 5 frekvencí rezonance –  $f_{r1}=328,6$  kHz,  $f_{r2}=145,0$  kHz,  $f_{r3}=50,12$  kHz,  $f_{r4}=21,9$  kHz,  $f_{r5}=3,45$  kHz je do vzdálenosti 70 mm

od povrchu jha ( $C=120\text{mm}$ ). Přepokládaný maximální dosah navrženého zařízení je 100 mm od povrchu vzorku nelze úplně vyloučit vzhledem k nelineární povaze provedeného měření.

Byla nalezena vhodná rezonanční frekvence  $f_{r5}=3,45\text{ kHz}$ , při které se prokázala minimální citlivost metody na nepřesnost nastavení a vyhodnocení sledovaných parametrů.

Vyhodnocení orientace vláken (ocelových drátků v kompozitu) testované pomocí polykarbonátového vzorku na tvar elektromagnetického pole a velikost impedance (modulu, fáze) byl určen, ale není dominantní (díky nalezení a odvození vztahů pro vyhodnocení nelineární závislosti impedance  $Z$  na vzdálenosti a koncentraci sledované složky kompozitu), jako u vyhodnocení koncentrace vláken. Z dílčích popsanych experimentů při testování polykarbonátového vzorku popsanych v kapitole F 10 vyplývá, že nebyl vhodně zvolen testovací vzorek pro kalibraci metody, ve kterém byly drátky vkládány v poměrně velkém množství a zároveň v malých vzdálenostech. Předpoklad orientace do převážného směru ocelových drátků ve zkušebním tělese je více prokazatelný z grafického vyhodnocení naměřených hodnot impedance u směrového vzorku 2 z epoxidové pryskyřice, ve kterém byly drátky umístěny v  $\frac{1}{4}$  kvadrantu viz Obr. F-11-9 a Obr. F-11-10.

Z laboratorních testů zkušebních těles z epoxidové pryskyřice bylo prokázáno, že na naměřené hodnoty impedance má podstatný vliv kvalita povrchové vrstvy, což by mělo být zohledněno při vyhodnocení koncentrace složky podle vztahu (20) doplněním o součinitel  $k_s$ . Pro pryskyřicová zkušební tělesa nebyl tento součinitel vždy stanoven, protože jeho senzoru bylo přikládáno k hladké ploše zkušebních těles a tak byly zajištěny srovnatelné podmínky měření. Ze stejného důvodu nebyl určen tento součinitel ani pro drátkobetonové vzorky. Bylo prokázáno, že navrženou metodou lze sledovat nerovnoměrné rozložení a orientaci vláken.

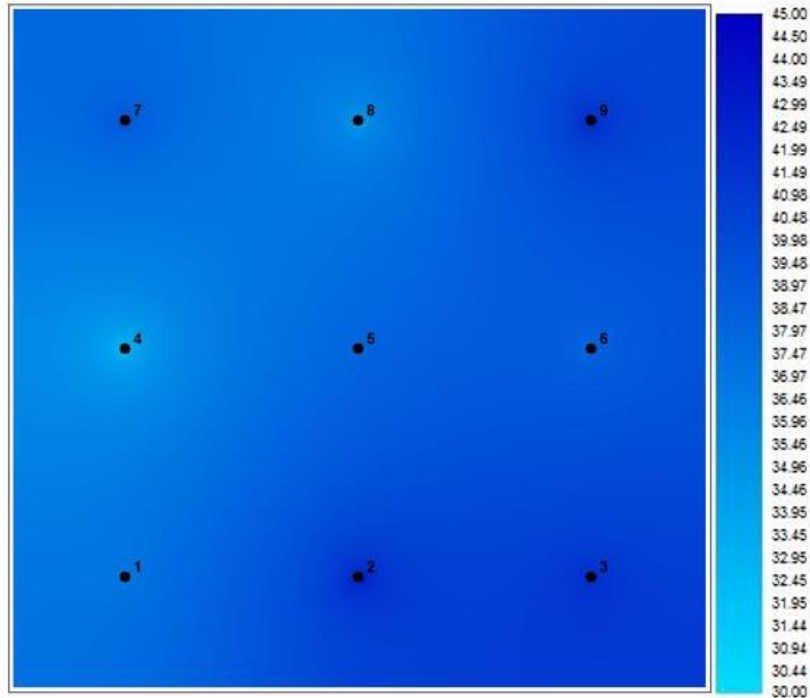
Speciálně vyrobené drátkobetonové desky byly zhotoveny pro simulaci reálné situace mimo laboratorní případy, ve stavební praxi. Také proto ke každé drátkobetonové desce byla vyrobena referenční (doprovodná) zkušební tělesa (krychle, trámec). Testovány byly nejprve drátkobetonové krychle. Byly určeny vybrané mechanické vlastnosti – pevnosti v tahu za ohybu na drátkobetonových trámcích a pevnosti v tlaku na drátkobetonových krychlích. Dle předběžných norem uvedených v Příloze 1 této práce je možné hodnotit homogenitu drátkobetonu na základě provedených laboratorních zkoušek, charakterizujících jeho mechanické vlastnosti. Z tohoto důvodu byly provedeny popsane laboratorní zkoušky zkušebních těles uvedené v kapitole 12 této práce.

Na krychlích byly určeny hodnoty koncentrací pomocí elektromagnetické cívky a také pomocí destruktivní metody – separací drátků. Tato data sloužila jako referenční. Ze vztahu

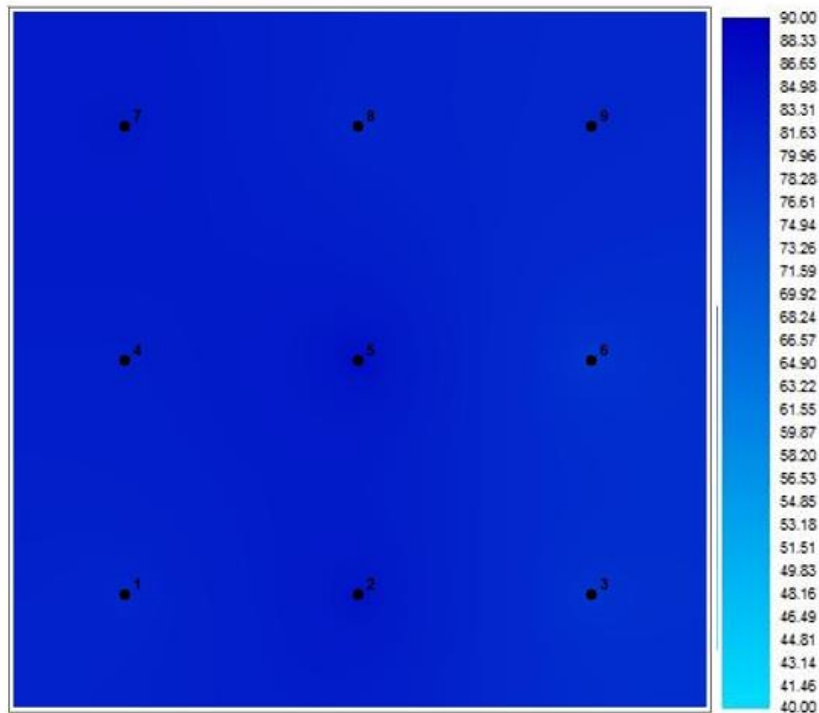
$$k_o = \frac{\rho_{des}}{\rho_c}, \quad (10)$$

kde je  $\rho_{des}$  koncentrace drátků určená na jádrových vývrtech a  $\rho_c$  koncentrace drátků určena na základě měření navrženou elektromagnetickou cívkou byla určena hodnota opravného součinitele  $k_o$  pro každou drátkobetonovou desku dané koncentrace. Tímto součinitelem byly opraveny naměřené hodnoty koncentrací určené z měření pomocí elektromagnetické cívky, ale byly testovány pro frekvence vyšší než  $f_{r5}=3,45\text{ kHz}$ . Zpřesněné analyzované průměrné hodnoty koncentrací byly stanoveny pro desku D1 ( $40\text{kg/m}^3$ )  $37,6\text{ kg/m}^3$ , desku D2 ( $80\text{kg/m}^3$ )  $72,1\text{ kg/m}^3$ , desku D3 ( $120\text{kg/m}^3$ )  $116,7\text{ kg/m}^3$ . Pro lepší interpretaci dosažených výsledků bylo provedeno grafické vyhodnocení koncentrací drátků pro každou desku po ploše, Obr. 6.1 až Obr. 6.3. Z těchto obrázků lze konstatovat, že byl

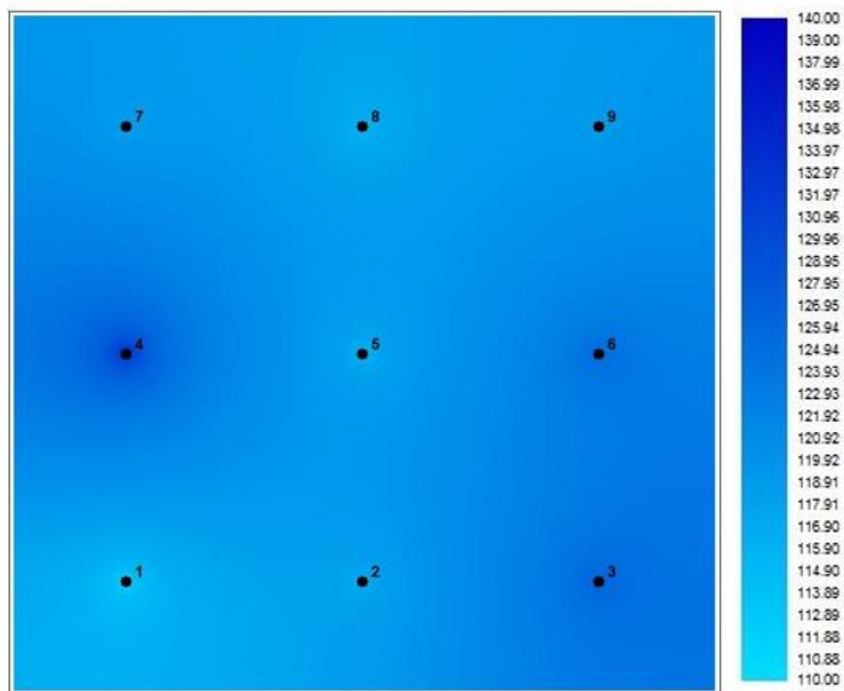
dodržen technologický postup výroby, tedy se jedná o homogenní drátkobeton. Stejně závěry je možné vyvozovat z vyhodnocení testů pomocí počítačové tomografie. Na Obr. 6.4 jsou sestaveny 3D obrazy jádrových vývrtů odebraných z desky D3. Z experimentů plyne, že lze při nastavení vhodné rezonanční frekvence dosáhnout ještě přesnějších analyzovaných hodnot NDT metodou.



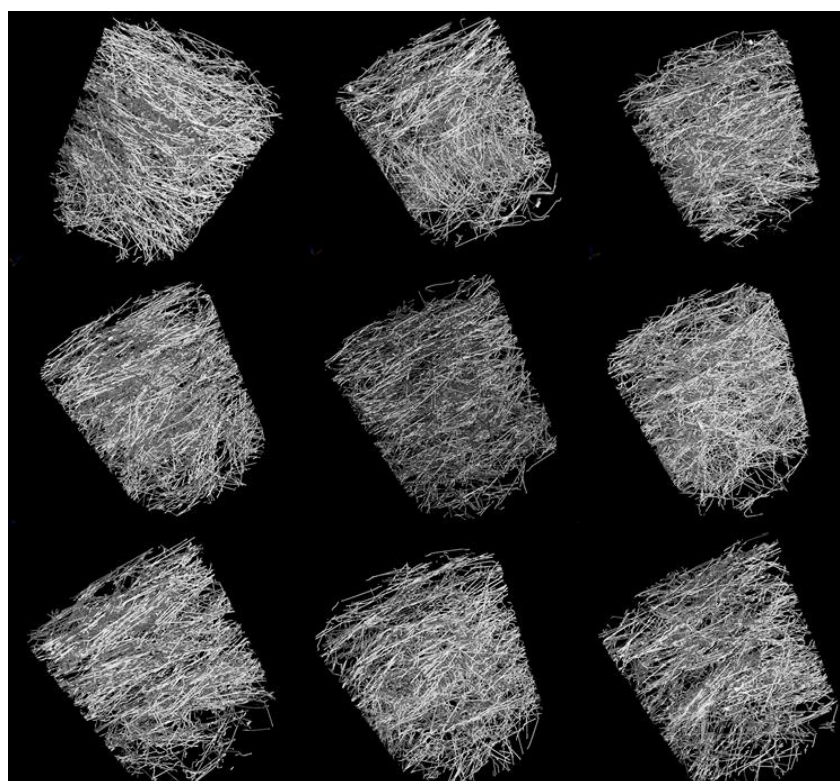
Obr. 6.1 Grafické vyhodnocení koncentrace desky D1



Obr. 6.2 Grafické vyhodnocení koncentrace desky D2



Obr. 6.3 Grafické vyhodnocení koncentrace desky D3



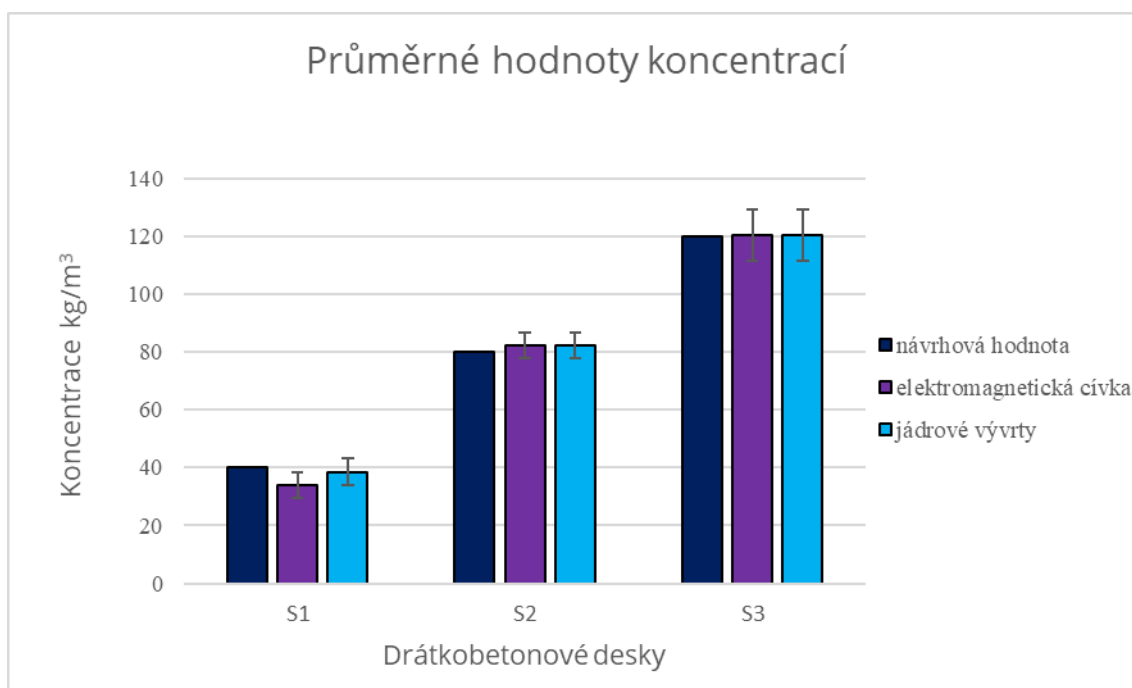
Obr. 6.4 3D vykreslení koncentrace drátků v jádrových vývrtech odebraných z desky D3



Závěrečné porovnání návrhových hodnot koncentrací s koncentracemi určenými normativní destruktivní metodou a novou navrhouvanou metodou za užití opravného součinitele určeného na referenčních tělesech je uvedeno na Obr. 6.5. Dosažené výsledky prokazují využitelnost nově navržené metody a experimentálního měřicího zařízení při měření a vyhodnocení koncentrace a homogenity drátkobetonu NDT metodami.

Z výsledků provedených laboratorních testů bylo prokázáno, že zkušební tělesa z drátkobetonu 3 různých koncentrací byla vyrobena velmi kvalitně. Rovnoměrnost ocelových vláken ve zkušebních tělesech byla více než dobrá s ohledem na rozměry zkušebních desek a vysokých hodnot volených koncentrací ocelových drátků. Na rozdíl od rentgenu a jeho vyhodnocení je možné z výsledných grafických výstupů CT hodnotit rovnoměrnost rozložení nejen po ploše zkušební desky, ale především po její výšce. Přesto i z radiogramů, uvedených kapitole G 14.2, je zjevné dodržení technologického postupu výroby. S těmito výsledky korespondují i průměrné hodnoty koncentrací ocelových drátků získaných z měření pomocí elektromagnetické cívky. Výsledky hodnocení rovnoměrnosti rozložení ocelových drátků v testovaných zkušebních tělesech, tedy homogenity drátkobetonu (s vyhodnocenou odchylkou obou měřících metod), potvrzující i výsledné hodnoty pevností v tlaku určené na referenčních tělesech a také výsledky pevnosti v tahu za ohybu stanovené na drátkobetonových trácích.

Naměřené a vyhodnocené hodnoty testů elektromagnetickou metodou NDT nejsou pro použité frekvence rezonancí totožné s volenými koncentracemi drátků v navržených recepturách (byly vyhodnoceny absolutní a relativní odchylky hodnot), lze konstatovat, že rovnoměrnost drátků v drátkobetonových deskách různých koncentrací byla potvrzena všemi užitými NDT metodami včetně nově navrženého NDT přístroje s ověřením normativní



Obr. 6.5 Grafické porovnání návrhové koncentrace, určené elektromagnetickou cívkou a destruktivní metodou

metody, odběru jádrových vývrtů.

Z toho vyplývá, že unikátní navržené (s udělenou přihláškou patentu CZ) měřicí zařízení je využitelné jako jedna z NDT metod pro hodnocení drátkobetonových konstrukcí. Její využitelnost byla prokázána pro hodnocení rovnoměrnosti rozložení drátků v deskových konstrukcích malých tloušťek, kdy ve stavebním průmyslovém použití je potřeba určit místa odběru jádrových vývrtů. Jelikož se stále jedná o jedinou diagnostickou normativní metodu, její doplnění o proměření konstrukčního prvku elektromagnetickou cívkou může vést k přesnějšímu a komplexnějšímu vyhodnocení kontroly kvality provedení drátkobetonové konstrukce.

## **7 ZÁVĚR**

Hlavní cíle dizertační práce byly podle zadání splněny, byl proveden návrh nového měřicího zařízení a NDT metodiky pro hodnocení koncentrace a orientace ocelových drátků v drátkobetonu.

Byly využity mezioborové znalosti a navržen princip NDT vyhodnocení parametru drátkobetonu. Ten je založen na popisu fyzikálních parametrů elektromagnetického pole, vychází z podstaty rozdílnosti ve vlastnostech prostředí- materiálů a to elektrické a elektromagnetické vodivosti ocelových drátků a na základě jevu rezonance navrhuje vysoce citlivou metodu, která dříve nebyla publikována a ani takto testována. Tvar, rozměry, způsob vinutí a také zapojení do elektrického obvodu byli podrobně popsány.

Dále byl navržen koncept NDT přístroje, tedy samotného měřicího zařízení, skládající se z elektromagnetické cívky a měřiče impedance, metodika měření a vyhodnocení sledovaných parametrů. Byla testována nastavení elektrického obvodu a výsledně zvoleno 5 frekvencí rezonance.

Byla popsána a patentově chráněna samotná, nově navržená metodika hodnocení homogenity drátkobetonu. Byly provedeny dílčí experimenty navržené tak, aby byl potvrzen předpokládaný dosah navrženého přístroje a vliv rozdílných hodnot koncentrací ocelových drátků na hodnoty impedance (Ukázalo se jako klíčové vyhodnocení modulu a fáze impedance). Kalibrace byla provedena na speciálně vyrobených zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice.

Navržený přístroj byl testován na drátkobetonových zkušebních tělesech, vyrobených za účelem simulace reálné situace ve stavební praxi. Dosažené výsledky testů na drátkobetonových tělesech byly validovány výsledky měření získaných běžně používanými NDT metodami (radiačními) a jedinou normativní destruktivní metodou.

Všechny hlavní i dílčí cíle práce byly naplněny. Přestože nebyly vždy jednoznačně potvrzeny veškeré teoreticky očekávané prvotní předpoklady/odhady, bylo prokázáno, že navržený NDT přístroj a popsána metodika hodnocení drátkobetonu je velkým přínosem jak na poli vědy a výzkumu v oblasti diagnostiky staveb, tak i na poli stavební praxe.

Klíčové poznatky byly publikovány a patentově chráněny, bylo publikováno několik světově nových poznatků.

## LITERATURA

- [1] SOUTSOS, M, BUNGEY, J. Introduction: key issues in the non-destructive testing of concrete structures. *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures* [online]. Elsevier, 2010, s. 3-23 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1533/9781845699536.1.3. ISBN 9781845695606. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845695606500015>
- [2] CIKRLE P, ANTON O, DANĚK P, KUCHARCZYKOVÁ B, MISÁK P, GROHOVÁ T. NDT zkoušení ve stavebnictví. : *Příručka kurzu ČŽV*. Brno, 2015.
- [3] HOBST L, ANTON O, VODICKA J, SCUCCA J. Homogeneity Detection of Fibre-Concrete Structures Using Radiographic Technique. BÜYÜKÖZTÜRK, Oral, Mehmet TAŞDEMİR, Oğuz GÜNEŞ a Yılmaz AKKAYA, Oğuz GÜNEŞ, ed., Yılmaz AKKAYA, ed. *Nondestructive Testing of Materials and Structures* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013, s. 323-328 [cit. 2018-04-09]. DOI: 10.1007/978-94-007-0723-8\_46. ISBN 978-94-007-0722-1. Dostupné z: [http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-94-007-0723-8\\_46](http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-94-007-0723-8_46)
- [4] GROHOVÁ T, HOBST L. Kontrola koncentrace drátků v drátkobetonu elektromagnetickou nedestruktivní metodou. In: *Juniorstav 2013*. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2013, s. 1. ISBN 978-80-214-4669- 4.
- [5] HOBST L, BÍLEK P. Nondestructive identification of material properties of fibre concrete: A stationary magnetic field. *AIP Conference Proceedings*. Theodore Simos and Charalambos Tsitouras, 2016, 1738(1). ISSN 978-0-7354-1392-4.
- [6] HOBST L, BÍLEK P, ANTON O, ZIKMUND T. Sledování anomálního rozmístění drátků v kalibračních vzorcích drátkobetonu počítačovou tomografií. *Beton TKS*. 2014, 14(3), 54-57. ISSN 1213-3116.
- [7] KOMÁRKOVÁ T, LÁNÍK J, ANTON O, HEŘMÁNKOVÁ V. Experimental testing of the electromagnetic coil – determining the range of electromagnetic coil. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. IOP Publishing, 2018, 385(2018), s. 1-6 [cit. 2018-08-29]. DOI: 10.1088/1757-899X/385/1/012029. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/84122>
- [8] ANTON O, HEŘMÁNKOVÁ V, HOBST L. *Sklo-epoxy směs jako náhrada betonu ve vzorcích pro testování magnetických metod ke stanovení homogenity drátkobetonu*. In: . Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2012, s. 82 - 87. ISBN 978-80-554-0528-5.
- [9] ČSN P 73 2450 *Vláknobeton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [10] ČSN P 73 2451 *Vláknobeton: Zkoušení čerstvého vláknobetonu*. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [11] ČSN P 73 2452 *Vláknobeton: Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu*. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [12] ČECHMÁNEK R, DRDLOVÁ M, BOHAC M. Non-Destructive and Destructive Monitoring Methods of Fibre Concrete Homogeneity. *Solid State Phenomena* [online]. 2017, 259, 9-14 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.259.9. ISSN 1662-9779. Dostupné z: <https://www.scientific.net/SSP.259.9>
- [13] ĎUBEK M, MAKÝŠ P, ĎUBEK S, PETRO M. THE EVALUATION OF THE CONTENT OF FIBERS IN STEEL FIBER REINFORCED STRUCTURES AND IMAGE ANALYSIS. *Journal of Civil Engineering and Management* [online]. 2018, 24(3), 183-192 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.3846/jcem.2018.1642. ISSN 1392-3730. Dostupné z: <http://journals.vgtu.lt/index.php/JCEM/article/view/1642>
- [14] BALÁZS G, CZOBOLY O, LUBLÓY É, KAPITÁNY K, BARSÍ Á. Observation of steel fibres in concrete with Computed Tomography. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 140, 534-541 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.114. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817303100>
- [15] FERRARA L, BAMONTE P, CAVERZAN A, MUSA A, SANAL I. A comprehensive methodology to

- test the performance of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFR-SCC). *Construction and Building Materials* [online]. 2012, 37, 406-424 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.057. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061812005272>
- [16] GETTU R, GARDNER D, SALDÍVAR H, BARRAGÁN B. Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens. *Materials and Structures* [online]. 2005, 38(1), 31-37 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.1007/BF02480572. ISSN 1359-5997. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/BF02480572>
- [17] PONIKIEWSKI T, GOŁASZEWSKI J, RUDZKI M, BUGDOL M. Determination of steel fibres distribution in self-compacting concrete beams using X-ray computed tomography. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* [online]. 2015, 15(2), 558-568 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.1016/j.acme.2014.08.008. ISSN 16449665. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1644966514001204>
- [18] YANG CH, JIN L, CHEN D, QI J. Practical Measurement for Steel Fiber Distribution of the SFRC Beams. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2012, 256-259, 840-843 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.256-259.840. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMM.256-259.840>
- [19] ZHU Y, BLUMENTHAL W, LOWE T. Determination of Non-Symmetric 3-D Fiber-Orientation Distribution and Average Fiber Length in Short-Fiber Composites. *Journal of Composite Materials* [online]. 2016, 31(13), 1287-1301 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.1177/002199839703101302. ISSN 0021-9983. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/002199839703101302>
- [20] FAIFER M, FERRARA L, OTTOBONI R, TOSCANI S. Low Frequency Electrical and Magnetic Methods for Non-Destructive Analysis of Fiber Dispersion in Fiber Reinforced Cementitious Composites: An Overview. *Sensors* [online]. 2013, 13(1), 1300-1318 [cit. 2015-03-19]. DOI: 10.3390/s130101300. ISSN 14248220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/13/1/1300/>
- [21] FERRARA L, FAIFER M, TOSCANI S. A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fiber reinforced cementitious composites—part 1: method calibration. *Materials and Structures* [online]. 2012, 45(4), 575-589 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.1617/s11527-011-9793-y. ISSN 1359-5997. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-011-9793-y>
- [22] ČSN EN 12390-3: Zkušeni ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [23] CORBETT D, TRONCA G. Non-Destructive Testing of Steel Fibre Reinforced Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, 9(246), 2-9. DOI: DOI: 10.1088 / 1757-899X / 246/1/012016.
- [24] FERRARA L, MEDA A. Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements. *Materials and Structures* [online]. 2007, 39(4), 411-420 [cit. 2018-03-20]. DOI: 10.1617/s11527-005-9017-4. ISSN 1359-5997. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-005-9017-4>
- [25] *Způsob pro vyhodnocení rozložení, hustoty a orientace feromagnetických elektricky vodivých vláken v kompozitním materiálu a detekční zařízení k jeho provádění*. 2016. Uděleno 9.3.2016. Zapsáno 20.4.2016.
- [26] KOMÁRKOVÁ T, FRIEDL M. Methodology for non-destructive evaluation of concentration and orientation of steel fibers in steel-fiber-reinforced concrete. In: *Book of abstracts: 23rd International Conference on Materials and Technology*. Ljubljana: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, 2015, s. 136 - 136. ISBN 978-961-92518-8-1.

- [27] KOMÁRKOVÁ T. Design of Methodology for Non-Destructive Testing of Steel-Reinforced-Fiber-Concrete. *Key Engineering Materials* [online]. 2016, 714, 179-185 [cit. 2017-10-08]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.714.179. ISSN 1662-9795. Dostupné z: <http://www.scientific.net/KEM.714.179>
- [28] FIALA P, FRIEDL M, ROUBAL Z, KŘÍŽ T. *Vozítka pro měření drátkobetonu: Technická zpráva*. Brno, 2016.
- [29] ANTON O, KOMARKOVA T, LANIK J, HERMANKOVA V. Development of new methods for determining the distribution of steel fibres in the hardened steel fibre reinforced concrete – possibilities of production and verification of test specimens. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, 385 [cit. 2018-09-03]. DOI: 10.1088/1757-899X/385/1/012002. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/385/i=1/a=012002?key=crossref.279c46b0251d615335f6bfb35dd23343>
- [30] KOMARKOVA T, LANIK J, TOPOLAR L, ŠTOLLER J, STONIŠ P. Experimental assessment of steel fibre reinforced concretes with different concentrations of fibres. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, 385 [cit. 2018-10-11]. DOI: 10.1088/1757-899X/385/1/012028. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/385/i=1/a=012028?key=crossref.ccaa3ca471af5642b4ce9100fa89e988>
- [31] KOMARKOVA, Tereza, Pavel FIALA, Miloslav STEINBAUER a Zdenek ROUBAL. Testing an Impedance Non-destructive Method to Evaluate Steel-Fiber Concrete Samples. *Measurement Science Review* [online]. 2018, 18(1), 35-40 [cit. 2018-10-11]. DOI: 10.1515/msr-2018-0006. ISSN 1335-8871. Dostupné z: <http://content.sciendo.com/view/journals/msr/18/1/article-p35.xml>