VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

DIZERTAČNÍ PRÁCE

Brno, 2019 Ing. Tereza Komárková

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

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE — **Ing. Tereza Komárková**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Ondřej Anton, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	P3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Doktorský studijní program s kombinovanou formou studia
Studijní obor	3607V009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Student	Ing. Tereza Komárková
Název	NÁVRH NDT METODY PRO HODNOCENÍ DRÁTKOBETONU
Vedoucí práce	Ing. Ondřej Anton, Ph.D.
Datum zadání	
Datum odevzdání	V termínech určených časovým harmonogramem akademického roku, nejpozději do jednoho roku od data zadání dizertační práce

V Brně dne

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D. Vedoucí ústavu	prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc. Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

STRUKTURA DIZERTAČNÍ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:
1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Ondřej Anton, Ph.D.
Vedoucí dizertační práce

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. Tyto poznatky vedly k návrhu nového měřicího přístroje ve spolupráci s Ústavem teoretické a experimentální elektrotechniky fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií (UTEE FEKT VUT v Brně) a sepsání metodiky hodnocení těchto parametrů. Navržená NDT metoda byla experimentálně testována a ověřována její využitelnost pro hodnocení drátkobetonu ve stavební praxi.

Abstrakt

The doctoral thesis deals with a non-destructive testing method (NDT) designed to evaluate the uniformity of distribution and determination of the concentration of steel fibres in steel fiber reinforced concrete (SFRC). At present, no non-destructive method is available in the field of diagnostics of building structures to assess the concentration and the homogeneity of SFRC. The Institute of Building Testing (SZK FAST BUT Brno) has several diagnostic devices, but their utility for the evaluation of selected parameters of SFRC has not proven during the research activity. This knowledge led to the design of a new measuring instrument in cooperation with the Institute of Theoretical and Experimental Electrical Engineering of the Faculty of Electrical Engineering and Communication (UTEE FEKT BUT in Brno) and the methodology for evaluation of these parameters. The proposed NDT method has been experimentally tested and verified for its utility for the evaluation of SFRC in building practice.

Klíčová slova

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

Bibliografická citace VŠKP

Ing. Tereza Komárková *Návrh NDT metody pro hodnocení drátkobetonu.* Brno, 2019. 141 s., 383 s. příl. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Ondřej Anton, Ph.D.

Prohlášení o původnosti práce

Prohlašuji, že jsem dizertační práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

……

podpis autora
Ing. Tereza Komárková

Poděkování

Chtěla bych především poděkovat prof. Ing. Pavlu Fialovi, Ph.D. za pomoc, podmětné návrhy a náměty, vstřícný přístup a čas, který mi během vypracování dizertační práce věnoval. Velké díky patří pplk. Ing. Jiřímu Štollerovi Ph.D., plk. doc. Ing. Pavlu Maňasovi, Ph.D. a dalším členům Katedry ženijních technologií Univerzity Obrany v Brně, protože bez nich by tato práce nikdy nevznikla. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat školiteli Ing. Ondřejovi Antonovi, Ph.D. za podmětné připomínky, trpělivost a individuální přístup a také kolegům z Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební VUT v Brně, kteří mi byli nápomocni a především za jejich osobitý přístup, který mne během celého studia doprovázel.

Obsah

A. ÚVOD 9

B. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU 10

1. SOUČASNÝ OBOR NDT A VÝZKUMNÉ ZAMĚŘENÍ PRACOVIŠTĚ 10
2. VLASTNOSTI DRÁTKOBETONU 12
3. NDT METODY PRO HODNOCENÍ HOMOGENITY A KONCENTRACE VLÁKEN V DRÁTKOBETONU 15
4. NDT PŘÍSTROJE PRO HODNOCENÍ HOMOGENITY A KONCENTRACE VLÁKEN V DRÁTKOBETONU 17
   - 4.1. Počítačová tomografie 17
   - 4.2. Přístroj BSM 100 21
   - 4.3. Sonda PeMaSo 22
   - 4.4. Přístroj Melvis 24
5. SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU 26

C. CÍLE PRÁCE 27

D. ZVOLENÝ PŘÍSTUP K NAPLNĚNÍ CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE 29

E. NÁVRH METODIKY HODNOCENÍ DRÁTKOBETONU A KONCEPTU MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ 31

6. FYZIKÁLNÍ PODSTATA METODY HODNOCENÍ HOMOGENITY DRÁTKOBETONU 32
7. KONCEPT NAVRŽENÉHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ 42
8. NDT METODIKA HODNOCENÍ DRÁTKOBETONU 47

F. KALIBRACE NAVRŽENÉ METODIKY A METODY NDT 50

9. TESTOVÁNÍ DOSAHU ELEKTROMAGNETICKÉ CÍVKY 50
10. TESTOVÁNÍ VLIVU MAJORITNÍ ORIENTACE DRÁTKŮ 67
11. TESTOVÁNÍ NA ZKUŠEBNÍCH TĚLESECH SPECIFICKÝCH PARAMETRŮ 75
    - 11.1. Výroba zkušebních těles specifických parametrů 75
    - 11.2. Laboratorní zkoušky na zkušebních tělesech specifických parametrů 79

G. TESTOVÁNÍ NAVRŽENÉ METODIKY NA DRÁTKOBETONOVÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLESECH 95

12. LABORATORNÍ ZKOUŠKY DRÁTKOBETONOVÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES 96
13. STANOVENÍ KONCENTRACE DRÁTKŮ NAVRŽENOU NDT METODOU 104
14. VALIDACE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ 106

H. DISKUZE VÝSLEDKŮ 110

I. PŘÍNOS DIZERTAČNÍ PRÁCE 116

J. ZÁVĚR 118

POUŽITÉ ZKRATKY A SYMBOLY 120

SEZNAM TABULEK **123**

SEZNAM OBRÁZKŮ **124**

LITERATURA **128**

SEZNAM NOREM **137**

SEZNAM VLASTNÍCH PRACÍ VZTAHUJÍCÍ SE K TÉMATU DIZERTAČNÍ PRÁCE **139**

A. 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. Drátkobetony vzniklé přidáním ocelových vláken do čerstvého betonu nejsou stavební praxi 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. Dizertační práce vychází ze zhodnocení současného stavu v oblasti diagnostiky drátkobetonu provedeného na mezinárodní úrovni. 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.

B. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU

1. Současný obor NDT a výzkumné zaměření pracoviště

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. 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.

Ve stavebnictví jsou investory a projektanty kladeny stále vyšší požadavky na parametry stavebních materiálů, především na ty z nich, které zaručují jejich kvalitu a trvanlivost. S tím je spjat i nezbytný pokrok v rozvoji diagnostických metod zkoušení stavebních materiálů. Pomocí nedestruktivního zkoušení lze odhalit a popsat vady testovaných materiálů a výrobků takovými metodickými postupy, při jejichž aplikaci se výrobky neporuší, nezmění se ani jejich budoucí použitelnost, životnost nebo schopnost plnit předpokládanou funkci. V odborných publikacích je metoda nedestruktivního zkoušení zmiňována dlouhodobě, například pro testování materiálů, které byly posuzovány z počátku 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].

Ústav stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně patří k předním výzkumným pracovištím na území ČR, které je zaměřeno na provádění diagnostiky stavebních konstrukcí. Pracovníci spolupracují s jinými organizacemi a institucemi, ať už s výzkumnými či různými výrobci diagnostických přístrojů, ale také velmi aktivně kooperují se stavební praxí. Ústav disponuje několika NDT přístroji užívanými při diagnostice stavebních konstrukcí in situ tak i v laboratorních podmínkách.

Snaha držet krok s nejnovějšími trendy a pokroky v oblasti diagnostiky staveb je znatelná hlavně ve výzkumné činnosti pracovníků ústavu s provázáním na aplikaci ve stavební praxi [3-8]. Řešené výzkumné projekty jsou zaměřeny na hodnocení vybraných vlastností stavebních materiálů a návrhu a aplikaci diagnostických metod.

Stále častěji jsou objednavateli 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 [9-14].

2. Vlastnosti drátkobetonu

Beton je ve stavebnictví používán už několik desetiletí. Jedná se o kompozitní materiál, jehož hlavními složkami je voda, cement a kamenivo [15, 16]. Během let však v souvislosti s vývojem ve všech vědních oblastech se technologie výroby betonu rozvíjela a v dnešní době můžeme hovořit o řadě druhů betonu z hlediska jeho složení [17-19]. Ve stejném duchu je možné hodnotit i způsoby jeho vyztužování pro zlepšení mechanických vlastností a rozšíření možností realizace moderních staveb. Nejběžnější způsob vyztužování prostého betonu je přidávání ocelových prutů do oblastí tahových napětí konstrukčních prvků [20]. V průběhu let začalo být využíváno i tzv. rozptýlené výztuže, které daly za vznik vláknobetonům. Přidávání vláken do stavebních materiálů sahá do hluboké historie stavebnictví. Například do nepálených cihel jsou vlákna používána již stovky let. Největší rozvoj však u vláknobetonů nastal v druhé polovině 20. století. Byly vyvinuty nejrůznější druhy vláken z různých materiálů, velikostí i tvarů, přesto největší rozmach zaznamenala vlákna ocelová [21-23].

Drátkobeton je kompozitní materiál, jehož přidanou složkou jsou ocelové drátky zajišťující zlepšení hlavně tahové únosnosti a zvýšení duktility. Jako složka by drátky měly být rozptýleny ve struktuře rovnoměrně v uvažovaném objemu tělesa, stejně jako jsou například rozptýlena zrna hrubé frakce kameniva v běžném betonu. Rovnoměrné rozptýlení drátků vede k efektu jejich prostorového působení ve struktuře kompozitu a k jejímu celkovému ztužení. Drátky proto nelze považovat v klasickém pojetí za výztuž, ale pouze za ztužující prvek poměrně křehké struktury obyčejného betonu [24]. Využití drátkobetonu ve stavební praxi je stále širší, není již používán pouze pro deskové konstrukce velkých rozměrů, jako jsou podlahy výrobních hal apod., ale v posledních několika letech jsou z drátkobetonu vyráběny prefabrikované výrobky, architektonické panely, konstrukce v seizmicky aktivních oblastech, tunelová ostění, hydraulické konstrukce a mnoho dalších [25, 26].

Výhody drátkobetonu oproti betonu prostému jsou nesporné. Především se jedná o jeho duktilitu a únosnost v tahu po vzniku trhliny [27-33]. V současné době se studiu drátkobetonu a charakterizací jeho fyzikálních a mechanických vlastností

věnuje široká odborná veřejnost, o čemž svědčí velké množství odborných publikací, např. [34-38]. Největším problém tohoto stavebního materiálu je technologie výroby. Každý kompozitní materiál je do jisté míry komplikací pro technology, jelikož výsledné charakteristiky závisí jak na vlastnostech jednotlivých složek, tak hlavně na jejich vzájemném poměru. Čím více složek kompozitní materiál obsahuje, tím větší pozornost je potřeba věnovat jeho výrobě [39-40]. Jedině soulad všech složek, ze kterých se technologie betonu skládá, zajistí realizaci kvalitní a homogenní drátkobetonové konstrukce. Podrobný popis složení a výroby drátkobetonu je uveden v Příloze 1, kapitola 1 této práce.

Drátkobeton je název pro vláknobeton, u kterého jsou použita při výrobě ocelová 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. K širšímu využití drátkobetonů přispívá i možnost kombinace s užitím klasické betonářské výztuže či výztuže předpínací. To poukazuje na nemalý potenciál tohoto stavebního materiálu a široké možnosti využití ve stavební praxi.

Výroba drátkobetonů se však do nedávna 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 [41]
- ČSN P 73 2451 – Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu [42]
- ČSN P 73 2452 – Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu [43].

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. Výčet všech laboratorních zkoušek s hlavními změnami oproti tradičním zkouškám prostého betonu uvedených v [41-43] je popsán v Příloze 1, kapitole 2 této práce.

3. NDT metody pro hodnocení homogenity a koncentrace vláken v drátkobetonu

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. Svůj podíl má i chybějící legislativní rámec určující metodické postupy zkoušení drátkobetonu. To vedlo k experimentálnímu testování běžné užívaných nedestruktivních metod pro ověření jejich využitelnosti při hodnocení drátkobetonu. V Příloze 1 kapitole 3 jsou uvedeny a popsány metody užívané při diagnostice drátkobetonových konstrukcí – metody semidestruktivní a nedestruktivní. 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. 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 [44-51]. Dosavadní poznatky vedly k modernizaci či vývoji nových měřicích zařízení, které pracují na elektromagnetickém principu. Jsou založeny na vyhodnocení fyzikálních/elektromagnetických parametrů pole [52, 53].

Většina současných dostupných přístrojů je však aplikována pouze na zkušebních tělesech odebraných během výroby nebo odebraných ze stávající konstrukce. Pro hodnocení konstrukcí „in situ“ jsou voleny metody radiační. Tyto metody nelze však vždy uplatnit, vzhledem k jisté nutné konfiguraci sestavy zdroje záření – detektor, rovněž v důsledku škodlivosti ionizujícího záření, ochraně osob

před primárním a sekundárním ionizujícím zářením, atd. Drátkobeton lze prozatím hodnotit s požadovanou přesností pouze na základě odebrání jádrových vývrtů z konstrukce a pomocí dalších destruktivních zkoušek je možné stanovit posuzované parametry materiálu [43].

V současnosti je tedy upřednostňována normativní destruktivní metoda pro hodnocení kontroly kvality drátkobetonových prvků za pomocí odběru jádrových vývrtů [54]. 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 [55].

4. NDT přístroje pro hodnocení homogenity a koncentrace vláken v drátkobetonu

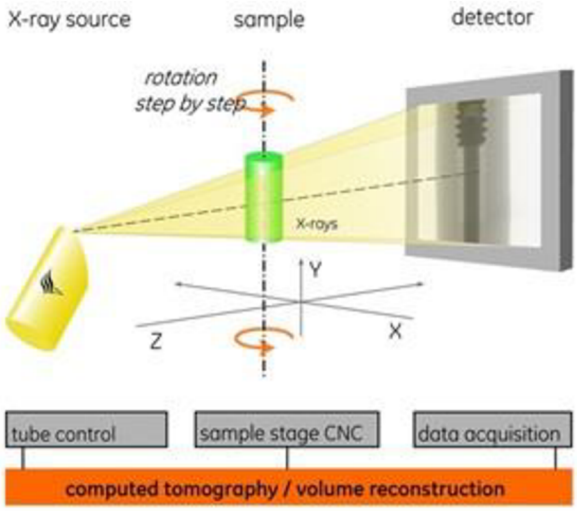
V následujících podkapitolách je uveden přehled výčtu dostupných měřicích zařízení a metodik založených na nedestruktivním principu, které jsou v současné době v diagnostice využívány pro hodnocení homogenity drátkobetonu a pomocí kterých lze stanovit koncentraci ocelových drátků (elementů). Jsou zde popsány jednoduché principy a hlavní výhody a nevýhody.

4.1. Počítačová tomografie

K jedné z nejúčinnějších metod, co se vypovídací schopnosti týká, patří počítačová tomografie (CT) [56-59]. K prvním zmínkám o jejím využití ve stavebnictví patří článek uveřejněný v časopise BETON TKS, ve kterém prof. Balázs [60] stručně popisuje zkušenosti při zjišťování vnitřní struktury betonu z hlediska rozložení kameniva a cementové matrice a také obsahu vzduchu ve vzorcích betonu. Při vhodném nastavení a filtraci lze jednotlivé složky samostatně zobrazit. Při této kontrole byl využit lékařský tomograf. Nevýhodou lékařských tomografů je však podstata, že se zdroj elektromagnetického záření a detektor synchronně pohybují nad stacionárním kontrolovaným objektem (pacientem). U průmyslových tomografů je zdroj záření a příslušný detektor stacionární a pohybuje se (rotuje) kontrolovaný objekt. Tím je možné dosáhnout preciznějších výsledků.

Jedná se o dostupnou nedestruktivní metodu, díky které je možné pořizování dvourozměrných či třírozměrných snímků testovaných vzorků a jejich následné vyhodnocování různými metodami zpracování obrazů. Tomografická data umožňují zobrazit vnitřní strukturu v libovolné rovině a pomocí vhodných programových celků zrekonstruovat 3D strukturu objektu. Takto získaný 3D obraz umožňuje vyhodnocení (vizualizaci) distribuce detekovaných defektů v kontextu s tvarem objektu. Rentgenová počítačová tomografie je moderní zobrazovací metoda umožňující vizualizaci a analýzu předmětů. Nespornou výhodou této metody je, že se jedná o nedestruktivní metodu, jež umožňuje zobrazování vnitřní struktury

zkoušeného tělesa v řezech. Základní princip měření pomocí CT je zobrazen na Obr. B-4-1.

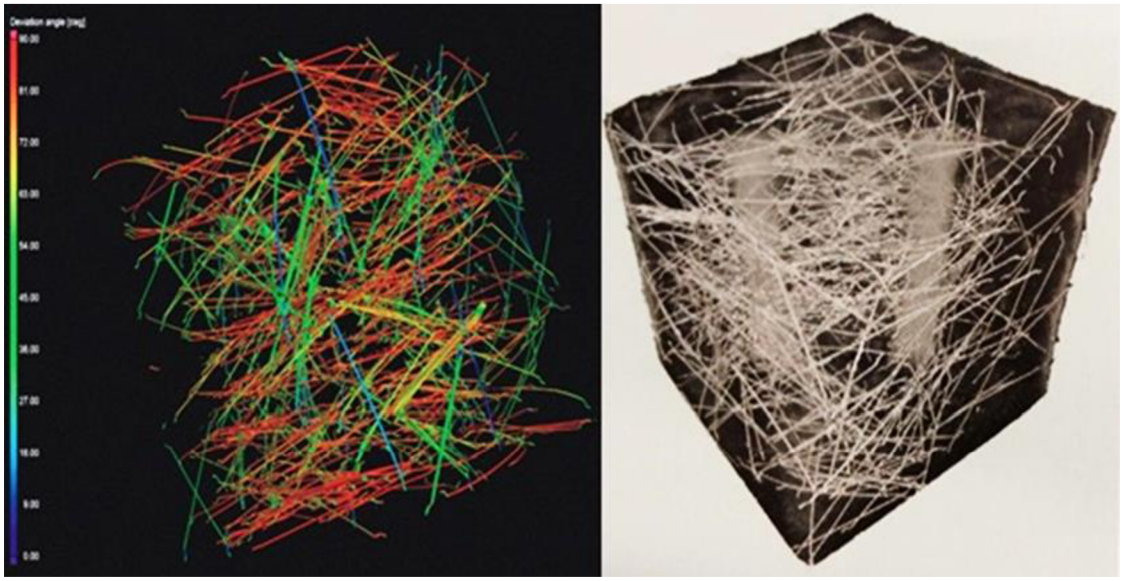


Obr. B- 4-1 Schéma principu prozařování zkušebního tělesa pomocí CT [61]

Zkoušený vzorek je upnutý na rotační stolek mezi zdrojem záření a plošným detektorem tvořeným maticí miniaturních snímačů. Přístroj zaznamenává rentgenové snímky po určitém úhlu natočení vzorku kolem 360°. Z těchto rentgenových snímků jsou tomografickou rekonstrukci vygenerovány obrazy představující řezy objektem (tzv. tomografické řezy) Obr. B-4-2. Mikrotomografie (μCT) je název pro tomografii s voxelovým rozlišením na úrovni jednotek až desítek mikrometrů a umožňuje snímání vnitřní struktury trojrozměrných předmětů s vysokým prostorovým rozlišením.

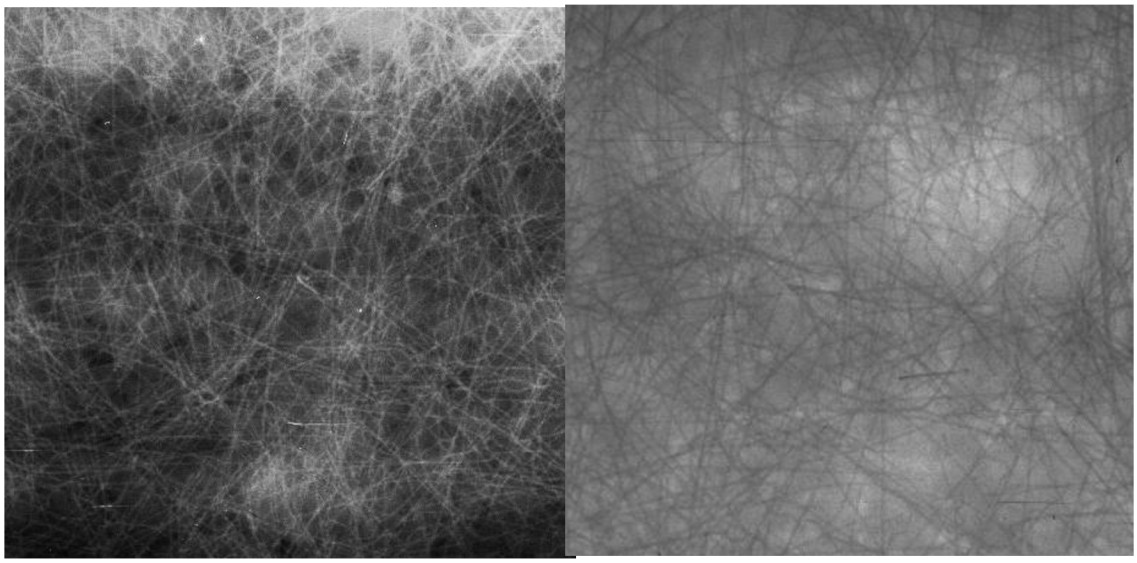
Laboratorně byla testována tělesa různých tvarů – válec a krychle, s odlišnými koncentracemi vláken. Výsledky měření prokázaly předpoklady nerovnoměrného rozmístění vláken v daném objemu prozařovaných těles a zároveň také bylo zhodnoceno, že maximální rozměr zkušebního vzorku by nemělo přesáhnout 100 mm. Při prozařování těles větších rozměrů není možné provést komplexní vyhodnocení, jelikož nedojde k prozáření tělesa v celém objemu. Testování jednoho vzorku se pohybuje řádově okolo 2 hodin, přičemž v řádech několika hodin je zapotřebí vymezit čas pro samotné vyhodnocení naměřených dat. I když se jedná o velmi přesnou metodu měření koncentrace a orientace ocelových vláken, a v podstatě o jedinou metodu umožňující 3D zobrazení vnitřní struktury, je tato metoda velmi časově i finančně náročná a není aplikovatelná na stávající konstrukce

[62, 63]. Přestože je tato metoda ze své podstaty řazena mezi nedestruktivní, základem jejího použití in situ je odebrání vzorku z konstrukce a jeh následné laboratorní testování.



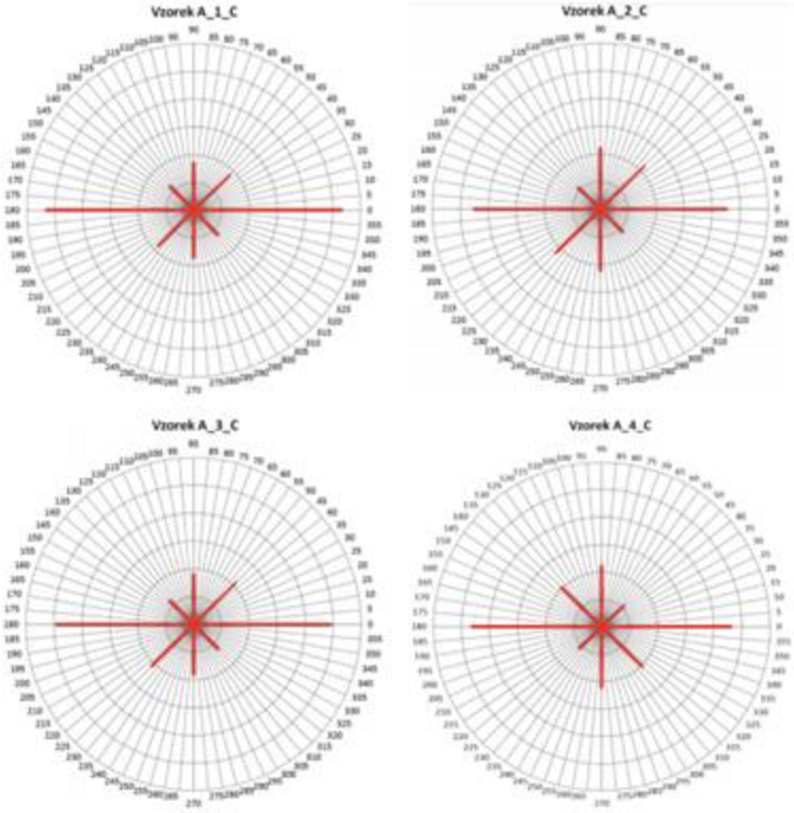
Obr. B-4-2 a) Zobrazení separovaných ocelových drátků se směrovou analýzou (vlevo) b) Axonomické zobrazení transparentního vzorku krychle pomocí CT (vpravo [63])

Rentgenografie patří k nedestruktivním metodám, které umožňují kontrolu vnitřní struktury materiálu bez jeho porušení [64, 65]. Ve stavebnictví byla tato metoda úspěšně odzkoušena při radiografické kontrole výztuže v železobetonových konstrukcích a dále při kontrole zainjektování předpínací výztuže v konstrukcích z předpjatého betonu. Je proto předpoklad, že ji lze aplikovat i při kontrole homogenity drátkobetonu. Přestože vypovídací schopnost radiogramů je vynikající, má rentgenografická metoda kontroly i řadu omezení. Je například možné kontrolovat předměty a materiály pouze o určité limitované tloušťce, která je závislá na energii rentgenového záření[9, 66]. V běžných podmínkách je používáno rentgenové záření o energii cca 160 kV, které umožňuje prozařovat vzorky betonu do tloušťky 100 mm. Větší tloušťky lze prozařovat při volbě vyšší energie záření ovšem při podstatné ztrátě rozlišitelnosti detailů v materiálu. Ukázka radiogramu prozařované drátkobetonové desky tloušťky 100 mm při napěti 200 kV pomocí YXLON International GmbH je zobrazeno Obr. B-4-3. V neposlední řadě je nutno při radiografické kontrole dodržovat přísná bezpečnostní opatření [66].



Obr. B-4-3 Příklad klasického zobrazení radiogramu při prozáření drátkobetonové desky tloušťky 100 mm pomocí přístroje YXLON International GmbH, kdy zčernání je úměrné prošlé dávce záření. Objekty s větší hustotou jsou světlejší a vpravo inverzní varianty radiogramu, objekty s větší hustotou jsou tmavší.

Využití radiografického snímkování představuje dnes již klasický nedestruktivní přístup k získávání informací o struktuře drátkobetonu. Přímou detekcí polohy drátků z jednotlivých snímků je zjišťován jejich počet, příslušný jednotlivým třídám úhlů v rovině, z čehož lze následně sestavovat tzv. směrové růžice. Na grafických výstupech tohoto typu Obr. B-4-4 (jsou-li k dispozici v dostatečně reprezentativním množství) tak lze snadno kontrolovat, zda byla technologickým postupem dodržena makroskopická izotropie materiálu, důležitá pro zamezení vzniku trhlin při tahových namáháních z různých směrů. Problémy nicméně mohou být s idealizovanou makroskopickou homogenností materiálu, zejména při soustředění drátků (zejména při jejich poměrně nízkém objemovém podílu v materiálu- shluky), třeba i nahodilých směrů, do několika center, mezi nimiž zůstává nevyztužená matrice. Věrohodné usuzování na prostorové rozložení drátků z jednoho snímku (či jejich malého množství), jakkoliv by bylo při známé délce drátků stejného typu teoreticky možné, není realistické s ohledem na obvyklou kvalitu snímků a technologický postup při přípravě drátkobetonu. Detekce polohy drátků musí být dostatečně robustní, aby zpracovala i různě zakřivené drátky, případně i zmiňovaná nežádoucí centra. Přes určitá omezení je radiografická metoda používána, a v podstatě lze říci jako jediná použitelná, pro hodnocení drátkobetonových konstrukcí z hlediska kontroly rovnoměrnosti rozložení ocelových vláken v konstrukčním prvku in situ.



Obr. B-4-4 Ukázka grafického znázornění přednostní orientace drátků v testovaných vzorcích [66]

4.2. Přístroj BSM 100

Jako jeden z novějších přístrojů užívaných v současné stavební praxi, je přístroj BSM 100 od firmy HERTZ SYSTEMTECHNIK GMBH, který pracuje na principu prozařování zkušebního vzorku krychle ve třech osách (x, y, z). Výstupem měření je výsledná hodnota obsahu ocelových vláken v g/l a zároveň procentuální vyjádření rozložení a orientace ocelových vláken ve všech třech osách. Výhodou přístroje je poměrně velká přesnost měření, avšak lze zkoušet pouze zkušební tělesa, jejichž největší rozměr nepřesáhne 150 mm. Popisované zařízení se používá pro kontrolu homogenity drátkobetonu, ze kterého je realizována daná konstrukce. Není tedy možné přístroj využít pro měření přímo na konstrukcích a v neposlední řadě jsou pořizovací náklady poměrně vysoké, tudíž tímto zařízením disponuje pouze několik firem v Evropě (v řádech jednotek). Také při manipulaci s tímto zařízením jsou zapotřebí dostatečné zkušenosti a především znalosti o fyzikálních vlastnostech použitých ocelových vláken ve zkušebním tělese. Úvodní nastavení přístroje si žádá

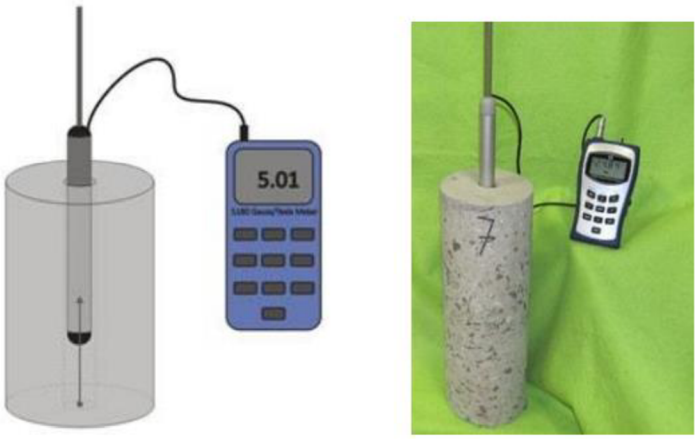
zadání vybraných parametrů použitých vláken, nicméně samotné vyhodnocení je velmi rychlé. Na Obr. B-4-5 je znázorněn samotný přístroj při testování zkušebních těles z drátkobetonu [61].

Obr. B-4-5 Přístroj BSM 100 pro stanovení obsahu ocelových vláken v drátkobetonu [62]

4.3. Sonda PeMaSo

Mezi další měřicí přístroje využitelné pro drátkobetony je sonda PeMaSo Obr. B-4-6 [11, 67, 68]. Tato sonda byla navržena a vyvíjena v rámci projektu přiděleného na Ústav stavebního zkušebnictví Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Navržené zařízení pracuje na principu vzniku elektromagnetického pole a samotné měření spočívá v měření úbytku toku magnetického pole vlivem rostoucí koncentrace feromagnetických prvků – drátků, a to pomocí měřicí soupravy napojené na digitální přístroj Bell 5180. Permanentní magnet generuje magnetické pole, jehož zeslabení, měřené v jistých (volených) vzdálenostech od magnetu, vypovídá zprostředkovaně o objemovém podílu vláken, méně již (neprovádí-li se experiment opakovaně v různých směrech) o směrovém rozložení vláken. Při představě o možné homogenizaci problému jde na makroskopické úrovni o řešení Laplaceovy rovnice pro intenzitu magnetického pole, kde příslušná magnetická permeabilita vystupuje jen v okrajové podmínce. Při návrhu této sondy se vycházelo především z předpokladu, že feromagnetické drátky v kompozitu drátkobetonu jsou tvořeny běžnou ocelí, která má vysokou relativní permeabilitu

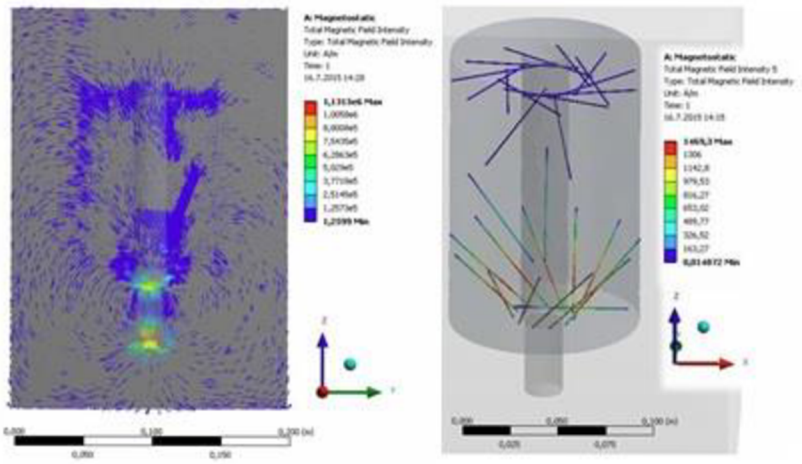
μr»1000 na rozdíl od okolního prostředí kompozitu, který má relativní permeabilitu *μr~1*.



Obr. B-4-6 Schéma sondy PeMaSo a její aplikace na zkušebním tělese [11]

Na Obr. B-4-7 je zobrazena intenzita magnetického pole v celkovém objemu drátkobetonového zkušebního tělesa a intenzita magnetického pole na jednotlivých drátcích pro vybranou polohu permanentního magnetu. Dalo by se tedy předpokládat, že drátky rozptýlené v betonu zvýší jeho relativní permeabilitu, která by měla být v korelaci s jejich koncentrací. Jedná se o semidestruktivní metodu, při které jsou do drátkobetonových konstrukčních prvků či zkušebních těles vyvrtány jádrové vývrty a v nich je prováděno popsané měření a posléze vyhodnocení hledaných parametrů. Tato sonda je vhodná pro hodnocení stávající konstrukcí, tedy měření in-situ. Bylo prokázáno, že při hodnocení tunelových ostění je tato metodika velmi vhodná. Problematické se může jevit testování zkušebních těles malých rozměrů. Proto validace tohoto zařízení byla prováděna v laboratorních podmínkách na zkušebních vzorcích větších rozměrů [62].

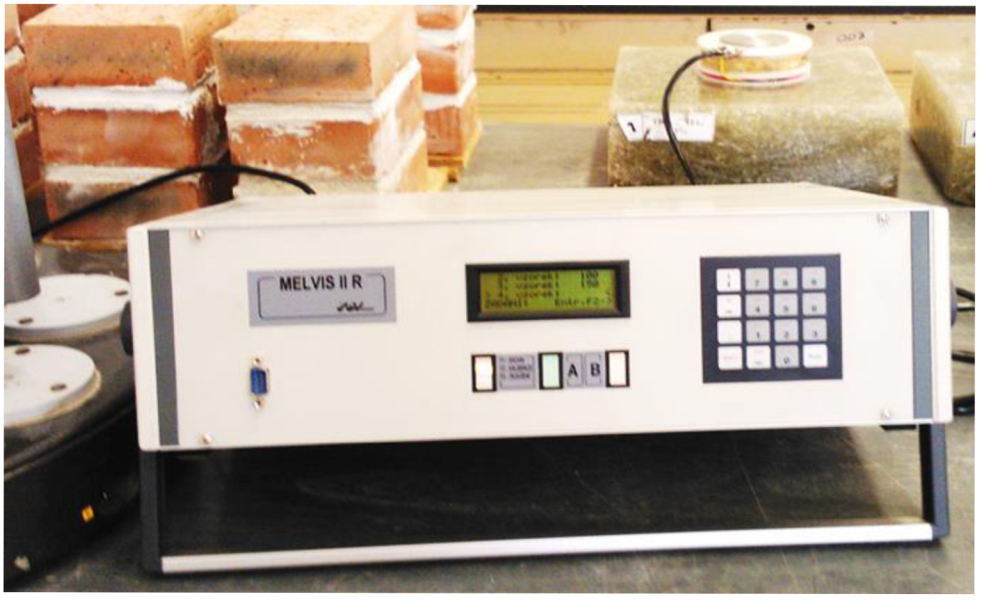
Jako výhodu této metodiky je možné brát jen její částečnou destruktivnost: k získání věrohodných výsledků, zejména o rozložení drátků hlouběji pod povrchem masívní konstrukce, je třeba v praxi provádět řadu vývrtů do hotové konstrukce [11, 69].



Obr. B-4-7 a) Zobrazení intensity magnetického pole (vlevo)
b) Zobrazení intensity magnetického pole na jednotlivých drátcích pro danou polohu magnetu (vpravo) [11]

4.4. Přístroj Melvis

Na základě teoretických znalostí o strukturoskopických metodách byl před několika lety firmou TSI System vyroben měřicí přístroj Melvis Obr. B-4-8, jenž byl zapůjčen Ústavu stavebního zkušebnictví VUT v Brně. Společně s vyvíjenou sondou PeMaSo byly v rámci projektu oba přístroje testovány na speciálně vyrobených zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice, aby byla ověřena relevance naměřených dat. K přístroji Melvis byla vyrobena i elektromagnetická cívka složená



Obr.B-4-8 Přístroj Melvis – testování pryskyřicového zkušebního tělesa

z budící i snímací části o průměru 120 mm s vyjímatelným magnetickým jádrem. Předpokladem bylo, že pomocí tohoto přístroje a cívky lze zjišťovat hledané mechanické vlastnosti daného materiálu na základě kalibračních vzorků, u kterých je hledaná vlastnost předem známá. Tento způsob diagnostiky pomocí přístroje Melvis má své výhody a lze pomocí jednoho přístroje určit hned několik hledaných vlastností zkoušeného materiálu. Jistou nevýhodou při těchto měřeních byl bezesporu velký minimální počet kalibračních vzorků, jenž byl po konzultacích uživatelů a výrobce stanoven na 6.

5. Shrnutí současného stavu

Doposud v ČR ani v Evropě není využívána metoda zkoušení založená na čistě nedestruktivním principu, pomocí které by bylo možné určit koncentraci (hustotu), rozložení a popřípadě orientaci ocelových vláken [62, 70]. Přitom právě koncentrace a rovnoměrné rozložení drátků jsou stěžejní z hlediska správné funkce a jakosti konstrukce.

Drátkobetonové deskové konstrukce velkých rozměrů patří ke starším realizovaným stavbám, které mají stále na území ČR největší zastoupení v oblasti drátkobetonových staveb. Během let dochází ke snižování životnosti těchto konstrukcí, což poukázalo na absenci NDT metody pro provádění kontroly kvality těchto prvků.

Využitelnost radiačních a elektromagnetických metod pro hodnocení drátkobetonu je jen částečná. Žádný z popisovaných přístrojů neumožňuje na základě interpretace výsledků měření určit koncentraci drátků a současně stanovit rovnoměrnost jejich rozložení. Každá z uvedených metod v kapitolách 4.1 až 4.4 má svá úskalí. V podstatě jediná použitelná metoda pro hodnocení stávajících drátkobetonové konstrukce je metoda radiografická. Avšak i ta je ze své podstaty aplikovatelná pouze u konstrukčních prvků dostupných z obou protilehlých stran. Souhrnně tedy vyplývá, že pro posouzení drátkobetonových deskových prvků, jako jsou podlahy výrobních hal, je in situ realizovatelná pouze metoda semidestruktivní – odběr jádrových vývrtů.

C. 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:

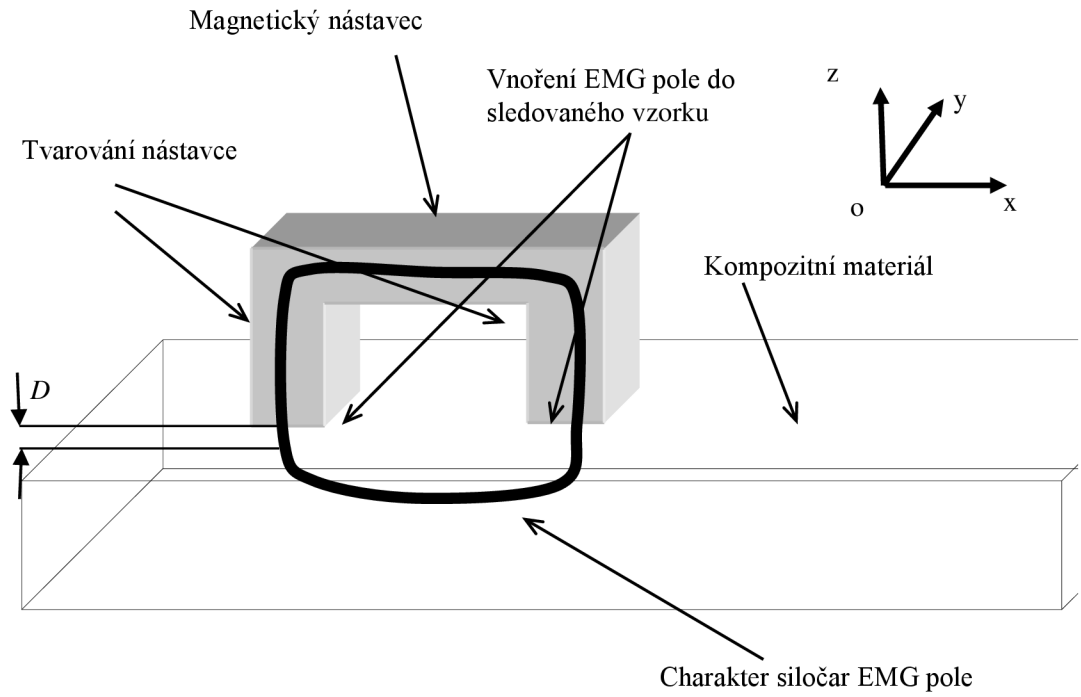
1. Návrh zjišťování koncentrace a orientace ocelových drátků v drátkobetonu
    - nalezení a popsání podstaty návrhu NDT na základě vlastností elektrické a elektromagnetické vodivosti přidávané složky (drátků) do prostého betonu
    - návrh elektromagnetického obvodu, jha a elektrické cívky, elektrického 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 a to do stavební praxe.

D. ZVOLENÝ PŘÍSTUP K NAPLNĚNÍ CÍLŮ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Výsledky prvotních výzkumných prací [25, 52, 71] dále provedených a rozpracovaných v rámci předložené dizertační práce vedly k navázání spolupráce s katedrou UTEE na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Během té bylo navrženo experimentální zařízení pro vyhodnocení způsobu a metody NDT testování kompozitních materiálů s ocelovými vlákny [72] založené na vyhodnocení parametrů elektromagnetického pole blízkého okolí snímacího prvku.

Metoda NDT založena na vyhodnocení elektromagnetických změn spočívá ve vyhodnocení velmi citlivých změn impedance *Z* konfigurace magnetického obvodu a testovaného prostoru- vzorku, Obr. D-1. 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 testovaného vzorku projevila na parametrech komplexní impedance *Z* (modul, fáze), a to v na více hodnotách v intervalu od f_d do f_r. Uspořádání snímacího prvku a testovaného vzorku



Obr. D-1 Princip impedanční NDT vyhodnocení kvality kompozitního materiálu [71]

lze schematicky zobrazit pomocí soustředěných prvků s vazbami a parametry navržené metody NDT snímání parametrů vzorku kompozitního materiálu [72].

V systému ověření navržené metodiky a metody je jako součást výzkumu předkládán návrh a výroba speciálních zkušebních těles z epoxidové pryskyřice určených pro kalibraci 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.

Teoretické předpoklady byly nejprve laboratorně ověřovány a měřeny na zkušebních tělesech specifických parametrů, následně byla laboratorně testována drátkobetonová tělesa navržených receptur, jak pomocí nově navržené metody a pomocného elektronického zařízení, tak i pomocí radiačních metod. Závěrečné experimenty provedené v rámci dizertační práce byly navrženy a provedeny tak, aby simulovaly reálnou situaci při diagnostice vodorovných drátkobetonových konstrukcí, a proto pro závěrečné zhodnocení dosažených výsledků byly provedeny také normativní destruktivní zkoušky zkušebních těles.

E. NÁVRH METODIKY HODNOCENÍ DRÁTKOBETONU A KONCEPTU MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

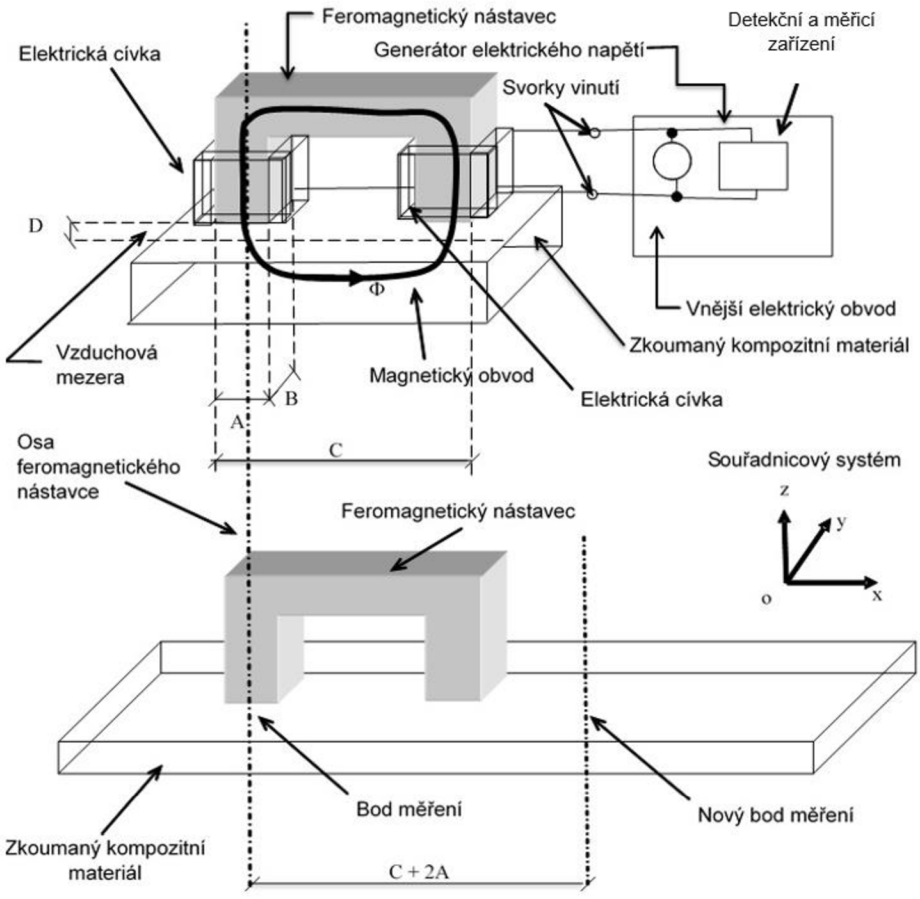
Dizertační práce je zaměřená na návrhu NDT metody a popisu NDT metodiky hodnocení drátkobetonu. Součástí předložené práce je souhrn a popis NDT metod v současnosti dostupných ve stavební praxi a také testované v rámci výzkumné činnosti na Ústavu stavebního zkušebnictví VUT FAST (kapitola 5).

Přístroj Melvis, popsán v kapitole 4.4, byl testován v rámci předkládané dizertační práce. Přístroj svými dosaženými výsledky nebyl pro potencionální rozvoj využitelný. Na základě dosažených poznatků a zkušeností s tímto a obdobními zařízeními, bylo navrženo koncepčně a konstrukčně zařízení nové, které využívá nově navržené metody [71]. Stěžejní část práce je věnována podrobnému popisu návrhu metody NDT a testování navrženého přístroje. Ten byl navržen ve spolupráci s UTEE FEKT tak, aby byla diagnostika drátkobetonových konstrukcí „in-situ“ vyhovující současným náročným požadavkům: dostupnější – metodicky, časově i ekonomicky. Předložená dizertační práce se dělí na část teoretickou, která zahrnuje popis metody NDT diagnostiky uvažovaného kompozitního materiálu, další část práce přináší laboratorní testy a validaci metody a poslední část ukazuje na testech a srovnáních parametry navržené metody. Byly zohledněny požadavky z hlediska validace a přesnosti měření touto metodou.

Návrh přístroje vychází z provedených rešerší a dílčích experimentů převážně s přístrojem Melvis pro nedestruktivní hodnocení homogenity drátkobetonu. Další část práce se zabývá testováním nově navrženého přístroje v laboratorních podmínkách, kdy bylo zapotřebí na speciálně vyrobených zkušebních tělesech provést kalibraci přístroje a následně realizovat ověření jeho využitelnosti. Pro stanovení validace byla provedena kontrolní měření na drátkobetonových zkušebních tělesech pomocí diagnostických metod běžně užívaných ve stavební praxi.

6. Fyzikální podstata metody hodnocení homogenity drátkobetonu

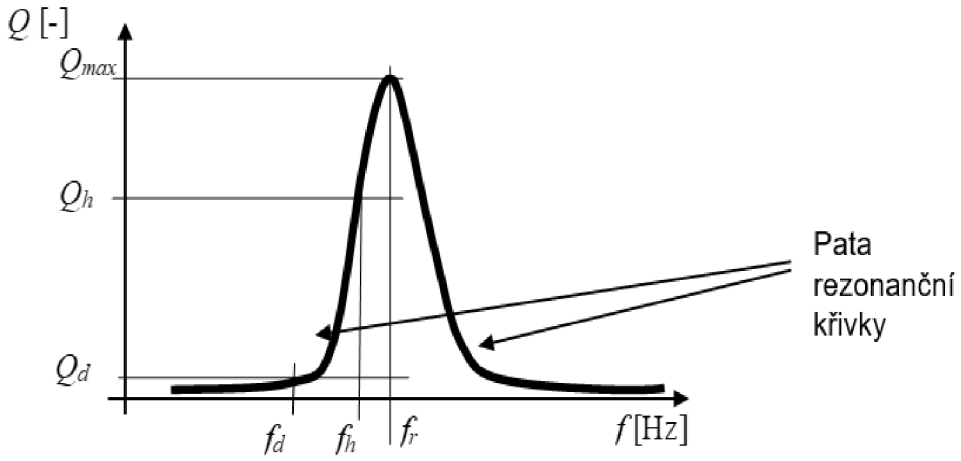
Pro zařízení k provádění vyhodnocení elektromagnetických vlastností feromagnetických elektricky vodivých částí kompozitního materiálu byla navržena základní konstrukce feromagnetického nástavce s elektrickým vinutím tvaru písmene C, které je provedeno jako částečně rozložené nebo plně rovnoměrné elektrické 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 a pojiva. Detekční zařízení k provádění NDT je připojeno k elektrickému obvodu navrženému tak, aby jeho rezonanční frekvence f_r ve volném prostoru ležela v intervalu frekvencí f_{test}= 10 MHz do 2 GHz.



Obr. E-6-1 Schéma měřícího zařízení – vzájemné uspořádání feromagnetického nástavce a elektrické cívky vzhledem ke zkoušenému materiálu [72]

Volba frekvence *f* je závislá na parametrech testovaného kompozitního materiálu (objemové hmotnosti, objemu *V* a rozložení feromagnetických nebo feromagnetických a elektricky vodivých složek, atd.) a požadované hloubce měření od povrchu vzorku kompozitního materiálu, Obr. E 6-1. Detekční a měřicí zařízení je sestaveno z měřiče impedance $\hat{Z}$ a je připojeno k elektrické cívce budící magnetický tok Φ Obr. E-6-1. Ke vzorku kompozitního materiálu je přikládán feromagnetický nástavec s elektrickým vinutím budicí elektrické cívky napájené okamžitou hodnotou proudu *i (t)* a je detekováno elektrické napětí *u (t).* Měřič impedance realizovaný ve vnějším elektrickém obvodu vyhodnocuje impedanci $\hat{Z}$ a její změny jak ve složkovém tvaru (Z_{Re}, Z_{Im}), tak exponenciálním tvaru (Z_{mod}, Z_{φ}). Frekvence budicího obvodu *f* detekčního a měřicího zařízení (měřiče impedance) je nastavena tak, že se nachází na patě rezonanční křivky, viz Obr. E-6-2.

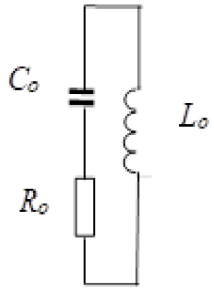
Dále je vymezena dolní frekvencí f_d s dolní mezí koeficientu kvality Q_d a horní frekvencí f_h s horní mezí koeficientu kvality Q_h. Připojené elektrické cívky jsou uspořádány na feromagnetickém nástavci, viz Obr. E-6-1, který je umístěn v nastavené vzdálenosti *D* od povrchu testovaného kompozitního materiálu. Při pohybu v nastavené vzdálenosti *D* od povrchu kompozitního materiálu se mění měřená impedance $\hat{Z}$, jež je vyhodnocena detekčním a měřicím zařízením (měřičem impedance). Její změna u testovaného kompozitního materiálu je jednoduše popsatelná pomocí náhrady - elektrický obvod Obr. E-6-3 a pomocí výsledku změny



Obr. E-6-2 Rezonanční křivka průběhu koeficientu kvality [72]

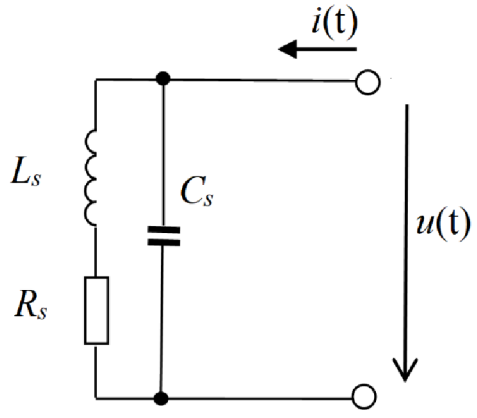
se interpretuje měrná hustota feromagnetických složek objemu *V* kompozitního materiálu při dané poloze feromagnetického nástavce.

U navrhovaného detekčního zařízení je aplikována konstrukce feromagnetického nástavce se dvěma rameny opatřenými elektrickým vinutím ve tvaru písmene U s rozloženým nebo rovnoměrným elektrickým vinutím elektrické cívky, viz Obr. E-6-1. Feromagnetický nástavec s rozměry *A*, *B*, *C* je proveden z feritového materiálu, přičemž pro rozměry platí $C \geq 3B$ a $B \cong A$.



Obr. E-6-3 Elektrické schéma nedestruktivního zkoušení kompozitního materiálu [72]

Feromagnetický nástavec je opatřen dvěma elektrickými cívkami zapojenými do série s vývody ukončenými na svorkách vinutí. Pro zajištění silné magnetické vazby feromagnetického nástavce a zkoumaného objemu *V* vzorku kompozitního materiálu v bodě měření je elektrické vinutí elektrické cívky uspořádáno na obou

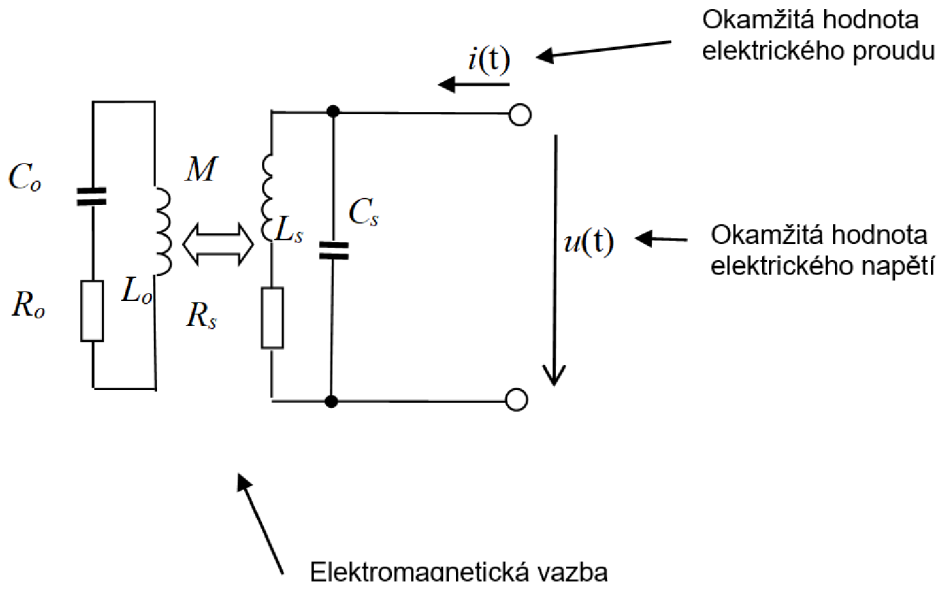


Obr. E-6-4 Schéma zapojení náhradního modelu [72]

ramenech feromagnetického nástavce, přičemž vývody vinutí elektrické cívky jsou na svorkách vinutí připojeny k vnějšímu elektrickému obvodu Obr. E-6-4.

V něm je zapojen generátor elektrického napětí *u (t)* s nastavitelnou frekvencí *f* a detekční a měřicí zařízení (měřič impedance). Konce ramen feromagnetického nástavce jsou umístěny ve vzdálenosti *D* od povrchu zkoumaného vzorku kompozitního materiálu. Tím se vytvoří magnetický tok *Φ*, který se uzavírá magnetickým obvodem tvořeným feromagnetickým nástavcem a zkoumaným objemem *V* vzorku kompozitního materiálu.

Rezonanční jev navrženého zařízení nastane při nastavení parametrů podle zapojení náhradního modelu, ve kterém jsou soustředěné parametry popsány indukčnostmi *L*, kapacitami *C*, rezistory *R* a vzájemnou indukčností *M*. Při takto nastavených parametrech se rezonanční frekvence *f* generátoru elektrického napětí (vnějšího elektrického obvodu) nachází v intervalu frekvencí od 10 Hz do 2 GHz a zároveň leží v intervalu, který je vymezen dolní frekvencí f_d s dolní mezí koeficientu kvality Q_d a horní frekvencí f_h s horní mezí koeficientu kvality Q_h. Vlastnost homogenity zkoumaného objemu *V* ve vzorku kompozitního materiálu lze popsat pomocí zapojení náhradního modelu se soustředěnými parametry, kterými jsou kapacita C_0, Rezistor R_0, Indukčnost L_0 Obr. E-6-5.



Obr. E-6-5 Elektrické schéma NDT metody [72]

Parametry tohoto modelu jsou dány kvalitou zkoumaného objemu *V* vzorku kompozitního materiálu. Vlastnost feromagnetického nástavce a vzduchové mezery lze popsat pomocí zapojení náhradního modelu se soustředěnými parametry, kterými jsou kapacita C_s, Rezistor R_s, Indukčnost L_s , viz Obr. E-6-3. Části zkoumaného objemu *V* vzorku kompozitního materiálu popsané náhradním modelem se soustředěnými parametry podle Obr. E-6-5 a jsou vázané elektromagnetickou vazbou se zkoumaným objemem *V* vzorku testovaného kompozitního materiálu. Tyto části lze popsat prostřednictvím elektromagnetických vlastností charakterizujících feromagnetický nástavec, vinutí elektrické cívky, vzduchovou mezeru a také pomocí kapacit C_s a C_0, rezistorů R_s a R_0, indukčností L_s a L_0 a vzájemnou indukčností *M*. Vzájemná indukčnost *M* popisuje parametry realizované vinutím elektrické cívky na feromagnetickém nástavci napájené přes vývody na svorkách vinutí elektrické cívky. A dále je lze charakterizovat z vnějšího elektrického obvodu opatřeného generátorem elektrického napětí *u (t)* s nastavitelnou frekvencí *f* a vytvářející na svorkách vinutí elektrické cívky okamžité hodnoty elektrického napětí *u (t)*, přičemž svorkami vinutí elektrické cívky procházejí okamžité hodnoty elektrického proudu *i (t)*. Detekční a měřicí zařízení (měřič impedance) vyhodnocuje komplexní impedanci $\hat{Z}$ a její změny.

Nastavení frekvence *f* budicího signálu měřiče impedance se nastavuje postupně tak, aby koeficient kvality rezonance Q_h mohl nabývat hodnot:

$$Q_{0.5} = \frac{1}{2} Q_{max} \text{ , } Q_{sq2} = \frac{1}{\sqrt{2}} Q_{max} \text{ nebo } Q_{sq3} = \frac{1}{\sqrt{3}} Q_{max}$$

a nedosáhl hodnot pod velikost koeficientu Q_d Obr. E-6-2. Hodnoty se v experimentálním nastavení ukázaly jako výhodné pro výsledné vyhodnocení místa s nerovnoměrným rozložením složek kompozitního materiálu. Komplexní impedance $\hat{Z}$ harmonického průběhu složek elektrického a magnetického pole lze zapsat ve tvaru

$$\hat{Z} = \frac{\left|\hat{\boldsymbol{E}}\right|}{\left|\hat{\boldsymbol{H}}\right|}, \tag{4}$$

ve kterém jsou $\hat{E}$ komplexní vektor intenzity elektrického pole a $\hat{H}$ komplexní vektor intenzity magnetického pole. Komplexní vektor měrné hustoty elektrického výkonu lze zapsat ve tvaru

$$\hat{\Pi} = \hat{E} \times \hat{H} \ , \tag{5}$$

ve kterém symbol × označuje vektorový součin. Potom pro zapojený obvod podle obrázku Obr. F-5-1 je komplexní impedance $\hat{Z}$ v exponenciálním tvaru tvořená složkami elektrického a magnetického pole dané konfigurace magnetického obvodu a vzorku kompozitního materiálu zapsaná jako

$$Z_0 = \frac{\left\| \hat{E} \right\|}{\left\| \hat{H} \right\|} \angle \varphi_0 \tag{6}$$

a komplexní impedance $\hat{Z}$, která je uspořádána na feromagnetickém nástavci, tvořená složkami získanými z měřiče impedance zapsaná ve tvaru

$$Z_0 = \frac{\left| \hat{u} \right|}{\left| \hat{i} \right|} \angle \varphi_0 \ , \tag{7}$$

$\hat{i}$

kde $\hat{U}$ je komplexní tvar elektrického napětí na svorkách elektrické cívky s náhradním vyjádřením pomocí soustředěných parametrů Obr. F-5-3. Dle obrázku Obr. F-5-1 $\hat{I}$ je komplexní tvar elektrického proudu tekoucího elektrickou cívkou s náhradním vyjádřením pomocí soustředěných parametrů, viz náhradní zapojení znázorněné na Obr. F-5-5. Pro nastavenou frekvenci rezonance f_r celého uspořádání měřiče impedance a elektrické cívky navinuté na feromagnetickém nástavci nastavené vzdálenosti D od vzorku z kompozitního materiálu platí pro komplexní impedanci $\hat{Z}$ v exponenciálním tvaru výraz

$$Z_0\big|_{f_r} = \frac{\left\| \hat{E} \right\|}{\left\| \hat{H} \right\|} \angle \varphi_0 \ , \varphi_0 \cong 0 \ . \tag{8}$$

A pro složkový tvar je komplexní impedance zapsána ve tvaru

$$\hat{Z}_0\big|_{f_r} = Z_{0,Re} + jZ_{0,Im}, \forall f = f_r \ platí \ Z_{0,Im} \cong 0 , \tag{9}$$

kde $Z_{0,Re}, Z_{0,Im}$ jsou reálná složka a imaginární složka komplexní impedance $\hat{Z}$ a zároveň platí úměra

$$Z_{0,Re} \cong \frac{P}{I^2}, \tag{10}$$

kde P je ztrátový elektrický výkon v oblasti s objemem V v měřené části kompozitního materiálu, I je modul elektrických proudů uzavírajících se v měřené oblasti vzorku kompozitního materiálu (vířivé proudy).

Pokud se s nastavením celého rezonančního systému nenacházíme v oblasti rezonance, potom se komplexní impedance $\hat{Z}$ změní a platí

$$Z_0\big|_{f \neq f_r} = \frac{\left\|\hat{\boldsymbol{E}}\right\|}{\left\|\hat{\boldsymbol{H}}\right\|} \angle\varphi_0 \,,\, \varphi_0 \neq 0 \quad . \tag{11}$$

Ke změně rezonance i pro nastavenou frekvenci f_r dojde právě tím, že vzhledem k nastavenému referenčnímu stavu s definovaným objemem V a rozložením složek monitorovaného vzorku se při shodných vzdálenostech D změnil v jeho monitorované oblasti objem nebo rozložení feromagnetických vláken anebo objem i rozložení feromagnetických vláken. Ztrátový elektrický výkon P je vázán na plošnou hustotu činného výkonu z výrazu (5) podle následujícího vztahu

$$P = \int_{S_{jha}} \left|\hat{\boldsymbol{\Pi}}\right| \bullet d\,\boldsymbol{S}\,, \tag{12}$$

ve kterém je $d\boldsymbol{S}$ vektor elementu plochy povrchu měřené části vzorku kompozitního materiálu.

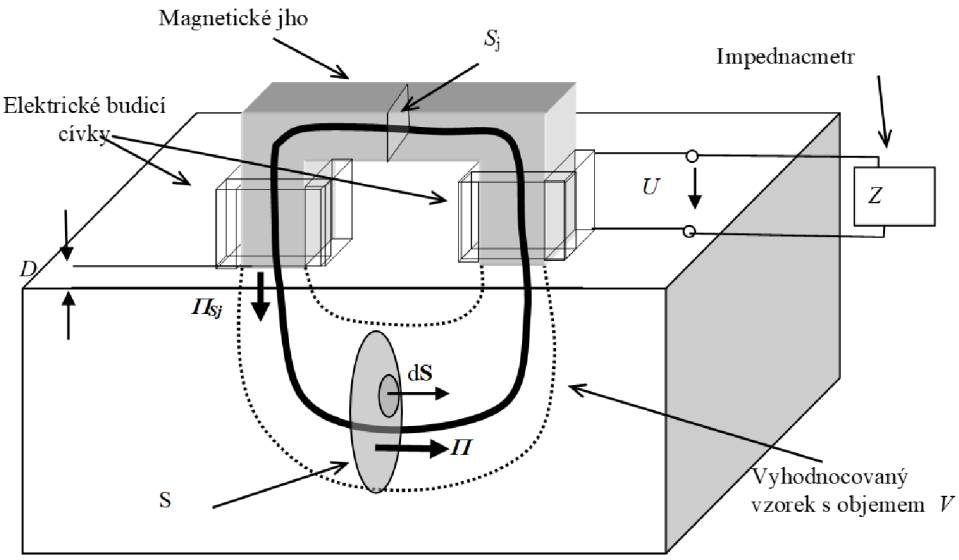
Pomocí takto vyjádřených vazeb z výrazů (4) až (12) lze nalézt korelace a kalibrovat a vyhodnocovat jednotlivé parametry požadovaných vlastností vzorků kompozitního materiálu, například hustotu složek, jejich orientaci a rovnoměrnost rozložení. Nastavení frekvence f měřiče impedance je výhodné pro rezonanci $Q_{0,5} = \frac{1}{2}Q_{max}$ podle Obr. E-6-2, která vede k velmi citlivému nastavení detekce, vhodného pro vyhodnocení rozložení složek kompozitního materiálu vzhledem k jeho rovnoměrnosti.

Nastavení frekvence f měřiče pro rezonanci $Q_{sq2} = \frac{1}{\sqrt{2}}Q_{max}$, vede k méně citlivému snímání nerovnoměrného rozložení složek kompozitního materiálu, ale je naopak vhodné na vyhodnocení hustoty sledované složky ve vzorku kompozitního materiálu, což jsou feromagnetické nebo feromagnetické a elektricky vodivé útvary. Nastavení frekvence f měřiče impedance pro rezonanci $Q_{sq3} = \frac{1}{\sqrt{3}}Q_{max}$ je vhodné

pro přesné vyhodnocení koncentrace sledované složky ve vzorku kompozitního materiálu [71].

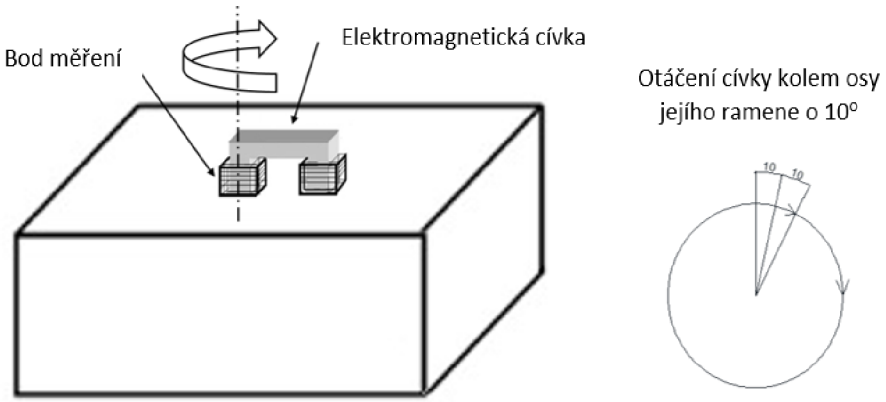
Metodika vyhodnocení veličin popsané magnetické impedanční tomografie pro vyhodnocení rozložení a orientace feromagnetických elektricky vodivých vláken v kompozitním materiálu je následující:

V prvním kroku se elektrická cívka nastaví na frekvenci *f* odpovídající rezonanci $Q_{sq3} = \frac{1}{\sqrt{3}} Q_{max}$. Poté se v poloze definované vzdáleností *D* od povrchu monitorovaného vzorku kompozitního materiálu zaznamená komplexní impedance $\hat{Z}$ jak ve složkovém tak exponenciálním tvaru Obr. E-6-6.



Obr. E-6-6 Schéma metody NDT založené na impedanci: vyhodnocení testovaných parametrů vzorku [13]

V druhém kroku se provede změna polohy pootočením podél osy jednoho z ramen feromagnetického nástavce o nastavený úhel Obr. E-6-7 a provádí



Obr. E-6-7 Schéma metodiky měření pomocí elektromagnetické cívky [13]

se měření a záznam komplexní impedance $\hat{Z}$ jak ve složkovém tak exponenciálním tvaru. Ve třetím kroku se provede změna polohy a záznam podle druhého kroku a opakuje se měření a záznam komplexní impedance $\hat{Z}$ jak ve složkovém tak exponenciálním tvaru pro celkový úhel 360°.

Ve čtvrtém kroku se z výsledků podle prvního až třetího kroku vyhodnotí objemová hustota sledované složky vzorku kompozitního materiálu dle (6) a (8), což jsou feromagnetické nebo feromagnetické a elektricky vodivé útvary v měřeném místě – bodu měření.

V pátém kroku se pak nastaví frekvence *f* měřiče impedance tak, aby rezonance odpovídala $Q_{0,5} = \frac{1}{2} Q_{max}$ pro shodné místo a vzdálenost *D* jako u předchozích kroků 1 – 5 a provede se měření podle druhého a třetího kroku. Z takto zaznamenaných údajů se vyhodnotí homogenita rozložení složek vzorku kompozitního materiálu v bodu měření 1 a 2, dále se vyhodnotí orientace feromagnetických nebo feromagnetických a elektricky vodivých útvarů. Tyto výsledky komplexní impedance $\hat{Z}$ jak ve složkovém tak exponenciálním tvaru se graficky zobrazí v polárních souřadnicích.

V šestém kroku se elektrická cívka nastaví na frekvenci *f* tak, aby frekvence *f* budícího signálu vytvořila podmínky odpovídající rezonanci $Q_{0,5} = \frac{1}{2} Q_{max}$. Poloha elektrické cívky navinuté na feromagnetickém nástavci se posune do nového bodu měření vzhledem k nastavení podle prvního kroku, a to vzdálenosti *dX* a *dY* v použitém souřadnicovém systému, kde *dX* a *dY* jsou nastaveny na *dX* = *A* a *dY* = *B*. Vzdálenosti *dX* a *dY* jsou orientovány vzhledem k povrchu monitorovaného vzorku kompozitního materiálu, a to při zachování vzduchové mezery v definované vzdálenosti *D* od povrchu monitorovaného vzorku kompozitního materiálu. Provede se záznam komplexní impedance $\hat{Z}$ jak ve složkovém, tak exponenciálním tvaru. Následuje posun o vzdálenosti *-dX*, *dY* ; *dX*, *-dY* ; *-dX*, *-dY* vzhledem k předchozí poloze elektrické cívky a provede se záznam komplexní impedance $\hat{Z}$ jak ve složkovém, tak exponenciálním tvaru. Z takto provedených měření se provede zpřesněné vyhodnocení koncentrace a objemu *V* sledované složky v testovaném vzorku materiálu. Načež se ze zjištěných záznamů komplexní impedance $\hat{Z}$vypočte její střední hodnota.

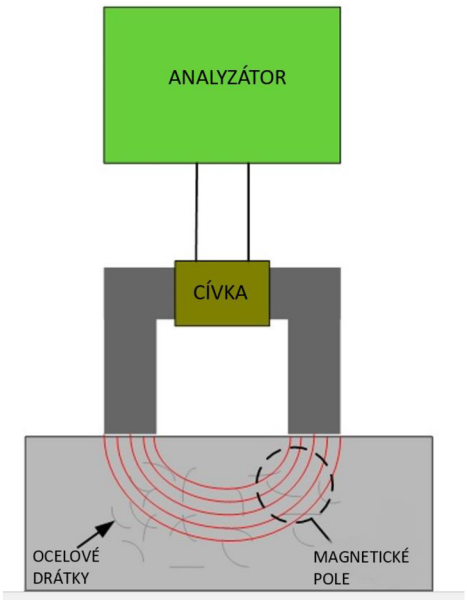
V posledním sedmém kroku následuje nastavení nové polohy, která má být ve směru souřadnice *x* souřadnicového systému rozdílná minimálně o vzdálenost větší než *C+2A* na základě rozměrů feromagnetického nástavce. Po nastavení nové polohy se provede měření a vyhodnocení veličin podle prvního až šestého kroku. Takto se získá číselná a grafická podoba vyhodnocení rozložení, hustoty a orientace sledované složky testovaného vzorku kompozitního materiálu. Takto se získá číselná i grafická podoba vyhodnocení rozložení, hustoty a orientace sledované složky testovaného vzorku kompozitního materiálu.

Navržená metoda přináší řešení metodického vyhodnocení rovnoměrného rozptýlení feromagnetických elektricky vodivých vláken, vyhodnocení jejich prostorového seskupení, orientace a objemovou hustotu v měřené oblasti. Výhodou navrhované metodiky měření je, že umožňuje jak změnu citlivosti zařízení při stejných podmínkách nastavení měřicího systému, tak nastavení pro specifické typy kompozitních materiálů [13, 72, 73].

7. Koncept navrženého měřicího zařízení

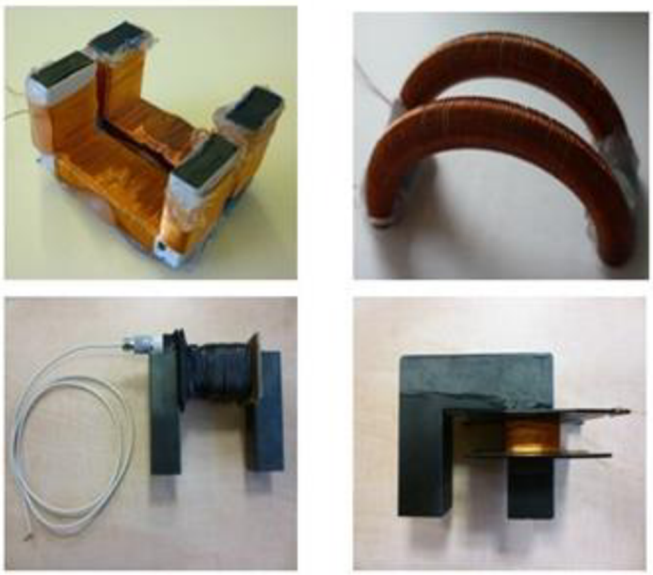
Testy metodiky podle výše popsaných bodů byly prováděny laboratorně. Na Obr. E-7-8 je znázorněno schéma a samotné testování vzorku kompozitu vyrobeného pro testování navrženou NDT magnetickou impedanční tomografií.

Slouží k ověření vlastností navržené metody a metodiky, její přesnosti a nalezení možných jevů, které nebyly dosud popsány. Byla provedena řada měření a hledal se vhodný magnetický obvod, frekvence, rozměr pro zachycení parametrů kladené si v cíli dizertační práce. Byly experimentálně navrženy magnetické nástavce Obr. E-7-1 a pro naladění frekvence v rozsahu 0 – 10 MHz, 50 – 100 kHz, 0 – 40 MHz, 0 – 450 kHz. Podle navržené metodiky se vyhodnotí impedance $\hat{Z}$ ve složkovém a exponenciálním tvaru pro jeden měřený bod [72, 74].



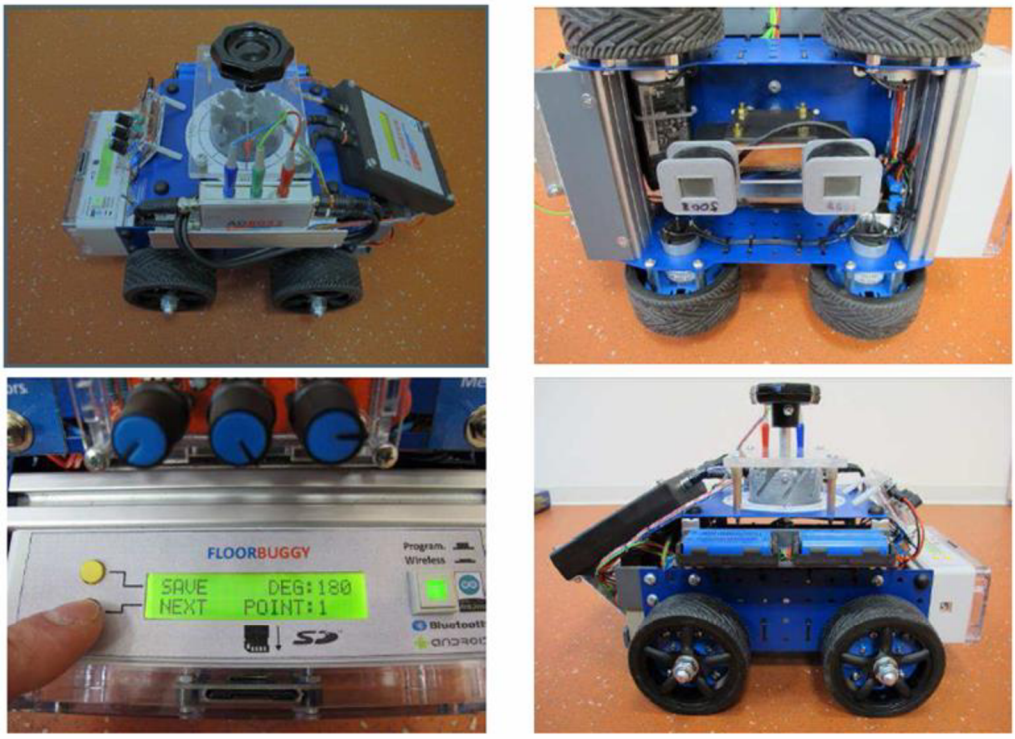
Obr. E-7-1 Elektrické schéma NDT metody

Slouží k ověření vlastností navržené metody a metodiky, její přesnosti a nalezení možných jevů, které nebyly dosud popsány. Byly experimentálně navrženy magnetické nástavce Obr. E-7-2 a pro naladění frekvence v rozsahu 0 – 10 MHz, 50 – 100 kHz, 0 – 40 MHz, 0 – 450 kHz. Podle navržené metodiky se vyhodnotí impedance $\hat{Z}$ ve složkovém a exponenciálním tvaru pro jeden měřený bod [72, 74].



Obr. E-7-2 Navrhované typy cívek, magnetické jho

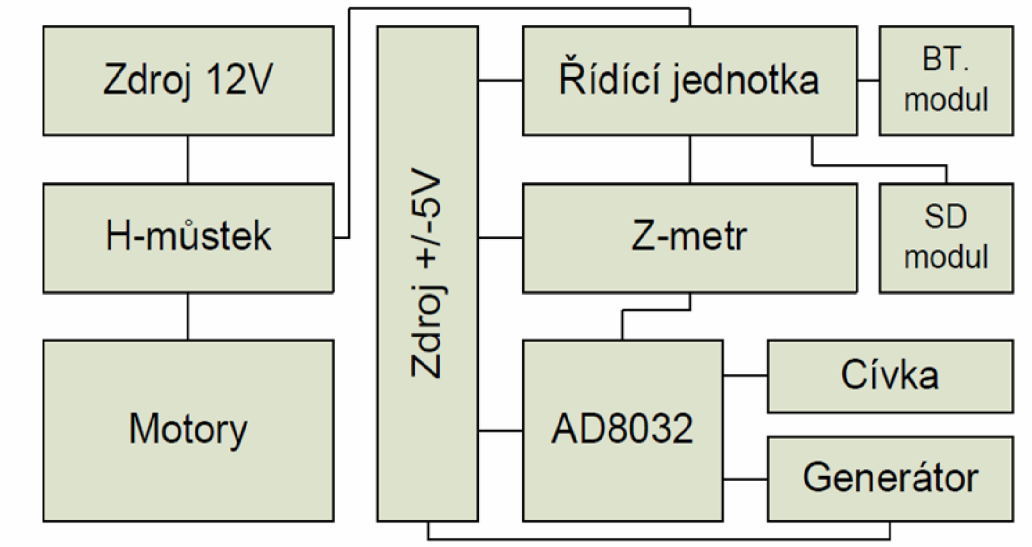
Po provedených laboratorních testech a hledání vhodných frekvencí v laboratořích Ústavu experimentální elektrotechniky byl navržen a realizován měřicí systém koncipován jako dálkově řízené vozítko s ručním ovládáním. Dálkové řízení je možné pomocí tabletu. Měřící cívka je zabudována ve středu mechanické



Obr. E-7-3 Měřící vozítko – celkový náhled, upevnění elektromagnetické cívky, ovládací panel [74]

konstrukce a lze s ní otáčet kolem své vlastní osy pomocí velkého ovládacího prvku na horní stěně přístroje. Celý systém je zobrazen na Obr. E-7-3 [75].

Zapojení měřicího systému se skládá z několika analogových a digitálních bloků, které jsou zobrazeny na Obr. E-7-4 i s následným popisem jednotlivých bloků.



Obr. E-7-4 Blokové schéma systému [75]

Zdroj 12V – slouží pro napájení H-můstku, který ovládá motory, skládá se z hermeticky uzavřené gelové baterie, kterou je možné dobíjet pomocí konektorů v zadní části vozítka, aktivace pomocí přepínače „Power Motors“

Zdroj +/-5V – slouží pro napájení analogových a digitálních obvodů, skládá se ze 4 ks Li-Ion akumulátorů, které je třeba nabíjet zvlášť externí nabíječkou, aktivace pomocí přepínače „Power Measure“

Motory – 4ks motorů s převodovkou slouží pro pohyb vozítka

H-můstek – slouží pro výkonové řízení motorů

Řídící jednotka – přijímá data ze Z-metru a ukládá je na připojenou SD kartu, dále přijímá pomocí připojeného bluetooth modulu data z tabletu a vysílá data na H-můstek pro ovládání motorů, dále disponuje dvěma žlutými ovládacími tlačítky „SAVE“ a „NEXT“ pro ukládání dat a jedním zeleným tlačítkem

pro přepínání režimu „Programování/Wireless“, stav programu zobrazuje na LCD displeji

BT modul – bezdrátový bluetooth modul HC-06 pro komunikaci mezi tabletem a řídící jednotkou

SD modul – modul pro připojení standardní SD karty pro ukládání dat

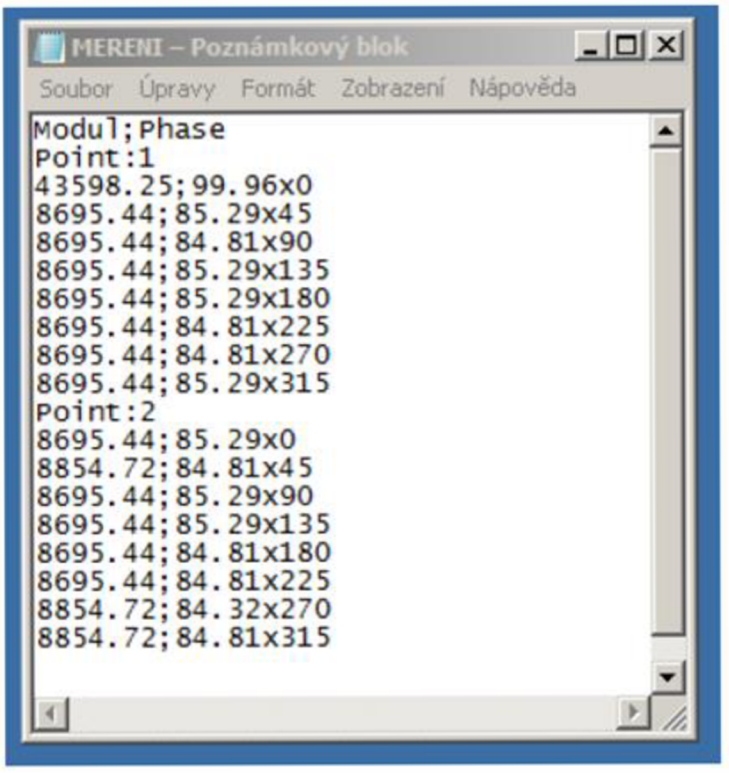
AD8032 – analogová jednotka, která měří impedanci připojení měřící cívky, výslednou hodnotu modulu a fáze reprezentuje napětí, které posílá ke zpracování do Z-metru, ke své funkci využívá generátor sinusového průběhu napětí

Z-metr – převádí napětí z jednotky AD8032 na hodnotu modulu a fáze impedance a zobrazuje je na LCD displeji, tyto data rovněž posílá do řídící jednotky

Generátor – zdroj pomocného sinusového průběhu napětí pro analogovou jednotku AD8032, nastavení signálu lze provádět pomocí otočných prvků „Amp“ (amplituda), „Fine“ (jemné nastavení kmitočtu), „Coarse“ (hrubé na stavení kmitočtu), oblast nastavení kmitočtů se volí pomocí „jumperu“ v rozmezích 1-10Hz, 10-100Hz, 100-3kHz, 3kHz-65kHz a 65kHz-1MHz

Cívka – měřící cívka s 2x 500 závity na souměrných kostřičkách na obou koncích feromagnetického jha

Používání měřicího systému spočívá v několika krocích. Po zapnutí přístroje je nezbytné nastavit vhodný kmitočet pro měřicí cívku. Výchozí pozice pro měření impedance je při nastavení měřící cívky na 0^{O}. Na impedance-metru je zobrazována aktuální hodnota impedance, 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. Naměřené data poté jsou exportována z SD karty k následnému vyhodnocení Obr. E-7-5 [75].



Obr. E-7-5 Ukázka uložených dat na SD kartě [75]

8. NDT metodika hodnocení drátkobetonu

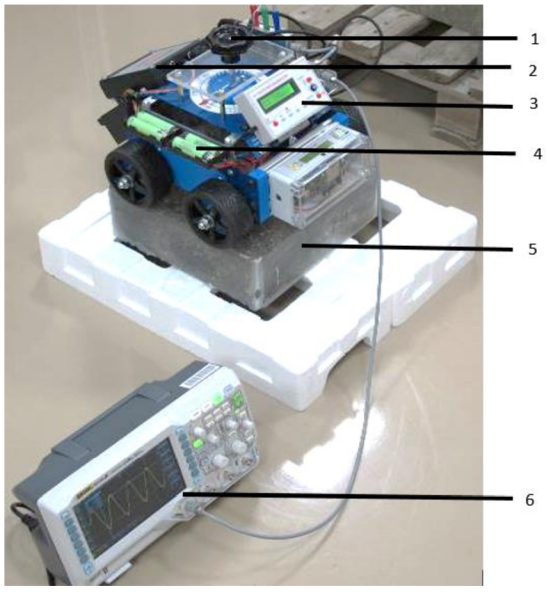
V předchozích kapitolách je podrobně popsán návrh metodiky a měřicího zařízení sestrojeného na Ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky Fakulty elektrotechniky VUT v Brně. Během laboratorních testů však došlo k drobným změnám, ať už ve volbě nastavení frekvence rezonance či metodickému postupu měření. Pro jednotlivá měření bylo zvoleno celkem 5 frekvencí rezonance, a tím i odlišná hodnota kapacity v elektrickém obvodu, viz Tab. E-8-1.

Tab. E-8-1 Hodnoty frekvence a kapacity pro 5 variant nastavení elektrického obvodu

Nastavení el. obvodu	1	2	3	4	5
f_r [kHz]	328,6	146,0	50,12	21,90	3,450
c [μF]	$150{,}0 \times 10^{-6}$	$1{,}0 \times 10^{-3}$	$10{,}0 \times 10^{-3}$	$50{,}8 \times 10^{-3}$	2,0

K sestavě elektromagnetické cívky v krytu, na kterém je připojen impedance metr, je připojen i externí osciloskop. Celá sestava je zobrazen na Obr E-8-1.

Přístroj je přikládán k povrchu zkušebního tělesa, které by mělo mít minimální



Obr. E-8-1 Sestava měřicího přístroje s externě připojeným osciloskopem

1 – otočné madlo připojené k cívce; 2 – impedancemeter; 3 – řídící jednotka; 4 – zdroj; 5 – zkušební těleso; 6 - osciloskop

rozměry rovny délce magnetického nástavce, na kterém je cívka vinuta. Pro eliminaci

okrajových vlivů je lepší volit zkušební tělesa větších rozměrů. Po uložení přístroje na zkušební těleso je nastavena zvolená frekvence rezonance a kapacita elektrického obvodu. Na řídící 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_{φ} 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 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_{φ} testovaného tělesa, určených z rovnic

$$Z_m = \frac{Z_i + Z_{i+16}}{2}, \tag{13}$$

$$\varphi = \frac{\varphi_i + \varphi_{i+16}}{2}, \tag{14}$$

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

$$U = \frac{U_i + U_{i+16}}{2}, \tag{15}$$

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

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C}, \tag{16}$$

kde C je kapacita kondenzátoru a ω úhlová frekvence. Z rozdílu hodnot

$$Z_L = Z - Z_c \tag{17}$$

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

$$P = \boldsymbol{Re}\left\{\frac{U^2}{Z_L}\right\} \tag{18}$$

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

$$k_v = \frac{4\pi(dP - dP_{fant})}{U^2}, \tag{19}$$

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 ρ_{Fe}, ze kterých jsou sledovaná drátky vyrobena je určena jejich koncentrace ρ_{sam} ve sledovaném objemu v kg/m^3:

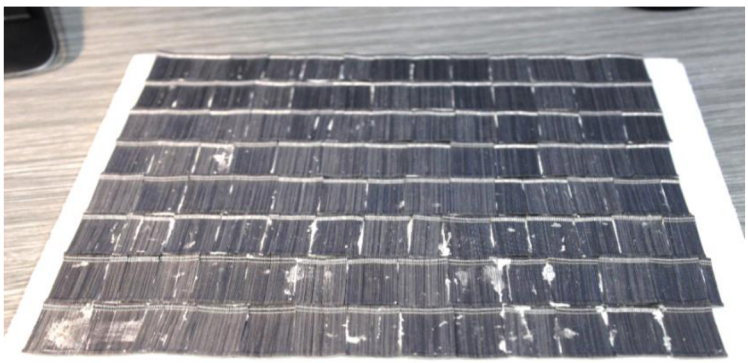
$$\rho_{sam} = \rho_{Fe} * k_v . \tag{20}$$

Pro každé zkušební těleso jsou naměřené hodnoty zpracovány graficky. Z grafického vyhodnocení je možné vyvozovat převážný směr ocelových vláken v kompozitu. Ocelové drátky je možné považovat za jednorozměrná, jelikož $l \gg d$. Jejich uložení v kompozitu tudíž má vliv na výslednou intenzitu vzniklého elektromagnetického pole. Jsou-li drátky převážně uloženy v jednom směru, je tato skutečnost rozpoznatelná na grafickém vyhodnocení měřených fyzikálních veličin popisujících elektromagnetické pole.

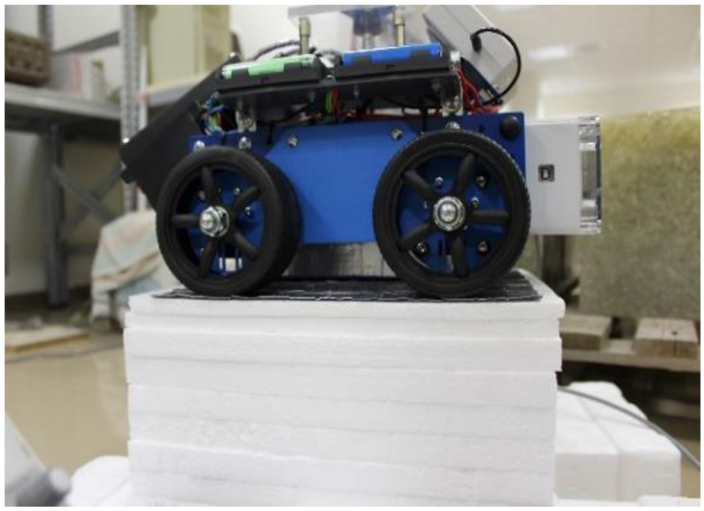
F. KALIBRACE NAVRŽENÉ METODIKY A METODY NDT

9. Testování dosahu elektromagnetické cívky

Při testování nového zařízení bylo z počátku snahou prokázat dosah vytvářeného elektromagnetického pole zapojením elektromagnetické cívky do elektrického obvodu a tím prokázat správnost nastavení měřící sestavy. Bylo voleno 5 rezonančních frekvencí – f_{r1} =327,0 kHz, f_{r2} = 146,0 kHz, f_{r3} = 50,12 kHz, f_{r4} = 21,90 kHz, f_{r5} = 3,450 kHz za předpokladu odlišené citlivosti měření a hlavně maximální hloubky dosahu elektromagnetického pole. Pro všech 5 variant nastavení měřicího přístroje byl testován dosah pomocí elektromagneticky nevodivého materiálu – polystyrenových desek tloušťky 1 cm Obr. F-9-1. Mezi desky byl vkládán



Obr. F-9-1 Polystyrenová deska s upevněnými ocelovými vlákny (fantomový vzorek pro test dosahu nastavení metody)



Obr. F-9-2 Testování dosahu elektromagnetické cívky pro různá nastavení pomocí polystyrenových desek

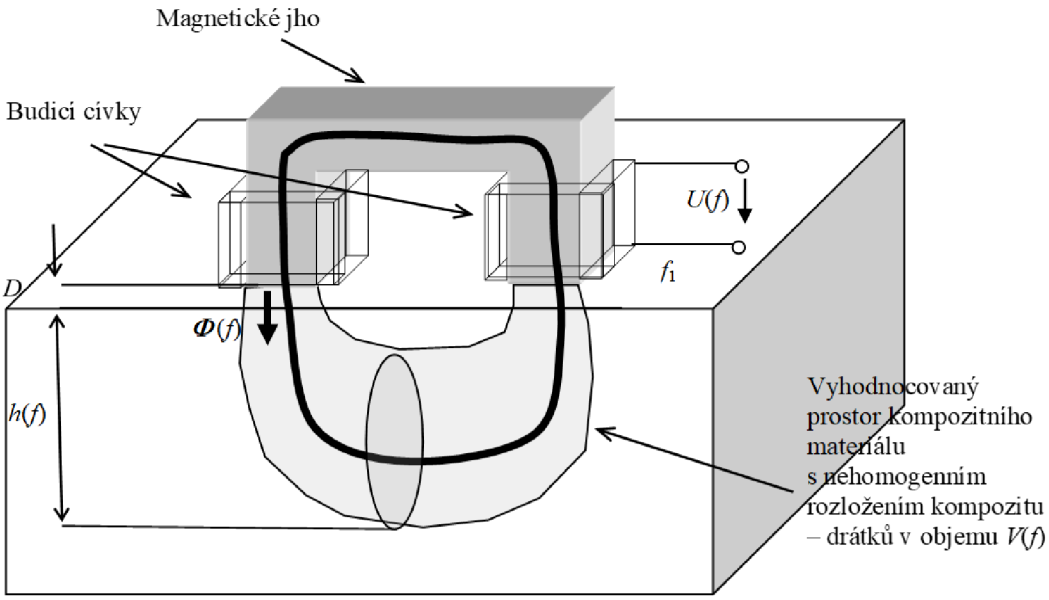
plát z ocelových drátků Obr. F-9-2 v jednotlivých hloubkách po 1 centimetru až do vzdálenosti 10 cm.

V průběhu měření byly odečítány hodnoty modulu Z a fáze impedance f_i z impedancmetru připojeného k přístroji a také hodnota napětí U z osciloskopu, který je externí součástí měřicí soustavy, Obr. F-9-2. Během testování stanovení dosahu elektromagnetické cívky při jednotlivých nastavení volené frekvence rezonance byly porovnávány dílčí odečítané hodnoty popisující elektromagnetické pole, nikoli stanovení výpočtové hodnoty objemové hustoty ocelových vláken v daném objemu. Prvotním předpokladem bylo, že při vyšších frekvencích zasahuje aktivní část elektromagnetického pole vrstvy blízké povrchu vzorku a s klesající frekvencí se hloubka vzorku zvyšuje, avšak nepřekročí hranici danou roztečí jha (rozměr C dle Obr. E-6-1). Citlivost měřicího přístroje je dán nastavením rezonanční frekvence pro vybraný testovaný vzorek, popsaný v kapitola6 této práce. Maximální tloušťka zkušebního tělesa 10 centimetrů byla zvolena s ohledem na rozměr feritového nástavce elektromagnetické cívky, rozměr C = 120 mm. Podle dříve

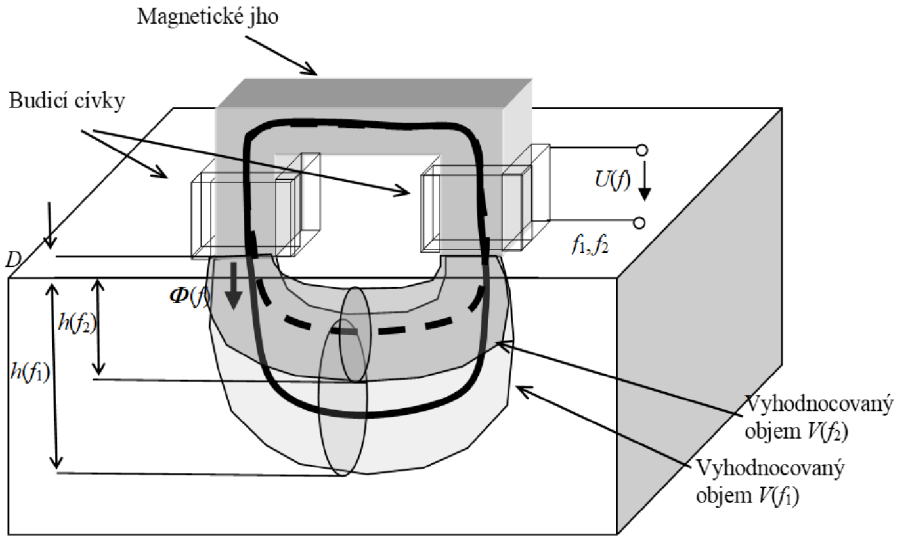
Obr. F-9-3 Měření hmotnosti testovacích materiálů fantomového kompozitního vzorku –polystyrenové desky a drátková plná vrstva

známých experimentů se předpokládá, že účinný dosah elektromagnetického pole by měl být roven vzdálenosti ramen nástavce elektromagnetické cívky C.

Bylo provedeno měření hmotnosti fantomu „testovacího kompozitu - polystyrenová deska“ Obr. F-9-3. Deska byla rozměru 300 x 300 x 10 mm, hmotnost desky s drátky byla $m_{d\text{-}d}$ = 330 g, hmotnost desky bez drátků byla $m_{d\text{-}0}$ = 15 g, a hmotnost desky bez drátků s rozměry 300 x 300 x 20 mm je $m_{d\text{-}20}$ = 30 g.



Obr. F-9-4 Schéma závislosti testovaného objemu materiálu na frekvenci f budicího signálu [9], pro frekvenci f_1



Obr. F-9-5 Schéma vyhodnocení závislosti testovaného objemu materiálu na frekvenci f budicího signálu, pro frekvence $f_1 < f_2$

na dosažitelných parametrech vzdálenosti a dosahu u měřeného vzorku kompozitního materiálu a srovnat s fantomovými měřeními navržené struktury Obr. F-9-1, Obr. F-9-3. V měřicím procesu vyhodnocování komplexní impedance Z popsaném výše a metrologicky nastaveném zejména v kapitole 8 se projevují dva jevy elektromagnetického pole. Protože byly použity drátky z magneticky vodivého materiálu s relativní permeabilitou μ_{rc} a zároveň elektricky vodivého s měrnou elektrickou vodivostí γ_c je vyhodnocená impedance $Z(f)$ a její složky tvořena jevem:

1. Magnetické vodivosti s hlavním parametrem relativní permeability μ_{rc} a vyjádřena magnetickým odporem R_m,
2. Elektrickými vířivými proudy s hlavním parametrem měrnou elektrickou vodivostí γ_c vyjádřené magnetickou intenzitou H a reakčním magnetickým polem s intenzitou H_c.

Oba jevy lze postupně popsat pro uvedenou konfiguraci testu z obr. F-9-4. V něm jsou hodnoty magnetických odporů R_{mFe1-3}, R_{mv1-2}, R_{mx} označeny magnetické odpory částí na cestě uzavřeného magnetického toku $\phi(t)$, feritovým jhem, vzduchem a kompozitní fantomovou strukturou. Potom lze vyjádřit jejich vztahy pro magnetické odpory jako:

$$R_{mFe1}=\frac{1}{\mu_0\mu_{rFe}}\frac{x_1}{S_j} \qquad R_{mFe2}=\frac{1}{\mu_0\mu_{rFe}}\frac{x_2}{S_j},\ R_{mFe3}=\frac{1}{\mu_0\mu_{rFe}}\frac{x_2}{S_j},\ R_{mv1}=\frac{1}{\mu_0}\frac{D+H_V}{S_j};T_f \ll H_V,$$

$$R_{mv2}=\frac{1}{\mu_0}\frac{D+H_V}{S_j};T_f \ll H_V,\ R_{mx}=\frac{1}{\mu_0\mu_{rc}}\frac{T_f}{S_j}, \tag{21}$$

kde μ_0 je permeabilita vakua, μ_{rFe} je relativní permeabilita magnetického (feritového) jha, S_j je průřez magnetického jha (Obr. E-6-7), T_f je tloušťka fantomové struktury, $x_{1,2}$, D, H_V, jsou rozměry rozložení v Obr. F-9-6 a Obr.F-9-7. Potom celkový magnetický odpor R_m je možné zapsat ve tvaru:

$$R_m=R_{mFe1}+R_{mFe2}+R_{mFe3}+R_{mv1}+R_{mv2}+R_{mx},$$

$$R_m=\frac{1}{\mu_0\mu_{rFe}}\frac{x_1+2x_2}{S_j}+\frac{2}{\mu_0}\frac{D+H_V}{S_j}+\frac{1}{\mu_0\mu_{rc}}\frac{T_f}{S_j},$$

$$R_m=\frac{1}{\mu_0 S_j}\left(\frac{x_1+2x_2}{\mu_{rFe}}+2\left(D+H_V\right)+\frac{T_f}{\mu_{rc}}\right). \tag{22}$$

Pro mantický tok platí:

$$\Phi = \frac{\left(N_1 + N_2\right) I}{R_m},$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 S_j \left(N_1 + N_2\right) I}{\frac{x_1 + 2x_2}{\mu_{rFe}} + 2\left(D + H_V\right) + \frac{T_f}{\mu_{rc}}},$$

a při uvažování μ_{rFe} >>1 je tok:

$$\Phi = \frac{\mu_{rc}\mu_0 S_j \left(N_1 + N_2\right) I}{2\mu_{rc}\left(D + H_V\right) + T_f}. \tag{23}$$

Potom indukované napětí v cívkách jha je možné psát jako:

$$U_{iFe}\left(t\right) = -\mu_{rc}\mu_0 S_j \left(N_1 + N_2\right) \frac{\partial \frac{I\left(t\right)}{2\mu_{rc}\left(D + H_V\right) + T_f}}{\partial t}. \tag{24}$$

Elektrická impedance s efektem magnetické vodivosti materiálu je pak vyjádřena jako:

$$\hat{Z}_{Fe} = \frac{\hat{u}_{iFe}}{\hat{i}},$$

$$\hat{Z}_{Fe} = \frac{-\mu_{rc}\mu_0 S_j \left(N_1 + N_2\right) \frac{\partial \frac{\hat{i}}{2\mu_{rc}\left(D + H_V\right) + T_f}}{\partial t}}{\hat{i}}$$

$$\hat{Z}_{Fe} = \mu_{rc}\mu_0 S_j \left(N_1 + N_2\right) \frac{\mathrm{j}\omega}{2\mu_{rc}\left(D + H_V\right) + T_f}. \tag{25}$$

Pro případ vyhodnocení efektu pouze se zahrnutím vířivých elektrických proudů je možné vyjádřit budicí magnetický tok:

$$\Phi_b = \iint_S \mu_0 \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{S}, \tag{26}$$

kde *H* je z budicího elektrického proudu vyjádřeno pro rozměry magnetického jha *A*, *B* z Obr. E-6-1 jako:

$$H = \frac{\left(N_1 + N_2\right) I\left(t\right)}{2\left(A + B\right)}, \tag{27}$$

$$\Phi_b = \iint_S \mu_0 \frac{\left(N_1 + N_2\right) I\left(t\right)}{2\left(A + B\right)} dS.$$

Tento budicí magnetický tok při dopadu na elektricky vodivé prostředí (složka fantomového kompozitního materiálu, Obr.F-9-3, Obr.F-9-7) vyvolá vířivé proudy a indukované magnetické pole s magnetickým tokem

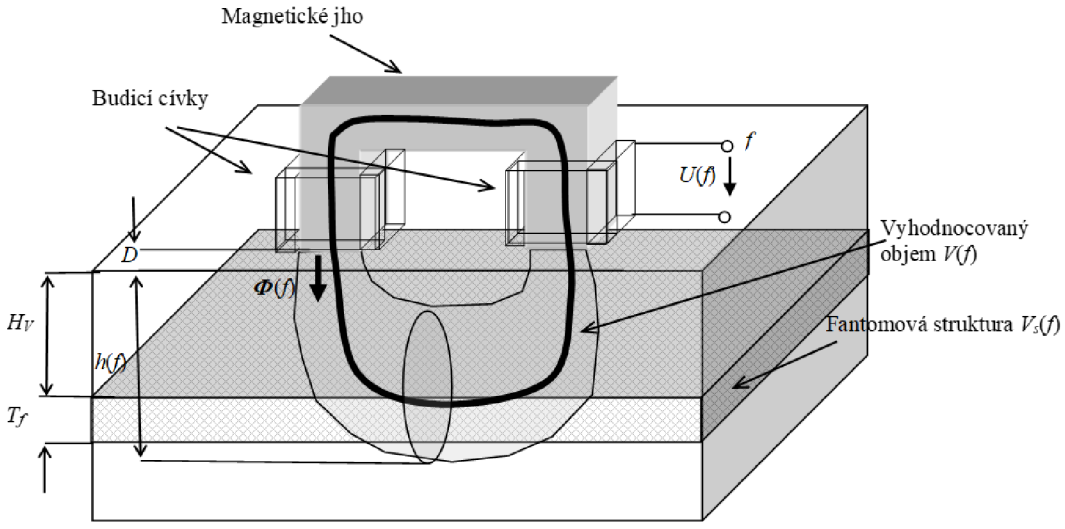
$$\Phi_i = \iint_{S_v} \mu_0 \, \boldsymbol{H}_i \cdot d\,\boldsymbol{S}\,, \tag{28}$$

a na elektricky vodivém prostředí (s měrnou elektrickou vodivostí γ_c) se může z Ohmnova zákona v diferenciálním tvaru vyjádřit intenzita elektrického pole $E(t)$ jako:

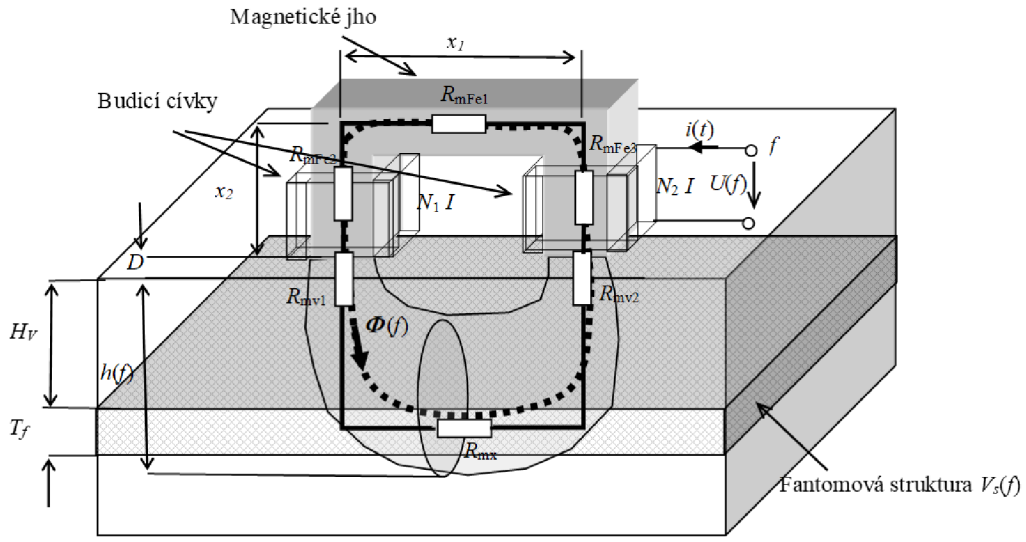
$$\boldsymbol{E}\left(t\right) = \frac{1}{\gamma_c}\boldsymbol{J}\left(t\right). \tag{29}$$

$$U_{i,v} = -\frac{d\left(\Phi_b + \Phi_i\right)}{dt} \tag{30}$$

Indukované elektrické napětí na uzavřené dráze vířivých proudů, Obr.F-9-6 je:



Obr. F-9-6 Schéma nastavení fantomové desky pro vyhodnocení závislosti testovaného objemu materiálu na frekvenci f budicího signálu



Obr. F-9-7 Schéma nastavení fantomové desky pro vyhodnocení závislosti testovaného objemu materiálu na frekvenci f pro závislost na magnetické vodivosti komponentu kompozitního materiálu

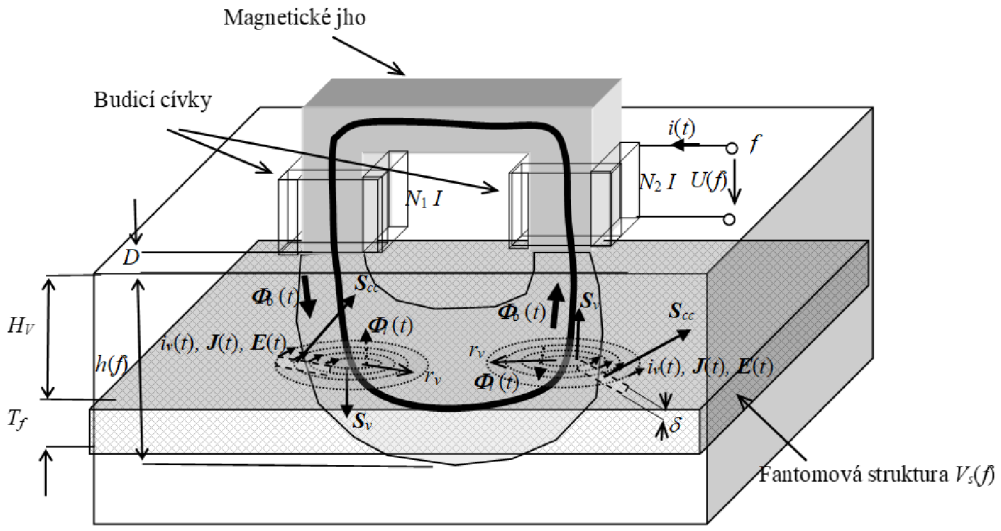
a potom z relací (26) - (29) je:

$$U_{i,v} = -\frac{\partial\left(\iint_S \mu_0 \boldsymbol{H}_b \cdot d\boldsymbol{S} + \iint_S \mu_0 \boldsymbol{H}_i \cdot d\boldsymbol{S}\right)}{\partial t}, \tag{31}$$

$$\boldsymbol{H}_i \ell = -\iint_{S_{cc}} \boldsymbol{J} \cdot d\boldsymbol{S},$$

kde ℓ je délka křivky uzavírající se smyčky vířivého proudu $I_V(t)$. Pro uzavřenou smyčku s poloměrem r_v, kterou prochází proud $I_V(t)$ je intenzita magnetického pole v ose smyčky

$\boldsymbol{H}_i(t) = \frac{I_v(t)}{2r_v}\boldsymbol{u}_z$, potom indukované elektrické napětí v cívce senzoru



Obr. F-9-8 Schéma nastavení fantomové desky pro vyhodnocení závislosti testovaného objemu materiálu na frekvenci f pro závislost na elektrické vodivosti komponentu kompozitního materiálu (efekt vířivých proudů)

$$U_{i,v} = -\frac{\partial\left(\iint_S \mu_0 \frac{(N_1+N_2)I(t)}{2(A+B)}dS - \iint_{S_v} \mu_0 \frac{I_v(t)}{2r_v}dS\right)}{\partial t}$$ pro oblast blízkou jhu senzoru,

$$U_{i,v} = -\frac{\partial\left(\iint_{S_v} \mu_0 \frac{(N_1+N_2)I(t)}{2\pi r_v}dS - \iint_{S_v} \mu_0 \frac{I_v(t)}{2r_v}dS\right)}{\partial t}$$, pro oblast vzdálenou od jha senzoru (32)

$$U_{i,v} = -\frac{\mu_0}{2r_v}\frac{\partial\left(\frac{(N_1+N_2)I(t)}{\pi}S_v - I_v(t)S_v\right)}{\partial t},$$ (33)

potom elektrická impedance se zahrnutím vířivých proudů v testovaném materiálu je vyjádřena jako

$$\hat{Z}_v = \frac{\hat{u}_{iv}}{\hat{i}},$$

$$\hat{Z}_v = \frac{-\frac{\mu_0}{2r_v}\frac{\partial\left(\frac{(N_1+N_2)\hat{i}}{\pi}\hat{s}_v - \hat{i}_v\hat{s}_v\right)}{\partial t}}{\hat{i}}$$

$$\hat{Z}_v = -\frac{\mu_0}{r_v}\hat{s}_v\omega\left(\frac{\left(N_1+N_2\right)}{\pi}\right)+2\omega\frac{I_v}{I}\hat{s}_v . \tag{34}$$

Potom impedance závislá jak na vířivých proudech, tak na vodivosti feromagnetického materiálu je vyjádřena jako

$$\hat{Z} = \mu_{rc}\mu_0 S_j\left(N_1+N_2\right)\frac{\mathrm{j}\omega}{2\mu_{rc}\left(D+H_V\right)+T_f}-\frac{\mu_0}{r_v}\hat{s}_v\omega\left(\frac{\left(N_1+N_2\right)}{\pi}\right)+2\omega\frac{I_v}{I}\hat{s}_v \tag{35}$$

$$\hat{Z} = \mu_{rc}\mu_0 S_j\left(N_1+N_2\right)\frac{\mathrm{j}\omega}{2\mu_{rc}\left(D+H_V\right)+T_f}-\frac{\mu_0}{r_v}\hat{s}_v\omega\left(\frac{\left(N_1+N_2\right)}{\pi}\right) +2\omega\frac{\left(R_s+\mathrm{j}\omega L_s\right)}{\left(1+\mathrm{j}\omega\left(C_s+C_p\right)R_s-\omega^2\left(C_s+C_p\right)L_s\right)}\frac{\delta}{\gamma_c}\hat{s}_v , \tag{36}$$

Pro rezonanční stav systému jha a měřeného vzorku (režim navržené měřicí metody) se impedance zjednoduší na tvar

$$\hat{Z} = \mu_{rc}\mu_0 S_j\left(N_1+N_2\right)\frac{\mathrm{j}\omega}{2\mu_{rc}\left(D+H_V\right)+T_f}-\omega\mu_0\hat{r}_v\left(N_1+N_2\right) +2\pi\omega\frac{\delta}{\gamma_c}\frac{L_s\left(R_s^2+\omega^2L_s^2\right)}{\left(R_sL_s-\left(L_s-\left(C_0+C_p\right)R_s^2\right)\left(R_s+1\right)\right)}\hat{r}_v^2 , \tag{37}$$

kde C_p je hodnota kapacitou připojená paralelně k vinutí jha proto, aby se systém jha a měřeného vzorku kompozitu dostal do rezonančního stavu.

Potom pro stav rezonance je pro reálnou část komplexního vyjádření sdruženého výkonu S vztah možné zapsat jako výkon

$$P = \left(\begin{array}{l}\mu_{rc}\mu_0 S_j\left(N_1+N_2\right)\dfrac{\omega}{2\mu_{rc}\left(D+H_V\right)+T_f}-\omega\mu_0 r_v\left(N_1+N_2\right)\\ +2\pi\omega\dfrac{\delta}{\gamma_c}\left(\dfrac{L_s\left(R_s^2+\omega^2L_s^2\right)}{\left(R_sL_s-\left(L_s-\left(C_s+C_p\right)R_s^2\right)\left(R_s+1\right)\right)}-\mu_{rc}\mu_0 S_j\left(N_1+N_2\right)\dfrac{\omega}{2\mu_{rc}\left(D+H_V\right)+T_f}\right)r_v^2\end{array}\right)I^2 . \tag{38}$$

Průměrné hodnoty impedance a fáze pro jednotlivé frekvence rezonance v daných hloubkách jsou uvedeny v Tab. F-9-1 a Tab. F-9-2.

Tab. F-9-1 Průměrné hodnoty Z_φ se směrodatnými odchylkami pro jednotlivé frekvence v daných hloubkách umístění polystyrenového plátu s ocelovými drátky

Průměrné naměřené hodnoty fáze impedance Z_φ

	1 cm	*2 cm*	*3 cm*	*4 cm*	*5 cm*	*6 cm*	*7 cm*	*8 cm*	*9 cm*	*10 cm*
f_{r1}	18,5	6,2	34,8	45,0	49,1	51,8	51,6	54,6	54,0	53,1
f_{r2}	24,6	3,9	2,0	6,9	9,3	3,7	55,5	55,2	56,8	55,2
f_{r3}	32,3	11,3	7,7	0,8	7,2	10,4	11,9	16,1	18,6	21,4
f_{r4}	32,6	7,0	6,9	10,7	12,4	12,6	13,0	13,4	13,7	13,2
f_{r5}	16,4	13,4	13,6	15,0	13,9	15,1	14,6	13,6	14,2	14,0

Směrodatné odchylky naměřených hodnot fáze impedance Z_φ

f_{r1}	1,18	2,99	2,23	1,60	1,26	1,00	0,86	0.90	0,66	0,64
f_{r2}	0,78	1,16	1,08	1,05	0,81	1,04	0,62	0.66	0,62	0,00
f_{r3}	0,45	1,10	0,71	0,47	0,76	1,64	0,83	1.44	0,68	0,80
f_{r4}	0,87	0,99	0,76	0,69	0,40	0,44	0,32	0.40	0,42	0,21
f_{r5}	0,48	0,21	0,27	1,46	0,19	1,27	1,00	0.21	0,81	0,57

Tab. F-9-2 Průměrné hodnoty Z se směrodatnými odchylkami pro jednotlivé frekvence v daných hloubkách umístění polystyrenového plátu s ocelovými drátky

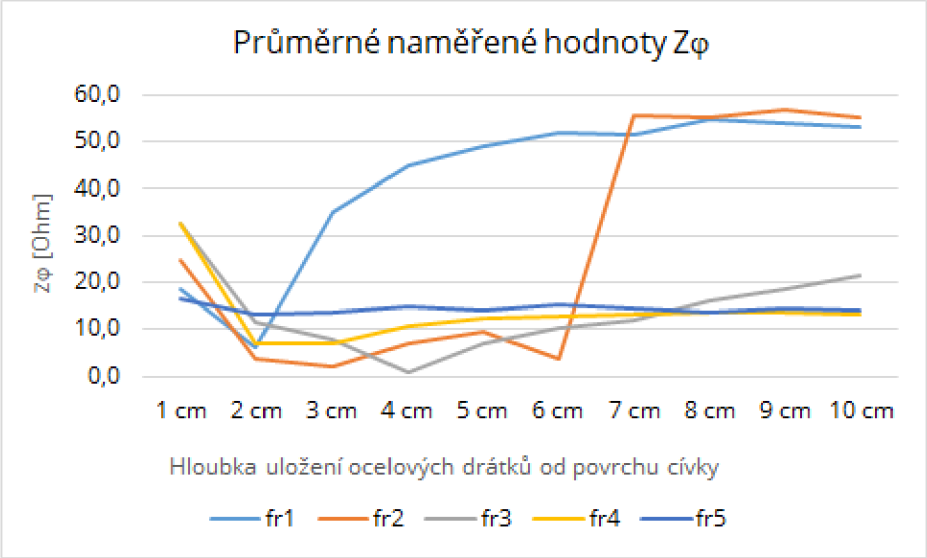
Průměrné naměřené hodnoty modulu Z

	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm	7 cm	8 cm	9 cm	10 cm
f_{r1}	96,51	58,78	53,65	58,11	57,03	57,99	59,27	59,27	61,50	61,04
f_{r2}	53,06	38,01	34,86	33,49	32,85	42,35	50,00	50,41	47,41	48,83
f_{r3}	22,8	51,32	39,57	27,07	28,44	29,76	28,83	27,44	25,95	24,53
f_{r4}	7,82	5,87	5,69	5,74	5,74	5,85	5,88	5,86	5,82	5,96
f_{r5}	2,38	2,39	2,38	2,34	2,37	2,43	2,35	2,41	2,38	2,38

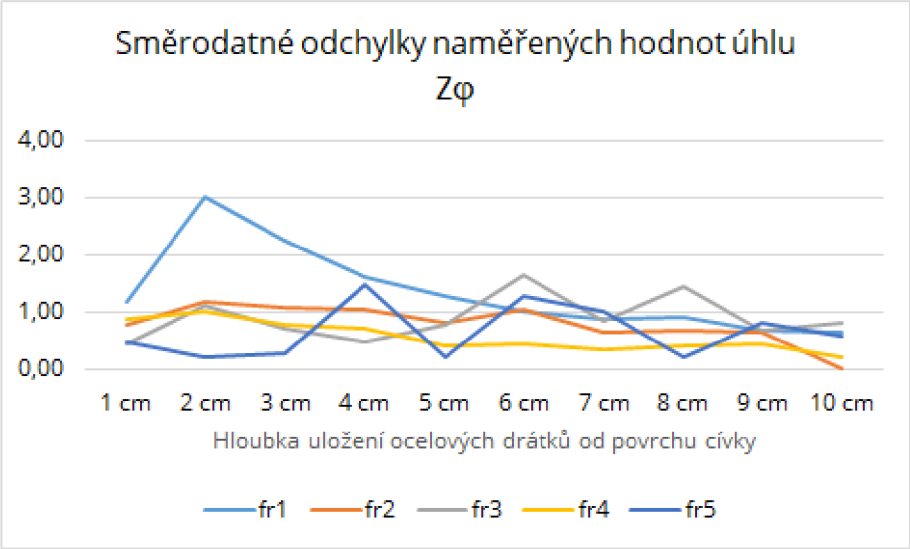
Směrodatné odchylky naměřených hodnot Z

f_{r1}	3,79	1,67	0,94	0,54	0,69	0,86	0,75	0,77	0,78	0,88
f_{r2}	1,50	0,66	0,38	0,24	0,27	1,33	1,06	1,30	0,95	0,88
f_{r3}	0,65	0,78	1,17	0,32	0,26	0,84	0,41	0,50	0,53	0,33
f_{r4}	0,27	0,18	0,04	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05
f_{r5}	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03

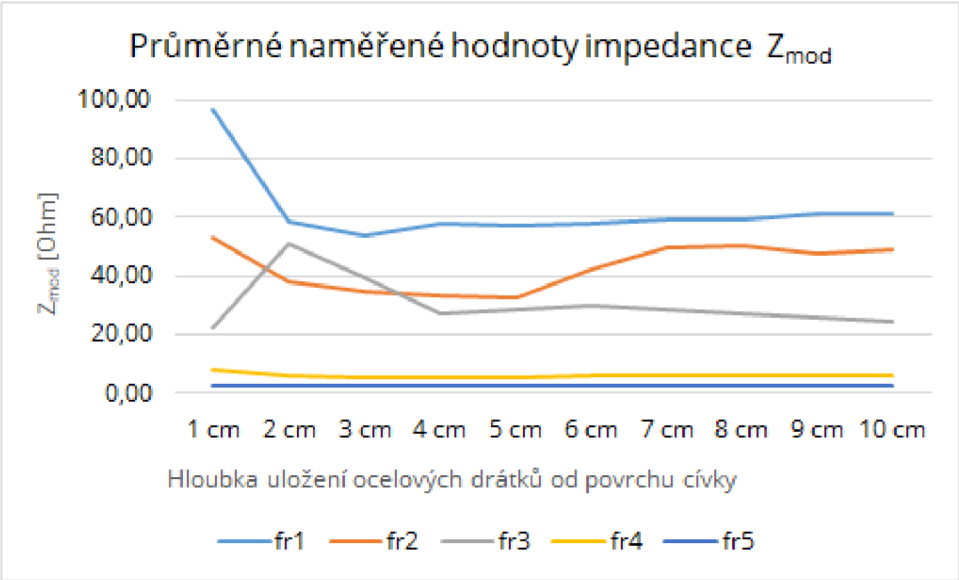
Sledovanými parametry byly změny v hodnotách měřených parametrů popisující elektromagnetické pole. Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány, viz Obr. F-9-9 až Obr. F-9-11.



Obr. F-9-9 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot $Z\varphi$ pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky

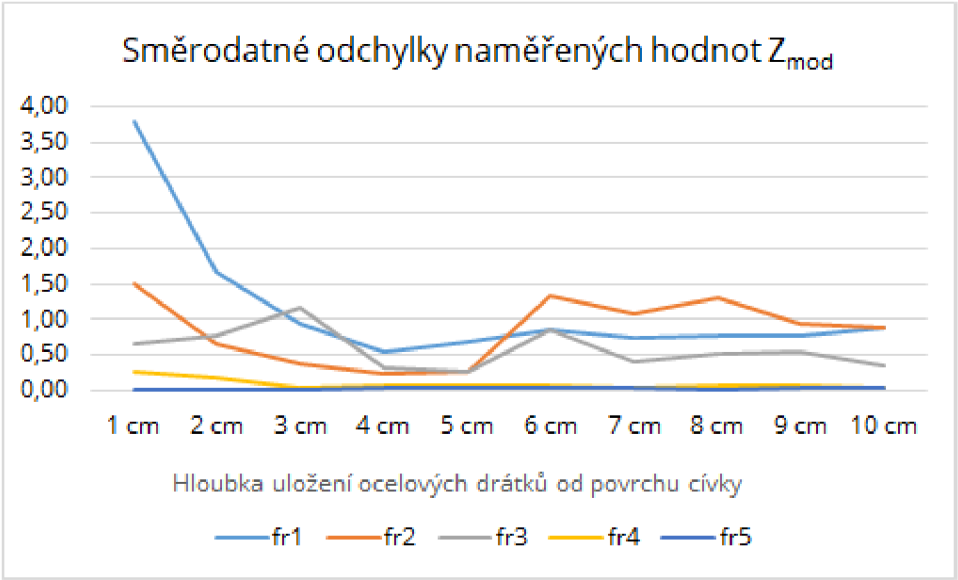


Obr. F-9-10 Grafické vyhodnocení směrodatných odchylek naměřených hodnot $Z\varphi$ pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky



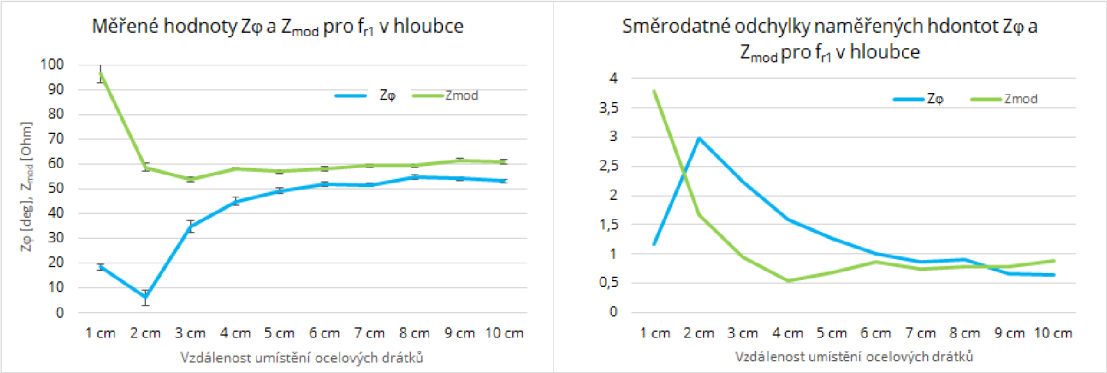
Obr. F-9-11 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_{mod} pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky

Graficky byly také vyhodnoceny hodnoty směrodatných výběrových odchylek stanovené z dílčích odečtených hodnot úhlu a fáze impedance, ze kterých je patrnější změna naměřených hodnot. Hodnoty směrodatných odchylek blížící se k nule značí minimální změny elektromagnetického pole.



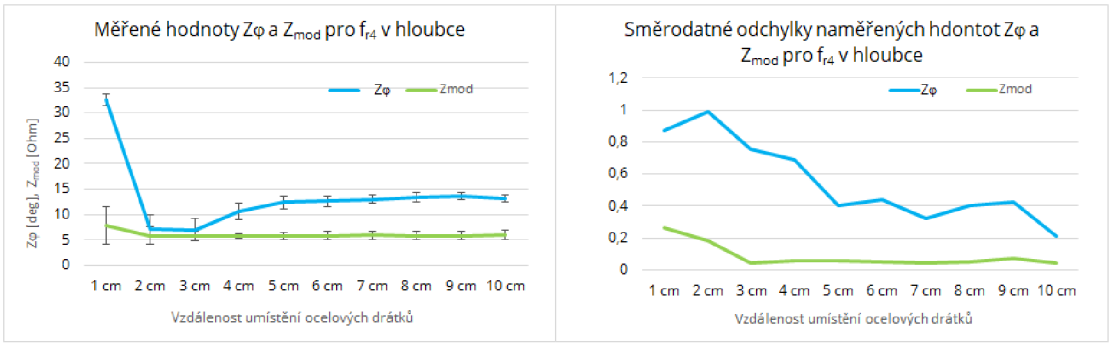
Obr. F-9-12 Grafické vyhodnocení směrodatných odchylek naměřených hodnot Z_{mod} pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky

Dle výsledků měření uvedených v Tab. F-9-1 a Obr. F-9-13 lze konstatovat potvrzení předpokladu velké citlivosti cívky při nastavení frekvence f_{r1}= 327,0 kHz. Patrnější rozdíl mezi naměřenými hodnotami je pozorovatelný mezi měřeními v hloubce 4 cm a 5 cm, Příloha 2, Tab. P-25. Pro větší hloubky, ve kterých byla vkládána polystyrenová deska s ocelovými vlákny, již není rozdílnost mezi naměřenými hodnotami tak patrná, což lze sledovat především z grafického vyhodnocení provedených testů Obr. F-9-13. Lze také konstatovat dosah elektromagnetické cívky do hloubky 5 cm.



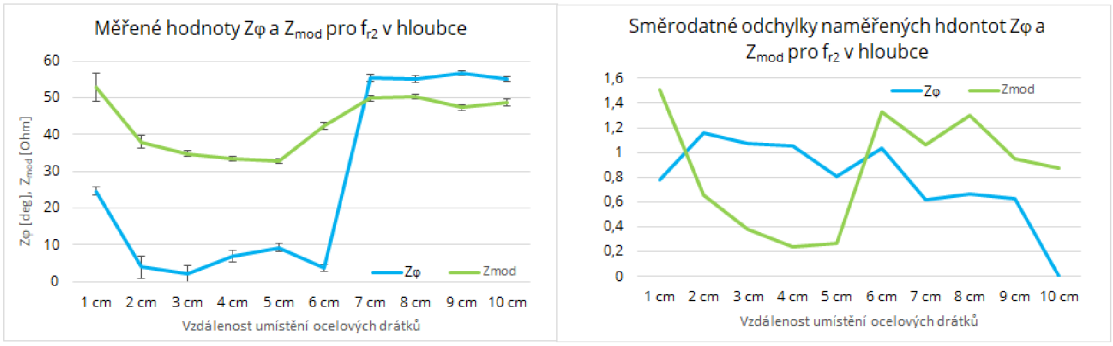
Obr. F-9-13 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Zφ a Z_{mod} a směrodatných odchylek pro f_{r1} =327 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky

Vysoké hodnoty jednotlivých složek impedance byly zjištěny při měření ve vzdálenosti 1 cm od povrchu cívky. To může být zapříčiněno velkou citlivostí měřicího zařízení. Tento předpoklad potvrzují i výsledky měření pro další 4 nastavení frekvence rezonance f_{r4}, u kterých je znatelný stejný trend měření při uložení ocelového plátu ve vzdálenosti 1 cm od povrchu Obr. F-9-14. Pro f_{r4} = 21,90 kHz je opět možné konstatovat dosah do 5 cm, při vyšších hloubkách jsou jen nepatrné rozdíly odečítaných hodnot.



Obr. F-9-14 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Zφ a Z_{mod} pro f_{r4} = 21,90 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky

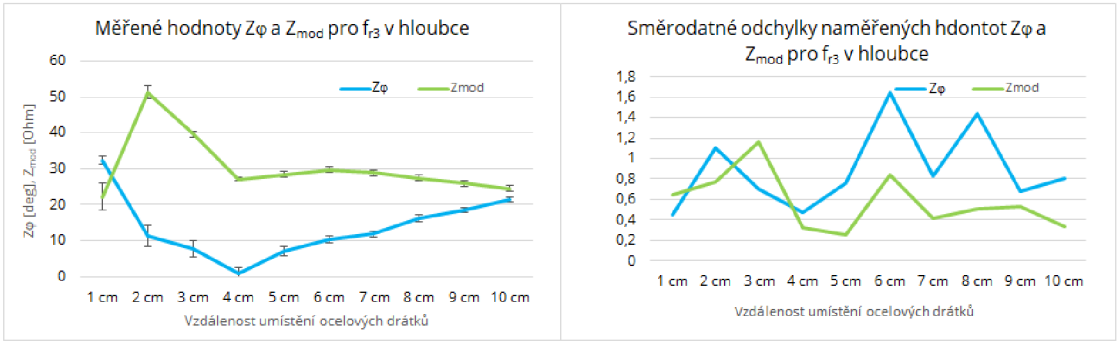
U druhého nastavení pro f_{r2} = 145,0 kHz byl na základě grafického vyhodnocení Obr. F-9-15 stanoven dosah na 7 cm. Pro hloubku 7 cm a více je také patrný pokles celkové koncentrace vláken, téměř až o dvojnásobek.



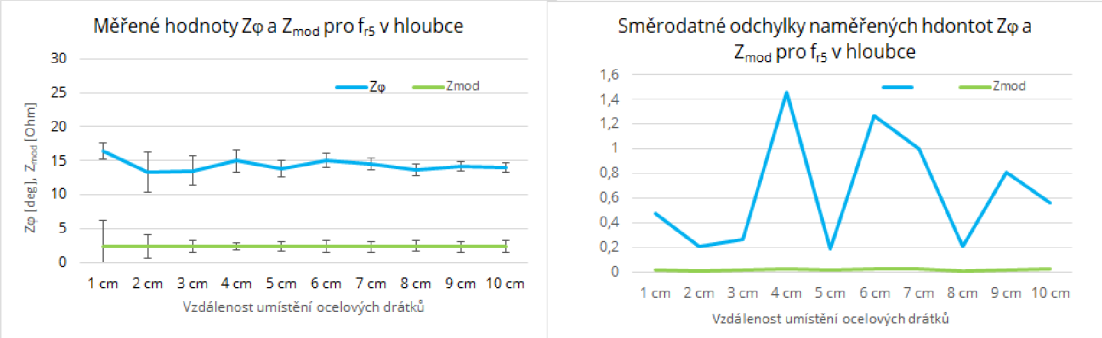
Obr. F-9-15 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Zφ *a* Z_{mod} *pro* f_{r2} *= 145,0 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky*

Při nastavení f_{r3} = 50,12 kHz je pozorovatelný velký výkyv u hloubky 4 cm. To mohlo být zapříčiněno například nedodržením potřebného času přiložení cívky ke zkušebnímu vzorku pro ustálení. Dále z výsledků vyplývá, že hodnoty modulu impedance *Z* nejsou tak rozdílné jako u předchozích dvou nastavení a naopak hodnoty úhlu f_i Obr. F-9-16 a výkonu *dP* vykazují velkou rozdílnost.

Stejné vyhodnocení jako pro f_{r4} = 21,90 kHz je možné konstatovat u posledního nastavení pro f_{r5} = 3,45 kHz, u kterého je stejně jako u f_{r3} = 50,12 kHz je zřejmý výkyv během testování při umístění polystyrenové desky s ocelovími vlákny v hloubce 4 cm Obr. F-9-17. Výsledky měření jsou uvedeny v Příloze 2, Tabulky P2-1 až P2-70.



Obr. F-9-16 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Zφ *a* Z_{mod} *pro* f_{r3} *= 50,12 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky*



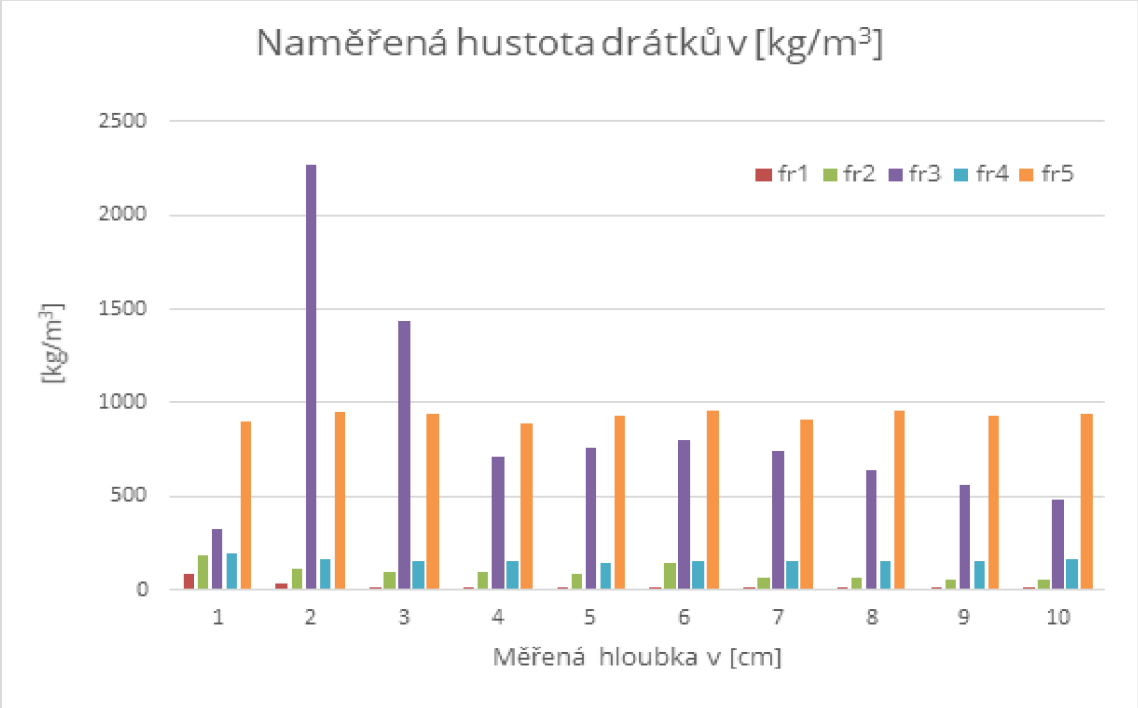
Obr. F-9-17 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Zφ a Z_{mod} pro f_{r5} = 3,450 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky

Z prvotních laboratorních testů elektromagnetické cívky s 5 různými nastaveními elektrického obvodu je zřejmá velká citlivost měření, ať zapříčiněná vysokou frekvencí rezonance či manipulací s měřicím zařízením a samotnou cívkou. Předpoklad dosahu cívky do hloubky 10 cm avšak není zcela vyvrácen, jelikož ani v jednom případě nebyly naměřeny hodnoty blížící se nule. Je prokazatelný dosah elektromagnetického pole až do této hloubky, avšak je zapotřebí brát v potaz konkrétní nastavení frekvence f_r a také vhodnou interpretaci získaných dat. V následující tabulce Tab. F-9-3 jsou uvedeny výpočtové hodnoty koncentrací.

Tab. F-9-3 Výpočtové hodnoty koncentrací pro jednotlivé frekvence v závislosti vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky

Hloubka v cm	Výpočtové hodnoty koncentrace v kg/m^3				
	f_{r1}	f_{r2}	f_{r3}	f_{r4}	f_{r5}
1	80,0395	182,5833	318,4565	197,0519	903,7013
2	33,11701	117,0594	2273,756	161,4729	948,2651
3	18,51171	99,04546	1434,552	152,03	938,5724
4	16,04472	89,75339	709,8099	150,7033	891,1508
5	13,19833	85,1594	756,1161	148,5522	929,4605
6	12,18142	145,4326	803,0567	153,9502	958,8783
7	12,8057	61,17931	744,7205	155,2298	903,8457
8	11,14647	63,05096	643,8994	153,4433	956,6586
9	12,31776	51,36199	559,1621	150,8051	926,8906
10	12,69924	56,77002	479,9112	159,1823	934,587

Především ze souhrnného grafického vyhodnocení na Obr. F-9-18, je zřejmé, že pro jednotlivé volené frekvence rezonance se mění parametry vznikajícího elektromagnetického pole a je potřeba brát zřetel na samotné nastavení navrženého měřicího zařízení a také vhodně interpretovat výsledky měření.

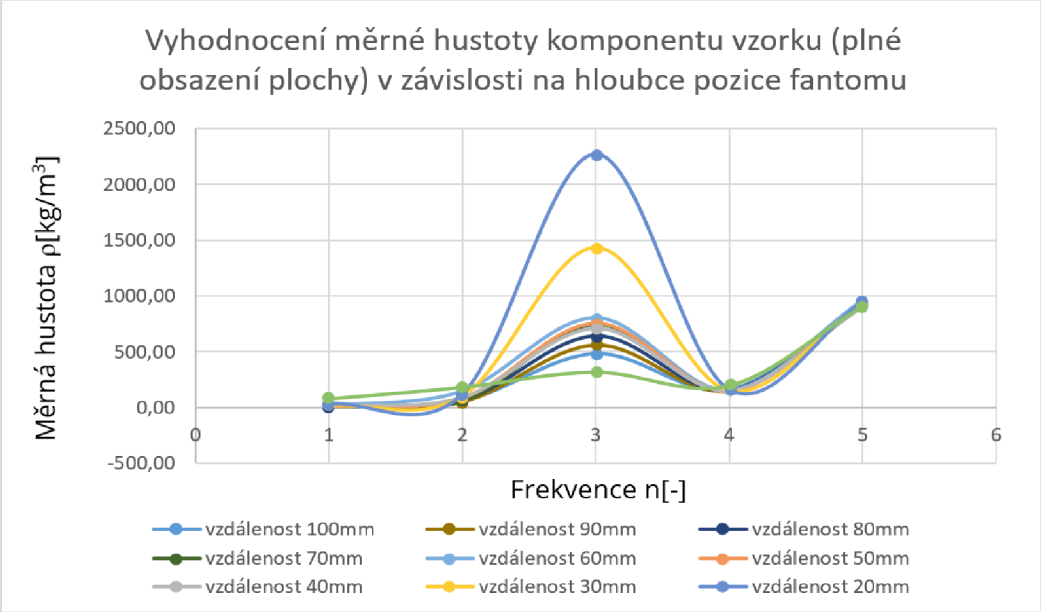


Obr. F-9-18 Grafické vyhodnocení výpočtových hodnot koncentrací pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky

Pro plné obsazení fantomové struktury Obr. F-9-1 je měrná hustota ρ_{fa10} = 7130kg/m3. Z vyhodnocení uvedeném na Obr. F-9-19 s přihlédnutím k teoretickému vyjádření vyhodnocované impedance Z, relace (37), výkonu P relace (38) se jeví jako nejméně citlivou frekvenci na nelinearitu závislosti impedance na hustotě drátků ve vzorku f_r = 3,450 kHz. Pro tuto frekvenci se ukazuje první nastavení nekorigovaného vyhodnocení hustoty drátků jako nejvěrnější 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 ρ koncentrace materiálu složky kompozitního vzorku.

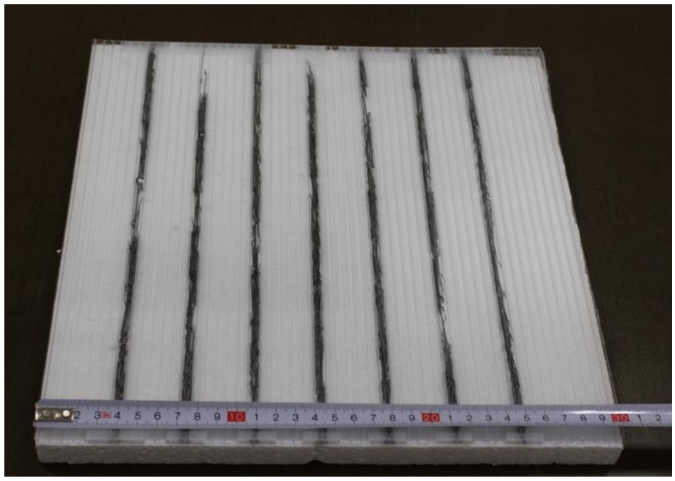
Je zřejmé, že při uvažování obou jevů (vířivé proudy v materiálu plniva kompozitu-drátky a magnetické vodivosti) při vysokých koncentracích drátků se výrazně jevy podílí na nelineárním charakteru vyhodnocení jejich měrné hustoty v kompozitu. Při testech na speciálních vzorcích se ukázalo [80], že nižší koncentrace a rovnoměrnější rozložení drátků vede k potlačení nelinearit.



Obr. F-9-19 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot hustoty komponentu ρ v závislosti na frekvencích $f_n = f_{r1} - f_{r5}$ a vzdálenosti uložení fantomového vzorku (plné obsazení) s ocelovými drátky Obr.F-9-1

10. Testování vlivu majoritní orientace drátků

Dalším dílčím výzkumem při laboratorním testování kompozitních materiálů bylo nalezení vyhodnocení vlivu převážného směru ocelových vláken v testovaném vzorku. Proto byl vytvořen zkušební vzorek z polykarbonátu tloušťky 0,5 cm, ve kterém byly umístěny ocelové drátky v konstantních vzdálenostech a stejném počtu, viz Obr. F-10-1.



Obr. F-10-1 Testovací materiál testu směrovosti uspořádání složky kompozitního vzorku –polykarbonát směrové uspořádání drátků 100 ks drátků s hustotou na ploše 1/7

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.

Tab. F-10-1 Průměrné hodnoty f_i se směrodatnými odchylkami pro jednotlivé frekvence v daných hloubkách umístění polykarbonového plátu s ocelovými drátky

Průměrné hodnoty naměřené f_i

	1 cm	*2 cm*	*3 cm*	*4 cm*	*5 cm*	*6 cm*	*7 cm*	*8 cm*	*9 cm*	*10 cm*
f_{r1}	14,7	30,7	38,6	41,1	42,2	43,8	40,6	36,6	33,1	22,3
f_{r2}	23,2	18,9	16,8	16,1	15,9	15,2	15,3	15,2	15,2	15,2
f_{r3}	2,4	0,4	2,2	3,1	3,6	3,7	3,8	3,8	3,6	3,1
f_{r4}	6,2	9,7	11,3	12,0	12,4	13,2	12,9	12,8	12,7	12,8
f_{r5}	8,4	10,4	9,3	7,8	9,0	9,1	7,4	12,4	13,2	12,4

Směrodatné odchylky naměřených hodnot f_i

f_{r1}	1,47	1,00	0,96	1,24	1,09	1,06	0,91	1,47	2,12	2,05
f_{r2}	0,36	0,12	0,28	0,34	0,36	0,47	0,38	0,36	0,37	0,40
f_{r3}	0,47	0,13	0,20	0,32	0,37	0,36	0,47	0,42	0,34	0,48
f_{r4}	0,77	0,25	0,23	0,25	0,29	0,46	0,33	0,26	0,29	0,20
f_{r5}	0,45	0,36	0,98	0,52	0,81	0,35	0,54	0,18	0,37	0,15

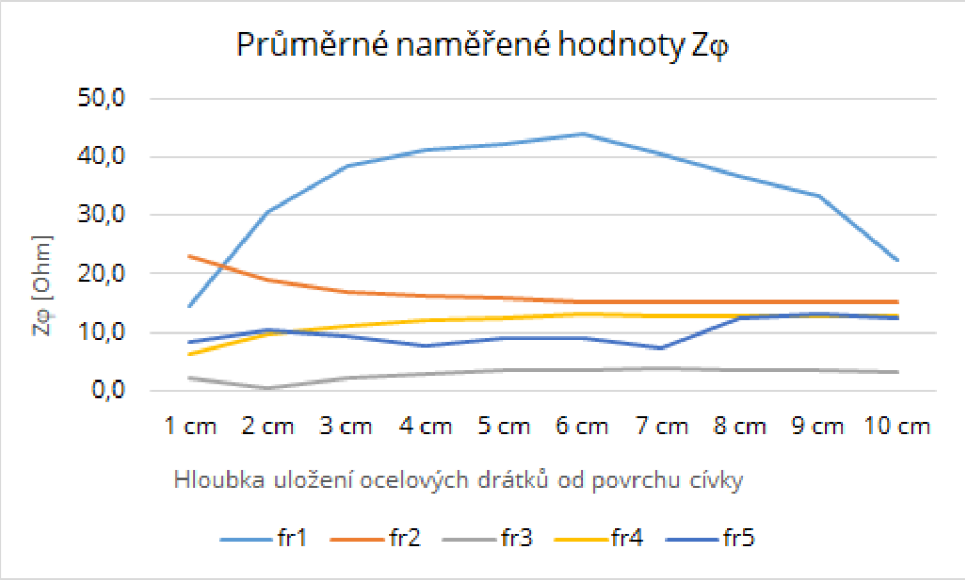
Tab. F-10-2 Průměrné hodnoty Z se směrodatnými odchylkami pro jednotlivé frekvence v daných hloubkách umístění polykarbonového plátu s ocelovými drátky

Průměrné hodnoty naměřené Z

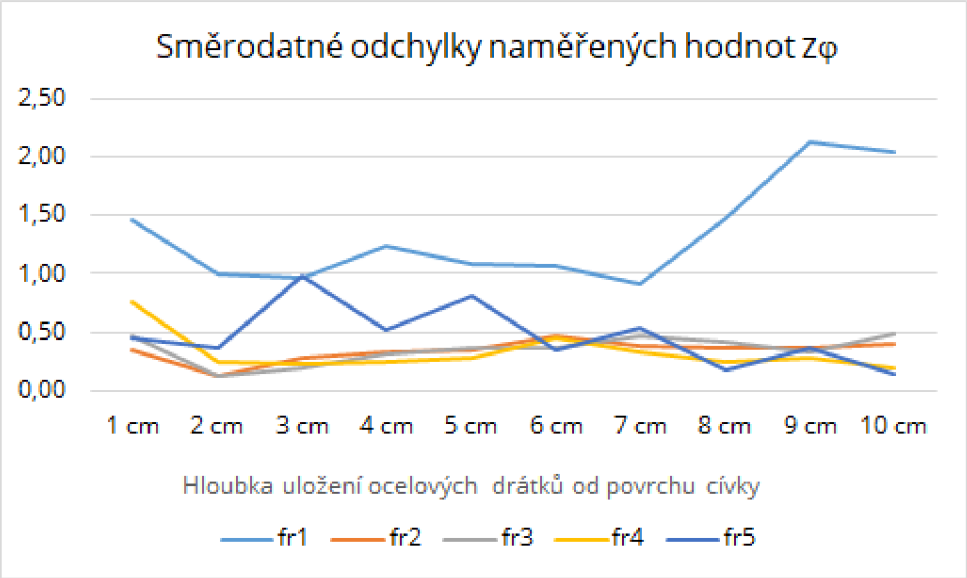
	1 cm	*2 cm*	*3 cm*	*4 cm*	*5 cm*	*6 cm*	*7 cm*	*8 cm*	*9 cm*	*10 cm*
f_{r1}	40,45	39,05	40,34	41,02	41,21	42,80	41,99	48,34	54,06	71,91
f_{r2}	39,29	36,29	34,92	34,29	33,58	34,02	33,89	33,82	33,74	33,76
f_{r3}	12,0	11,79	11,61	11,53	11,45	11,42	11,41	11,43	11,37	11,34
f_{r4}	6,04	6,18	6,19	6,21	6,18	6,06	6,14	6,15	6,17	6,18
f_{r5}	2,85	2,67	2,81	2,93	2,84	2,84	3,01	2,54	2,49	2,54

Směrodatné odchylky naměřených hodnot Z

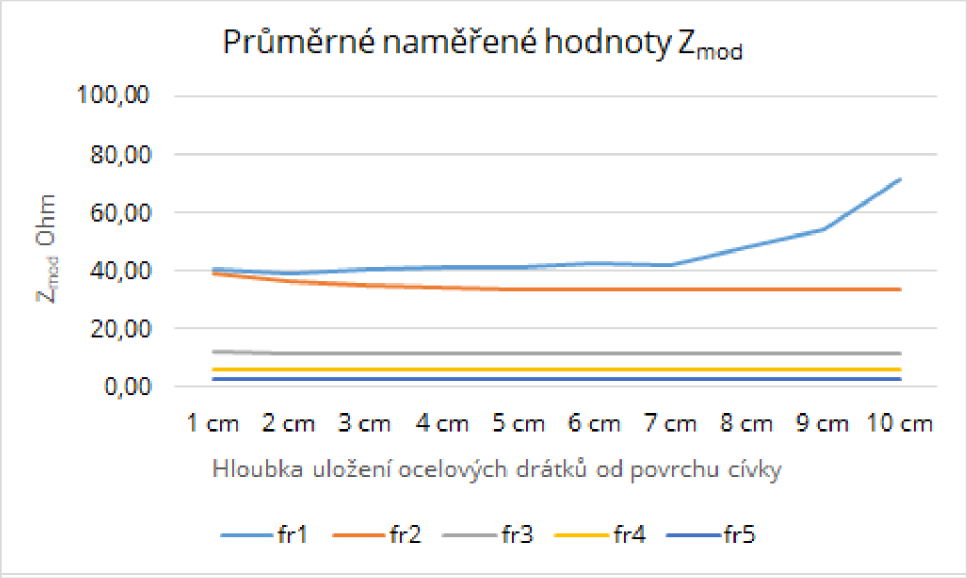
f_{r1}	0,86	0,71	0,68	0,72	0,67	0,53	0,72	0,99	1,07	2,01
f_{r2}	0,35	0,27	0,30	0,26	0,26	0,13	0,19	0,27	0,25	0,26
f_{r3}	0,13	0,11	0,06	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,07	0,08
f_{r4}	0,06	0,05	0,04	0,03	0,04	0,06	0,04	0,04	0,05	0,03
f_{r5}	0,04	0,02	0,06	0,07	0,07	0,04	0,06	0,01	0,02	0,02



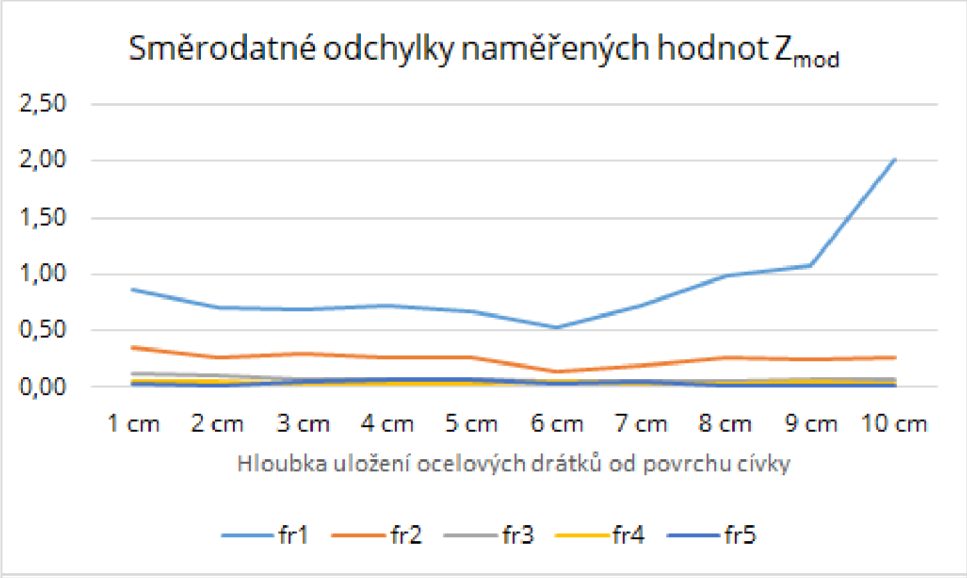
Obr. F-10-2 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Zφ pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky



Obr. F-10-3 Grafické vyhodnocení směrodatných odchylek naměřených hodnot Zφ pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu

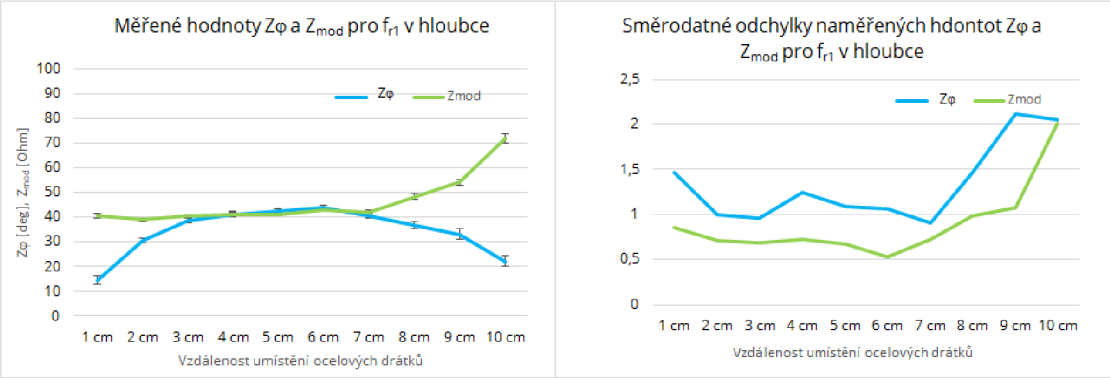


Obr. F-10-4 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_{mod} pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky



Obr. F-10-5 Grafické vyhodnocení směrodatných odchylek naměřených hodnot Z_{mod} pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky

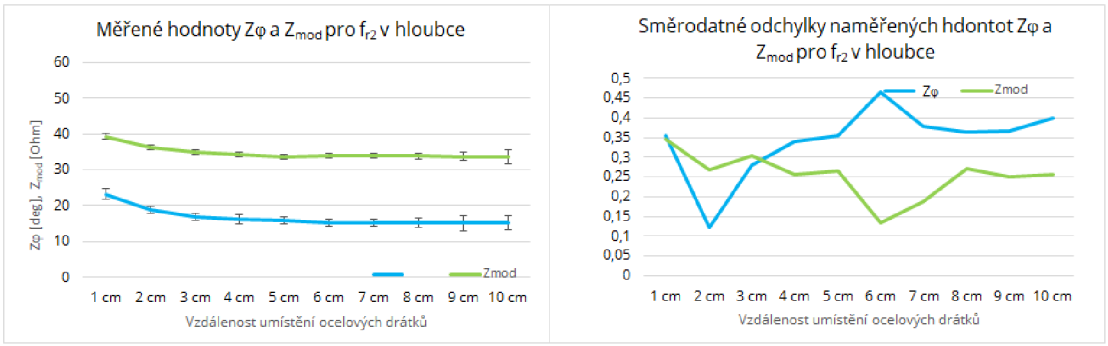
Pro nastavení 1 f_{r1} = kHz byly naměřeny velmi vysoké hodnoty změny výkonu *dP*, v řádech 10^5 mW, Příloha 2, Tab. P3-11. U zbylých dvou měřených hodnot impedance – modulu a úhlu nebyl s měnící se vzdáleností polykarbonové desky od cívky pozorován takový rozdíl Obr. F-10-6. To může být zapříčiněno vysokou citlivostí měření pro danou frekvenci. Výpočtové hodnoty hustoty ocelových vláken pro nastavení 1 se pohybovaly v řádech desítek kg/m^3, Tab. F-10-3.



Obr. F-10-6 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_{φ} a Z_{mod} pro f_{r1} = 328,6 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky

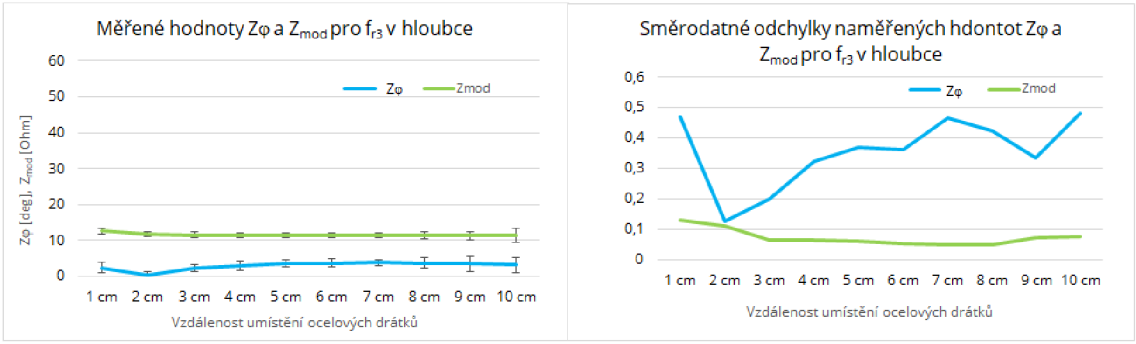
U druhého nastavení f_{r2} = 146 kHz je možné pozorovat klesající tendenci výpočtových hodnot hustoty ocelových vláken v závislosti na vzdálenosti od povrchu elektromagnetické cívky. Hodnot hustoty vláken byly naměřeny v rozmezí 170 – 85 kg/m^3 Tab. F-10-3. Mezi prvními pěti měřeními, tedy umístěním polykarbonového vzorku mezi polystyrenové desky ve vzdálenosti od cívky

0 až 5 cm, lze sledovat jen nevýrazné změny hodnot mezi měřenými parametry všech veličin popisující elektromagnetické pole Obr. F-10-7.

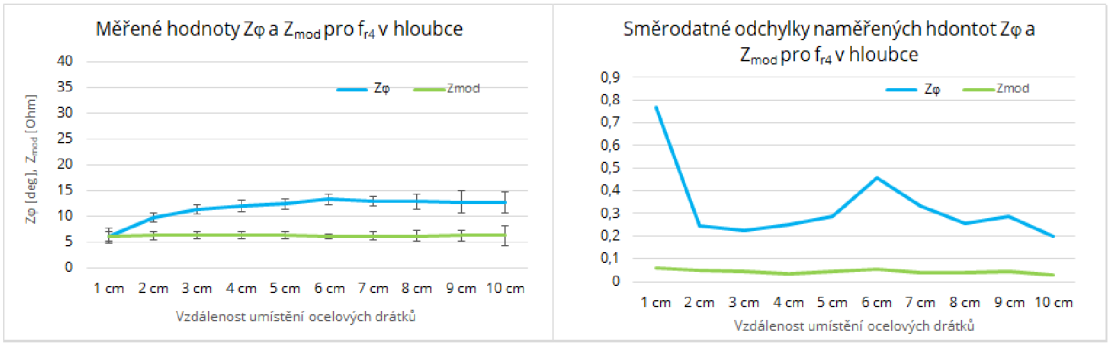


Obr. F-10-7 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot f_i a Z pro f_{r2} = 145 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky

Stejný trend je možné hodnotit z výsledků měření pro třetí nastavení frekvence f_{r3} = 50,12 kHz. Zde nedošlo k změně všech tří hodnocených veličin Obr. F-10-3, avšak znatelné změny hodnot jsou pouze u *dP,* Příloha 3, Tab. P3-39. Výpočtové hodnoty hustoty vláken pro jednotlivé vzdálenosti byly určeny v řádech stovek kg/m^3, Tab. F-10-3.

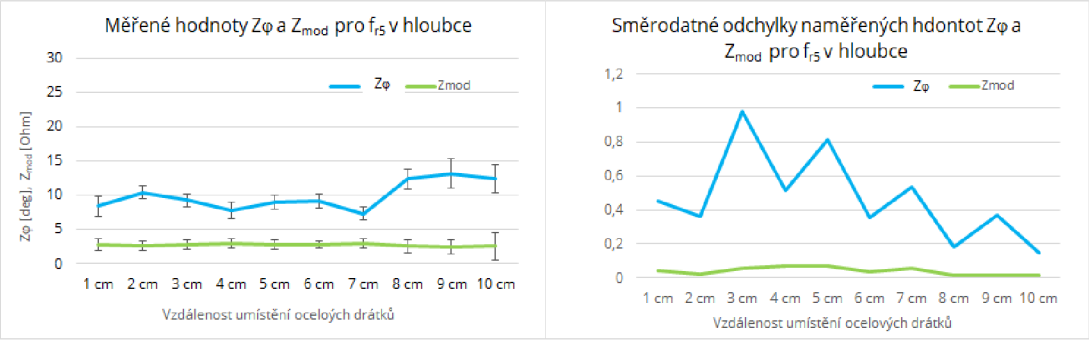


Obr. F-10-8 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Zφ a Z_{mod} pro f_{r3} = 50,12 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky



Obr. F-10-9 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Zφ a Z_{mod} pro f_{r4} = 21,90 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky

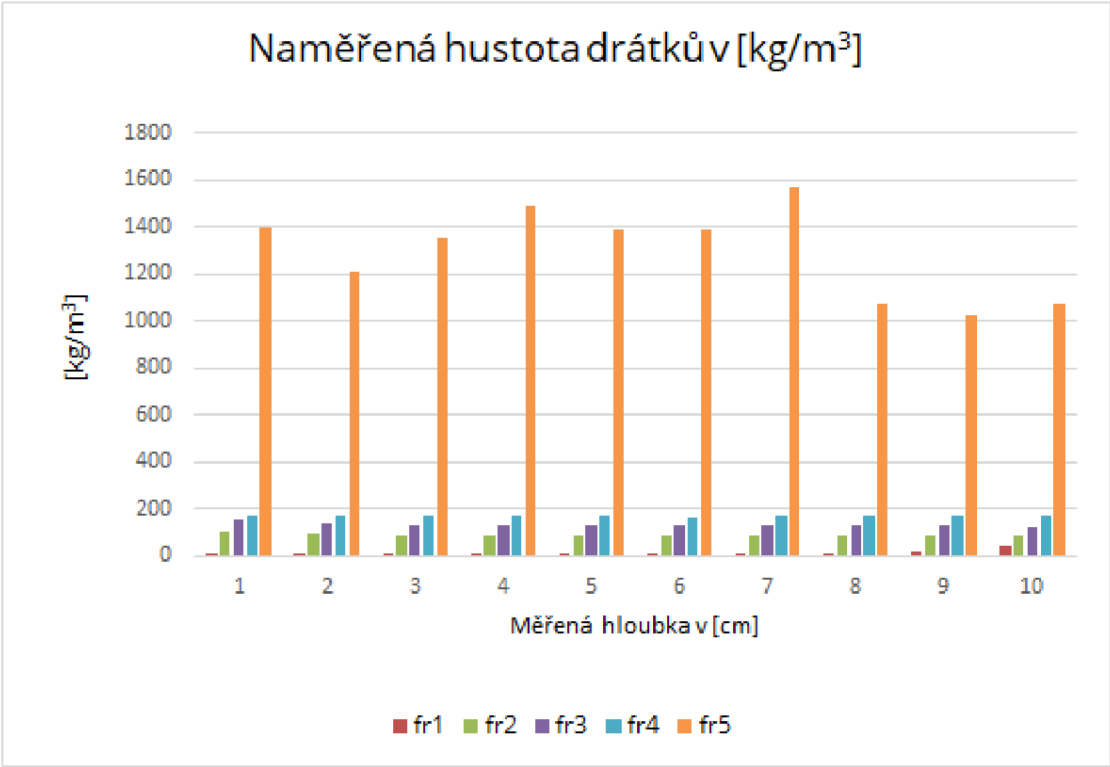
Pro nastavení f_{r4}=21,9 kHz a 5 f_{r5}=3,45 kHz se výrazněji měnila pouze hodnoty úhlu f_i Obr. F-10-4. U nastavení f_{r4} jsou výpočtové hodnoty hustoty vláken obdobné jako pro nastavení f_{r3}. Avšak u f_{r5} nastavení frekvence došlo k výraznému nárůstu - hustota vláken dosahovala hodnot až 1200 kg/m^3 Tab. F-10-3 a registrované změny hodnot f_i a Z jsou patrné z Obr. F-10-10.



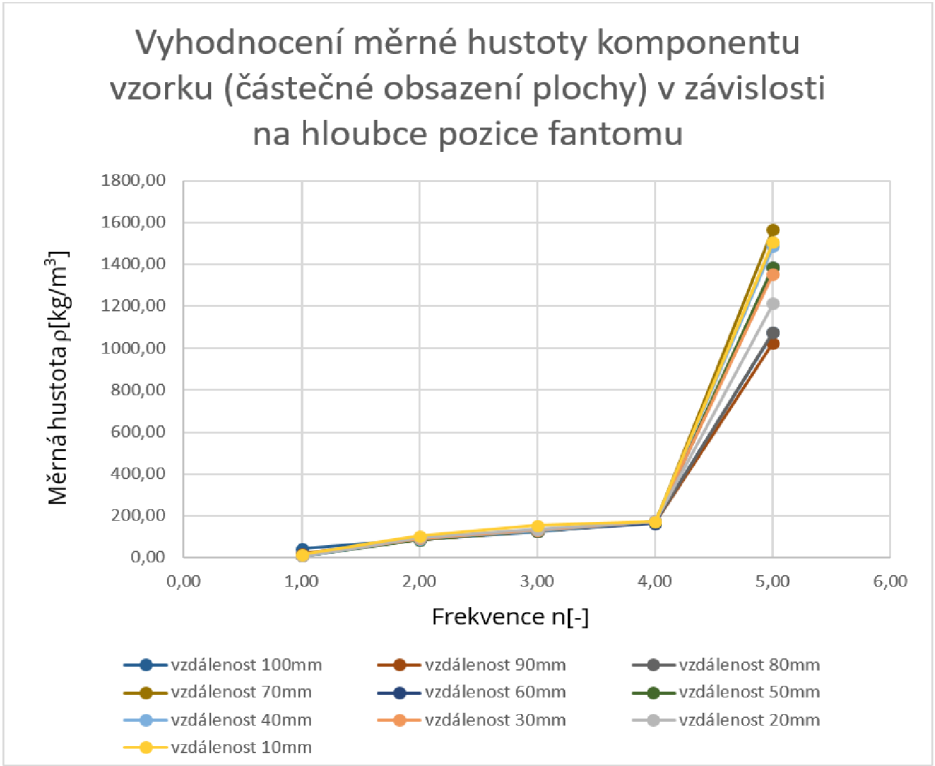
Obr. F-10-10 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot f_i a Z pro f_{r5} = 3,45 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky

Tab. F-10-3 Výpočtové hodnoty koncentrací pro jednotlivé frekvence v závislosti vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky

Hloubka v cm	Výpočtové hodnoty koncentrace v kg/m^3				
	f_{r1}	f_{r2}	f_{r3}	f_{r4}	f_{r5}
1	0,7	103,7	154,2	172,0	1400,8
2	10,8	95,7	135,7	176,0	1213,3
3	9,5	91,0	131,1	174,5	1355,3
4	9,1	88,4	128,9	174,2	1488,0
5	8,9	85,1	127,1	172,0	1388,0
6	9,1	87,9	126,3	164,4	1385,7
7	9,7	87,2	126,0	169,0	1569,2
8	14,4	86,9	126,4	169,9	1075,8
9	19,6	86,6	125,2	170,8	1026,8
10	42,4	86,6	124,8	171,5	1074,5



Obr. F-10-11 Grafické vyhodnocení výpočtových hodnot koncentrací pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky



Obr. F-10-12 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot hustoty komponentu ρ v závislosti na frekvencích $f_n = f_{r1} - f_{r5}$ a vzdálenosti uložení fantomového vzorku (polykarbonát) s ocelovými drátky (Obr. F-9-4)

Z dílčích výsledků měření při testování polykarbonového vzorku je možné konstatovat, že se snižující hodnotou frekvence nastavení snižuje citlivost měření této metodiky a zvyšuje dosah, stejně jako tomu bylo prokázáno u testování dosahu elektromagnetického pole pomocí polystyrenových desek. Výsledky jednotlivých měření jsou uvedeny v Příloze 3, Tabulky P3-1až P3-70.

Elektromagnetické pole vznikající při přiložení cívky k povrchu zkušebního tělesa je ovlivněno shlukem jednotlivých vláken do větších subjektů v kombinaci jejich převážného směru. Navržený testovací vzorek z polykarbonátu není vhodný pro prokázání vlivu převážného směru ocelových vláken, jelikož malá vzdálenost mezi vlákny nebyla vhodně zvolena. Pro částečné obsazení fantomové struktury (Obr.F-10-1) je měrná hustota ρ_{fa2} = 1120kg/m^3 .

11. Testování na zkušebních tělesech specifických parametrů

11.1. Výroba zkušebních těles specifických parametrů

Hned v úvodu této části je třeba poznamenat, že je prakticky téměř nemožné, vyrobit vzorky jednoznačně definovaných parametrů z betonu, pokud má být zaručeno, že vzorek v žádném parametru nevybočuje z předpokládaných a požadovaných mezí. Nehomogenita rozptylu drátků v laboratorních vzorcích malého objemu je pravděpodobná, svou roli hraje jak malý objem připravované směsi, tak např. okrajový efekt v blízkosti stěn formy a podobně. I v případě speciálně připravených vzorků s atypickým rozmístěním drátků je použití betonu nevhodné.

Pro výše uvedené případy byl vyvinut nestandardní materiál, který svojí strukturou dost přesně simuluje beton, respektive drátkobeton, ale umožňuje v průběhu výroby vzorků korigovat polohu drátků, tedy odhalit neúmyslné nehomogenity a problémy, které by mohly degradovat výsledky testování přístrojů a metod.

Vstupní požadavky na tento materiál byly následující:

- Průhlednost v takovém rozsahu, aby při uvažované tloušťce zkušebních těles (do 150 mm) bylo možno sledovat rozložení drátků.
- Zrnitostní struktura podobná betonu, zaručující podobné parametry rozptylu a orientace drátků, jako v reálném drátkobetonu
- Dlouhá doba zpracovatelnosti – vysoký počátek tuhnutí (řádově hodiny), pro možnost korekcí struktury vzorku.

Pro zajištění požadované průhlednosti je klíčové použití vhodného pojiva i plniva. Pojivo by mělo současně mít vhodnou konzistenci, a plnivo by frakcemi mělo co nejpřesněji simulovat drobné i hrubé kamenivo v betonové směsi.

Ideální náhradou kameniva se ukázala skleněná drť z čirého skla vhodných frakcí, která je dodávaná pro sklářský umělecký průmysl. Ukázalo se, že skleněné drti potřebných frakcí i odpovídajícího tvarového indexu jsou běžně na českém trhu. Použitá skleněná drť byla odpadním produktem z výroby firmy Glass Sphere s.r.o.

Z dodaných směsných drtí byly nejprve od sebe odděleny jednotlivé frakce a následně byla namíchána směs odpovídající poměrům frakcí kameniva původního betonu. Ze skleněné drti byly před tím odstraněny všechny části větších frakcí, které neměly vhodný tvarový index (ploché destičky).

Jako vhodné pojivo byla zvolena epoxydová pryskyřice. Při výběru epoxidových pryskyřic bylo zohledněno několik faktorů. Co nejnižší viskozita, zajišťující ideální zatékání směsi, vhodná, delší doba zpracovatelnosti, minimální objemové změny, posléze byla ze současné nabídky vybrána víceúčelová pryskyřice Biresin L84 [14].

Samostatnou kapitolou výroby vzorků z epoxidové pryskyřice je technologie dobrého odformování vzorků, pro dobrou separaci byla použita silikonová folie, umožňující dobrou separaci epoxydové směsi od překližkové formy. Alternativou je použité kovové samolepící folie a separátoru Obr. F-11-1 (vlevo), ale silikon se ukázal být vhodnější Obr. F-11-1 (vpravo). Obě alternativy zaručují hladkost povrchu a ochranu samotné formy před teplotou – při vytvrzování pryskyřice dochází k exotermické reakci a zahřátí vzorků na cca. 90°C [75]. Po testech bylo jako optimální postup použito nejprve namíchání suché směsi skleněných drtí, následně byly přimíchány drátky v příslušném množství. Míchání probíhalo ručně s vizuální kontrolou homogenity drátků.

Obr. F-11-1 Formy pro výrobu zkušebních těles z epoxidové pryskyřice; vlevo – použití alobalové pásky, vpravo – použití silikonové pryže

Suchá směs byla poté vsypána do formy. Na závěr byla směs zalita pryskyřicí Biresin L84. Díky vhodně zvolené nízké viskozitě bylo zaručeno zalití celého vzorku,

a současně díky dlouhé době zpracovatelnosti došlo k samovolnému odstranění většiny vzduchových bublin. Pro kalibraci a testování nové metody měření obsahu drátků v betonu byla nejprve vytvořena první sada vzorků se zvolenou koncentrací drátků – 0,5 %, 1,0 % a 1,5 %. Byly použity dva typy drátků: TRI-TREG (délka 60 mm) Obr. F-6-5, DRAMIX (délka 50 mm).

Vzorky byly zhotoveny ve formách o rozměrech 300 x 300 x 150 mm. Tyto rozměry byly zvoleny proto, aby vzorky byly snadno manipulovatelné a současně dostatečně velké na to, aby u nich nedocházelo k „okrajovým jevům“ při zpracovávání kompozitu, případně k jednosměrné orientaci drátků. Složení směsí pro výrobu první sady těles je uvedeno v Tab. F-11-1 [14].

Tab. F-11-1 Složení směsí druhé sady zkušebních těles z epoxidové pryskyřice s volenou koncentrací ocelových vláken s různými druhy ocelových vláken [14]

Označení zkušebního tělesa	Koncentrace drátků		Ocelové drátky	
			DRAMIX	*TRITREG*
	[%]	[kg/m^3]	[kg]	[kg]
DRAMIX 0,50	0,50	40	0,53	-
DRAMIX 1,00	1,00	80	1,06	-
DRAMIX 1,50	1,50	120	1,59	-
TRITREG 0,50	0,50	40	-	0,53
TRITREG 1,00	1,00	80	-	1,06
TRITREG 1,50	1,50	120	-	1,59

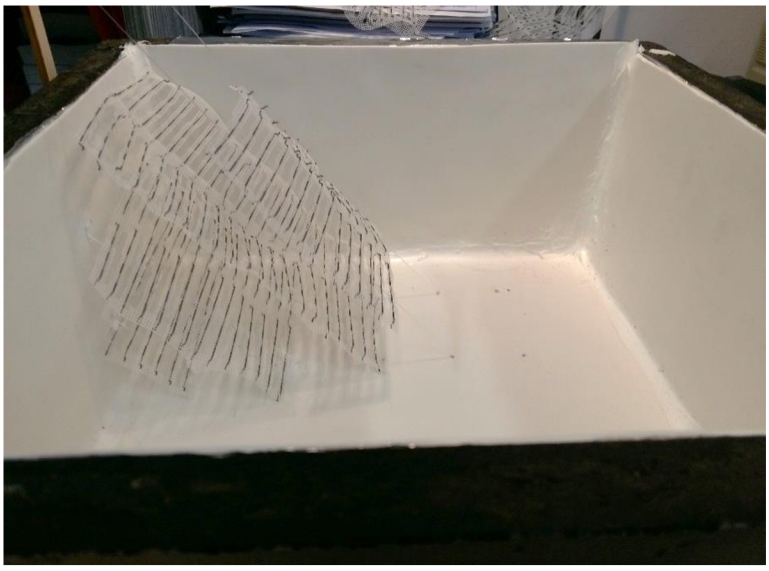
Při výrobě druhé sady těles rozměrů 300 x 300 x 100 mm byly použity ocelové drátky DRAMIX RC – 65/35 – BN (délky 35 mm), jejichž dávka byla zvyšována vždy o 20 kg/m^3. Každá směs byla zalita epoxidovou pryskyřicí v dávce okolo 3,4 až 4,8 kg na jedno těleso. Složení směsí je uvedeno v Tab. F-11-2.

Tab. F-11-2 Složení směsí první sady zkušebních těles z epoxidové pryskyřice s volenou koncentrací ocelových vláken se stejným typem ocelových vláken

Označení zkušebního tělesa	Koncentrace	Sklo frakce 2 - 16 mm	Ocelové drátky	
			Drátky *DRAMIX*	Drátky *TRITREG*
	[kg/m^3]	[kg]	[kg]	[kg]
P2	60	12,0	0,54	-
P3	80	12,0	0,72	-
P4	100	10,0	0,90	-
P5	120	10,0	1,08	-
P 80	80	10,0	-	0,72

Byla vyrobena také tzv. „směrová zkušební tělesa“, u kterých nebyla prioritou koncentrace vláken, ale jistota jejich směru uložení. Směrová tělesa měla rozměr 300 x 300 x 150 mm. První směrový vzorek měl drátky uloženy vždy vodorovně v pevně daných vzdálenostech ve třech vrstvách Obr. F-11-2. U druhého směrového vzorku byly drátky umístěny pouze v ¼ tělesa, a to diagonálně, viz Obr. F-11-3.

Obr. F-11-2 Výroba zkušebního tělesa z epoxidové pryskyřice tzv. směrového vzorku, uložení ocelových vláken v jednom směru v daných vzdálenostech



Obr. F-11-3 Umístění ocelových vláken v ¼ kvadrantu zkušebního tělesa z epoxidové pryskyřice

11.2. Laboratorní zkoušky na zkušebních tělesech specifických parametrů

Jedním z dílčích výzkumů provedených v rámci dizertační práce bylo ověření využitelnosti navrženého měřicího zařízení na speciálně vyrobených zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice. Nesmírnou výhodou těchto těles při provádění laboratorních zkoušek je právě transparentní barva. 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 vláka.

Každé zkušební těleso z epoxidové pryskyřice, tak jak byla popsána v předchozím textu, bylo testováno při 5-ti zvolených nastavení frekvence rezonance měřicího zařízení. Jako první byl testován referenční vzorek. Pro každou frekvenci f_{r1} až f_{r5} byl vypočten ztrátový výkon dP_{fant}, který byl uvažován při výpočtech hustoty ocelových vláken ve zbylých zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice daných frekvencí dle (19). Z grafického vyhodnocení naměřených hodnot popisující elektromagnetické pole u referenčního vzorku je patrné, že i při různých nastaveních

frekvence nedochází ke změně hodnot měřené impedance – úhlu a modulu, viz Příloha P3-6. Tyto výsledky prokazují majoritní vliv výskytu ocelových vláken na změny hodnot měřené impedance (modulu, fáze).

Všechna zkušební tělesa z epoxidové pryskyřice byla laboratorně testována dle metodiky popsané v kapitole 8 a byla stanovena výpočtová hodnota koncentrace ocelových vláken. Výsledky jsou uvedeny v Tabulce F-11-3.

Tab. F-11-3 Výpočtové hodnoty koncentrace ocelových vláken v kg/m^3 ve zkušebních tělesech P2 – P5 a P80 pro jednotlivé frekvence rezonance

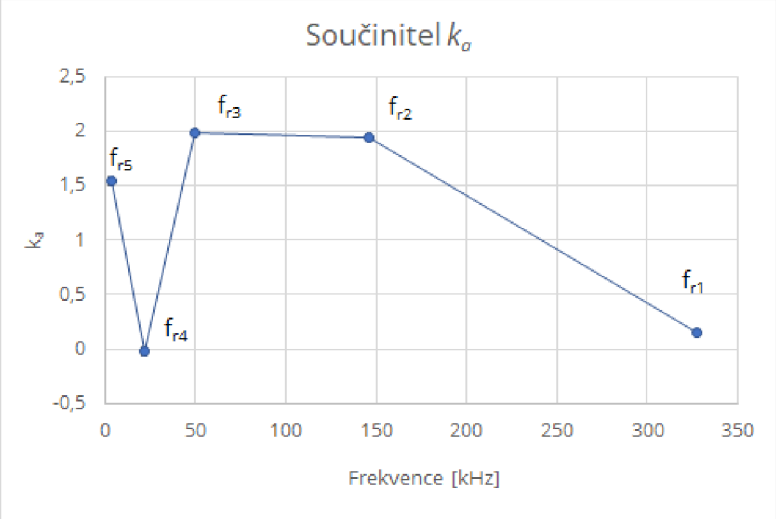
	Koncentrace ocelových vláken v kg/m^3				
	P2 (60 kg/m^3)	**P3 (80 kg/m^3)**	**P4 (100 kg/m^3)**	**P5 (120 kg/m^3)**	**P80 (80 kg/m^3)**
f_{r1}	11,6	11,5	13,2	13,8	14,0
f_{r2}	131,0	139,0	149,4	181,6	224,5
f_{r3}	137,9	146,8	157,2	195,1	208,1
f_{r4}	150,1	-54,9	-56,5	-58,2	-70,8
f_{r5}	69,4	80,6	85,6	93,9	313,0

Z výpočtových hodnot koncentrace ocelových vláken u vzorku P2 (60 kg/m^3) lze konstatovat vliv frekvence na dosah elektromagnetického pole. Z vizuálního hodnocení tohoto tělesa je patrné, že ocelové drátky jsou soustředěny v střední třetině výšky zkušebního vzorku, čemuž odpovídají i hodnoty hustot ocelových vláken. Za předpokladu, že pro frekvenci f_{r5} má vzniklé elektromagnetické pole dosah téměř rovný výšce zkušebního tělesa, lze považovat výpočtovou hodnotu hustoty ocelových vláken 69,4 kg/m^3 za reálnou. Bohužel stejný trend nelze pozorovat u výsledků měření na zbylých zkušebních tělesech. Při nastavení frekvence f_{r4} byl ztrátový výkon referenčního vzorku dP_{fant} vyšší než ztrátový výkon dP testovaných těles s ocelovými vlákny, čímž jsou vysvětleny záporné hodnoty koncentrací určené dle vztahu (19) a (20) u všech zkušebních těles z epoxidové pryskyřice mimo vzorek P2. Hodnoty dP_{fant} jsou pro frekvence f_{r2} - f_{r5} neměnné.

Na základě naměřených dat byl určen analytický součinitel k_a určený dle

$$k_a = \frac{\rho_c}{\rho_d} \,, \tag{39}$$

kde ρ_d je návrhová hodnota koncentrace ocelových drátků a ρ_c koncentrace určená elektromagnetickou cívkou. Tento součinitel byl určen pro každé zkušební těleso z epoxidové pryskyřice v kombinaci všech 5 frekvencí. Dílčí a průměrné hodnoty jsou uvedeny v Tab. F-11-4, Obr. F-11-4. Z těchto výsledků je možné hodnotit jako nejvhodnější nastavení frekvence f_{r1} pro určení koncentrace pomocí navržené metodiky a elektromagnetické cívky.



Obr. F-11-4 Grafické vyhodnocení průměrných hodnot součinitele k_a pro dané frekvence stanovené na zkušebních tělesech z epoxidové

Tab. F-11-4 Hodnoty součinitele k_a pro jednotlivé frekvence stanovené na zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice

Označení vzorku	k_a				
	f_{r1}	f_{r2}	f_{r3}	f_{r4}	f_{r5}
P2	0,1933	2,1833	2,2983	2,5017	1,1567
P3	0,1438	1,7375	1,8350	-0,6863	1,0075
P4	0,1320	1,4940	1,5720	-0,5650	0,8560
P5	0,1150	1,5133	1,6258	-0,4850	0,7825
P80	0,1750	2,8063	2,6013	-0,8850	3,9125
Průměr	0,15182	1,94688	1,98648	-0,02392	1,5430
Sm. odchylka	0,03192	0,55483	0,44721	1,41987	1,33237

Elektromagnetickou cívkou byla testována také tělesa druhé sady z epoxidové pryskyřice. Tato tělesa obsahovala odlišné typy drátků. Výsledky měření, tedy výpočtové hodnoty koncentrací, jsou uvedeny v Tab. F-11-5.

Tab. F-11-5 Výpočtové hodnoty koncentrace ocelových vláken v kg/m^3 ve zkušebních tělesech TRITREG a DRAMIX pro jednotlivé frekvence rezonance

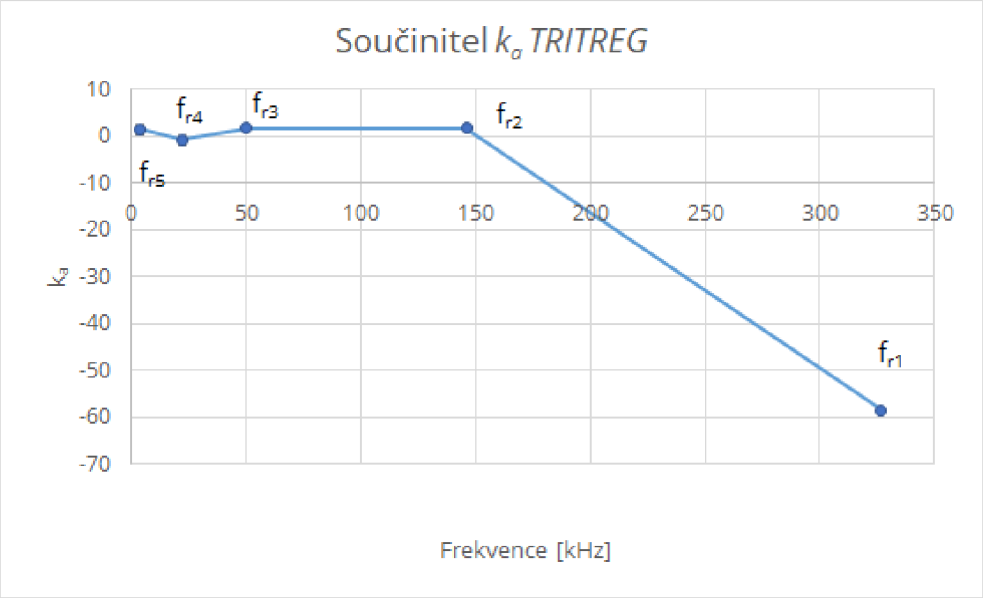
frekvence	Koncentrace ocelových vláken v kg/m^3					
	TRITREG 0,5 (40 kg/m^3)	TRITREG 1,0 (80 kg/m^3)	TRITREG 1,5 (120 kg/m^3)	DRAMIX 0,5 (40 kg/m^3)	DRAMIX 1,0 (80 kg/m^3)	DRAMIX 1,5 (120 kg/m^3)
f_{r1}	6,3	-14047,6	6,2	10,7	11,4	12,5
f_{r2}	88,0	170,8	116,7	86,7	105,9	139,3
f_{r3}	87,7	161,8	118,6	88,9	108,5	145,5
f_{r4}	-50,4	-55,6	-57,2	-52,1	-53,6	-55,1
f_{r5}	52,3	170,0	116,6	34,8	73,8	72,8

Stejně jako u předchozí sady pryskyřicovém tělese tak i zde je možné pozorovat záporné výpočtové hodnoty koncentrací pro nastavení frekvence rezonance f_{r4}. Stoupající trend v koncentracích odpovídající návrhovým hodnotám je patrný u zkušebních těles obsahující drátky DRAMIX pro nastavení frekvencí f_{r1}, f_{r2} a f_{r3}.

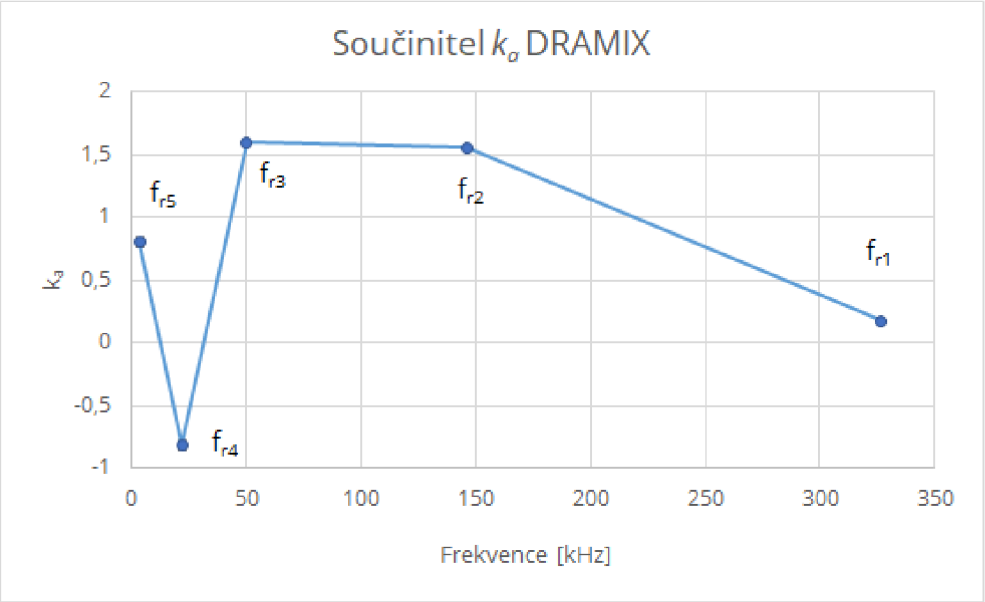
Z uvedených hodnot v Tab. F-11-6 součinitelů k_a pro zkušební tělesa z epoxidové pryskyřice druhé sady, která obsahovala drátky typu DRAMIX délky 50 mm, vyplývá zjevný vliv typu ocelových drátků obsažených v hodnoceném kompozitu. U zkušebních těles s drátky TRITREG výsledku dosahují nerelevantních hodnot měření. Tyto závěry jsou patrné z grafického vyhodnocení součinitele k_a na Obr. F-11-5 a Obr. F-11-6.

Tab. F-11-6 Hodnoty součinitele k_a pro jednotlivé frekvence stanovené na zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice s drátky TRITREG A DRAMIX

Označení vzorku		k_a				
		f_{r1}	f_{r2}	f_{r3}	f_{r4}	f_{r5}
TRITREG	0,5	0,1575	2,2	2,1925	-1,26	1,3075
	1,0	-175,595	2,135	2,022	-0,695	2,125
	1,5	0,0517	0,9725	0,9883	-0,4766	0,9716
Průměr		-58,461	1,7691	1,7344	-0,8105	1,468
Sm. Odchylka		101,44	0,69	0,651	0,404	0,593
DRAMIX	0,5	0,2675	2,1675	2,2225	-1,3025	0,870
	1,0	0,1425	1,323	1,356	-0,670	0,9225
	1,5	0,1041	1,1608	1,2125	-0,45917	0,6067
Průměr		0,171	1,55	1,59	-0,8105	0,7997
Sm. Odchylka		0,085	0,540	0,546	0,438	0,169

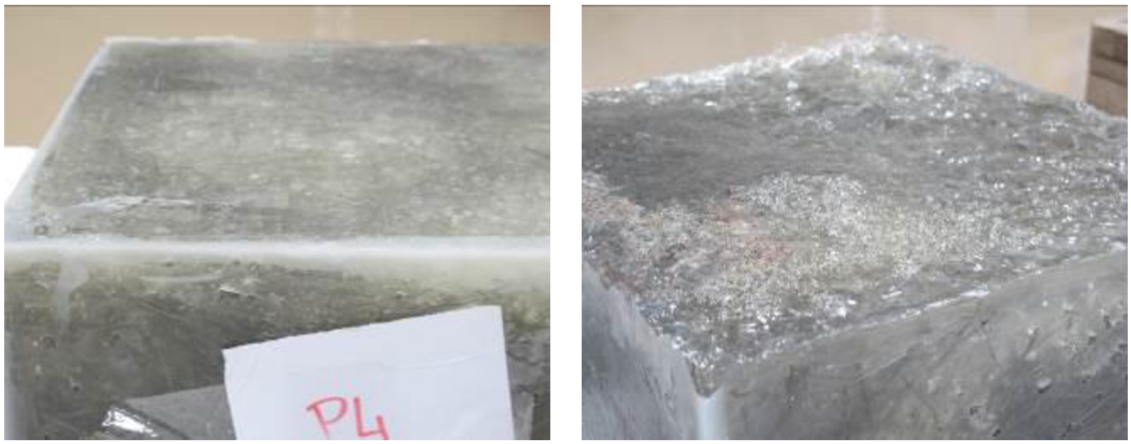


Obr. F-11-5 Grafické vyhodnocení průměrných hodnot součinitele k_a pro dané frekvence stanovené na zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice s drátky TRITREG



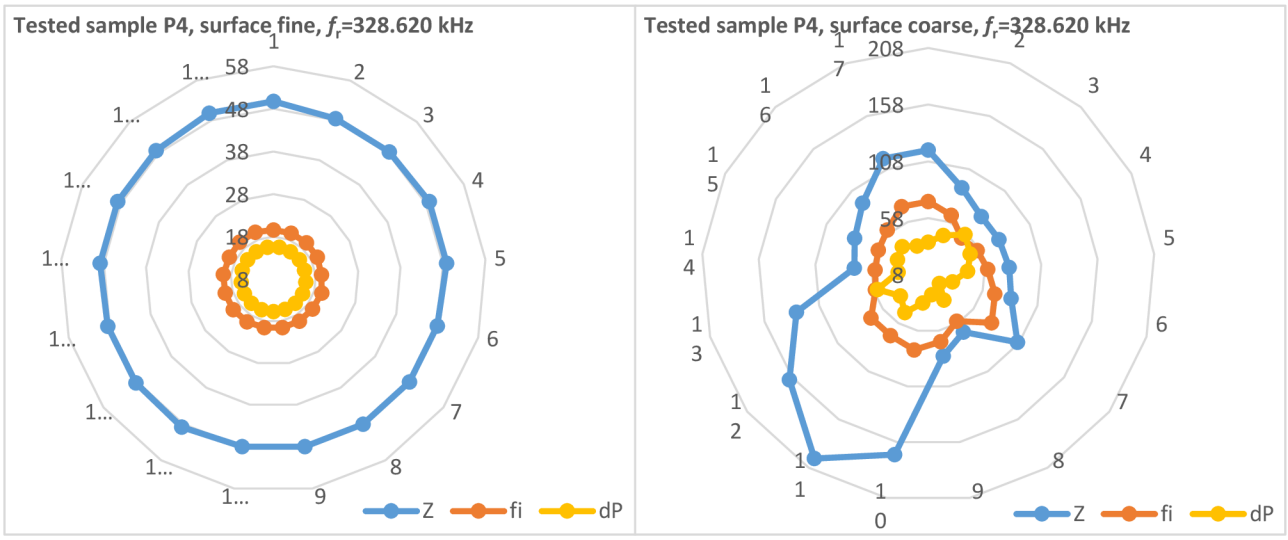
Obr. F-11-6 Grafické vyhodnocení průměrných hodnot součinitele k_α pro dané frekvence stanovené na zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice s drátky DRAMIX

Laboratorně byly také ověřovány předpoklady vlivu rovinnosti povrchu testovaného zkušebního tělesa a převážného směru ocelových vláken. Pro ověření prvního předpokladu byl testován vzorek P4, u něhož byl nejvíce patrný rozdíl v rovinnosti horní povrchové plochy a dolní plochy při výrobě zkušebního tělesa Obr. F-11-7. Zvolena frekvence rezonance byla f_{r1}.



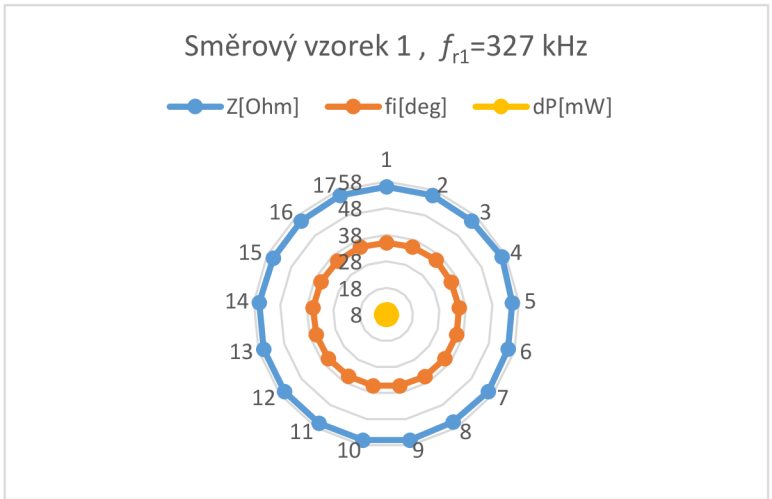
Obr. F-11-7 Zkušební těleso z epoxidové pryskyřice P4 – dolní hladký povrch (vlevo); horní povrch (vpravo)

Z porovnání grafů na Obr. F-11-8 je zřejmý vliv rovinnosti povrchu testovaného vzorku na výsledné hodnoty impedance. Nižší kvalita povrchové vrstvy je prokázána v rozdílnosti hodnot ztrátového výkonu dP_{co} = *39,1 mW,* dP_{fi} = *37,0 mW*.



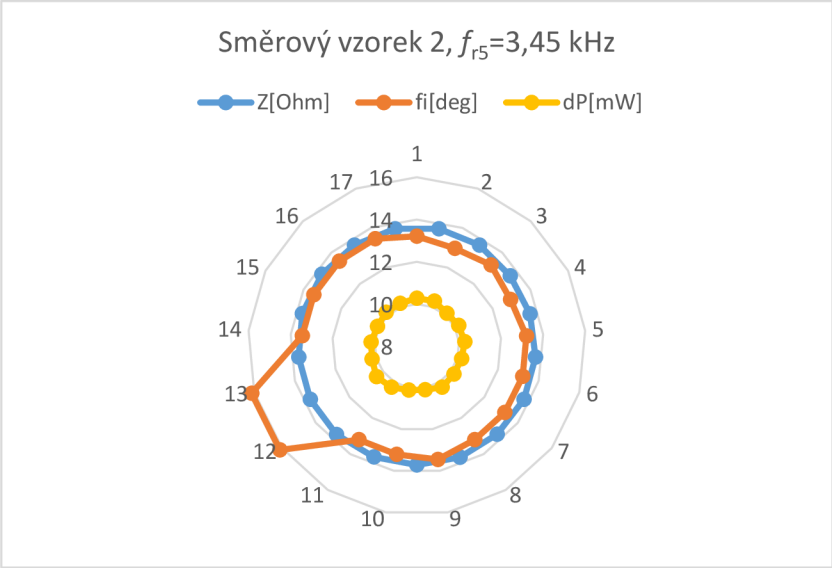
Obr. F-11-8 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot pro P4 – dolní hladký povrch (vlevo); horní povrch (vpravo) [70]

Také byla testována zkušební tělesa označena jako směrový vzorek 1 a směrový vzorek 2. U směrového vzorku 1 byla drátky umístěna vodorovně ve třech vrstvách v podélném směru v pravidelných vzdálenostech. Dle předpokladů by neměly být pozorovány velké změny mezi naměřenými hodnotami, při přikládání elektromagnetické cívky hornímu povrchu zkušebního tělesa. To bylo potvrzeno pro všechny volené frekvence rezonance, například viz Obr. F-11-9.



Obr. F-11-9 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot pro směrový vzorek 1 pro nastavení f_{r1}

U druhého směrového vzorku, ve kterém byly drátky umístěny diagonálně pouze v ¼ kvadrantu zkušebního tělesa, je vliv jejich polohy nejvíce patrný u vyhodnocení měřených hodnot při nastavení frekvence rezonance f_{r5}, viz Obr. F-11-10.

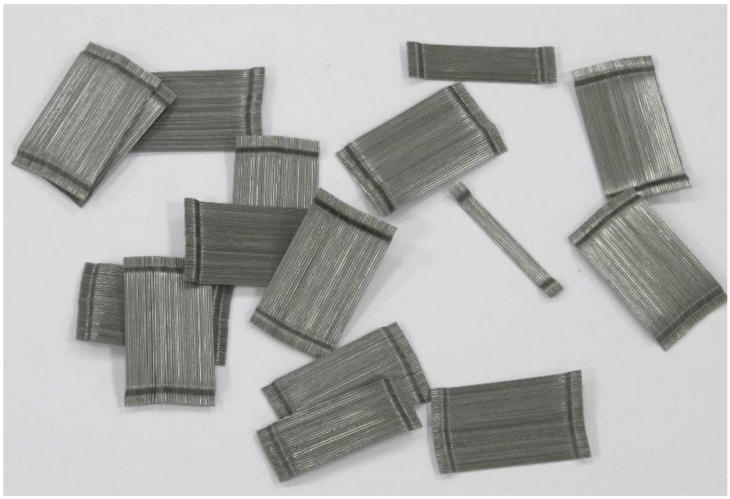


Obr. F-11-10 Grafické vyhodnocení naměřených hodnot pro směrový vzorek 2 pro nastavení f_{r5}

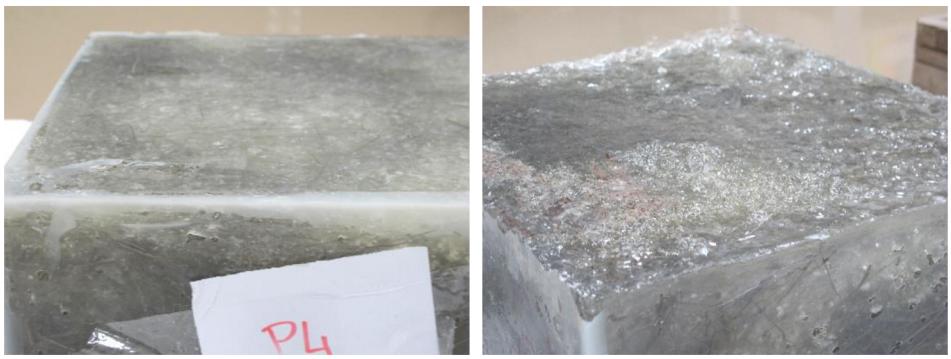
U druhého směrového vzorku, ve kterém byly drátky umístěny diagonálně pouze v ¼ kvadrantu zkušebního tělesa, je vliv jejich polohy nejvíce patrný u vyhodnocení měřených hodnot při nastavení frekvence rezonance f_{r5}, viz Obr. F-11-8.

Z výsledků měření na zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice vyplývá, že navržené měřicí zařízení je velmi citlivé a většina prvotních předpokladů na základě znalostí o fyzikálních vlastnostech navržených kompozitních vzorků a teoretických znalostí o chování elektromagnetického pole byla z větší části potvrzena. Je možné konstatovat, že výsledky testů jsou ovlivňovány kvalitou povrchové vrstvy zkušebního vzorku či hodnoceného prvku. Byl také prokázán vliv převážného směru ocelových vláken v kompozitu dle testů provedených na směrových vzorcích 1a 2. Zkušební tělesa byla vyrobena tak, aby technologický postup výroby se co nejvíce přiblížil výrobě těles z drátkobetonu. Koncentrace ocelových vláken byla volena s ohledem na požadavky stavební praxe a také proto, aby byly rozdíly koncentrací mezi jednotlivými tělesy v řádech desítek kg/m^3. Při laboratorních testech se nepodařilo jasně prokázat správnost naměřených

hodnot, jelikož výsledky měření byly porovnávány pouze se vstupními parametry návrhu receptury směsi. Pro přesnější ověření relevantnosti dosažených výsledků by bylo vhodné provést porovnání výsledků měření s jinými v dnešní době běžně používanými zkušebními metodami pro hodnocení koncentrace ocelových vláken, jednak pomocí NDT metod ale především provést vyhodnocení na základě odběru jádrových vývrtů. Aplikovat destruktivní metody zkoušení na pryskyřicových tělesech však nebylo z praktického hlediska v takovémto množství proveditelné. A proto zjištěné poznatky vyplývající z laboratorních testů pryskyřicových těles byly následně aplikovány v další etapě experimentální části dizertační práce.

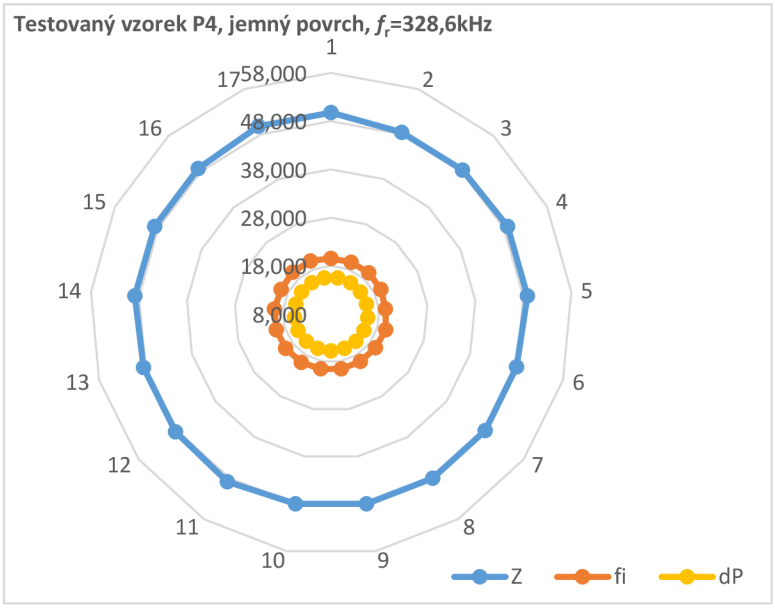


Obr. F-11-11 Příklad testovaných ocelových drátků (elementů) kompozitního materiálu



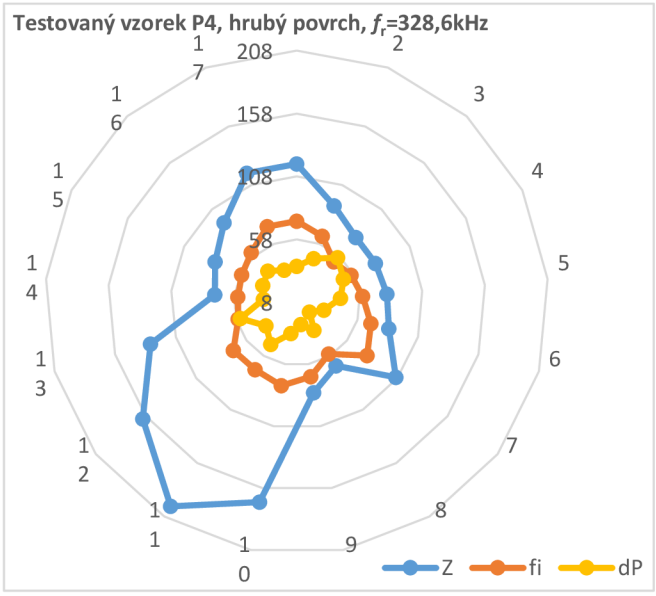
Obr. F-11-12 Vzorek kompozitního materiálu a) rovinná kontaktní plocha, b) hrubý kontaktní povrch

Pro testování a vyhodnocení měrné hustoty [70] sledovaných částí kompozitu ρ , Obr. F-11-11, v bloku vzorku, Obr. F-11-12, byly vyhodnoceny ztráty $dP\ \ [W]$ v měřené oblasti s objemem V . Pro vzorek P4 z Obr. F-11-13 je možné pro frekvenci f_r = 328,6 kHz jak po straně hladké (Δx_{fi} < 0,2mm), tak ze strany s nerovností povrchu $\Delta x_{fi} \cong$ 10mm, byly vyhodnoceny ztráty dP_{co} = 39,1 μW, dP_{fi} = 37,0 mW, fantomové struktury prosté kovových elementů kompozitu dP_{fant} = 0,349 mW a charakteristiky rozložení kompozitu byly analyzovány rozdílně, Obr. F-11-13, Obr. F-11-14, Obr. F-11-15. Obdobný test byl proveden pro te;ntýž vzorek P4 f_r = 146,00 kHz jak po straně hladké, (Δx_{fi} < 0,2mm), tak ze strany s nerovností povrchu $\Delta x_{fi} \cong$ 10mm, byly vyhodnoceny ztráty dP_{co} = 30,6m W, dP_{fi} = 36,6 mW, fantomové struktury prosté

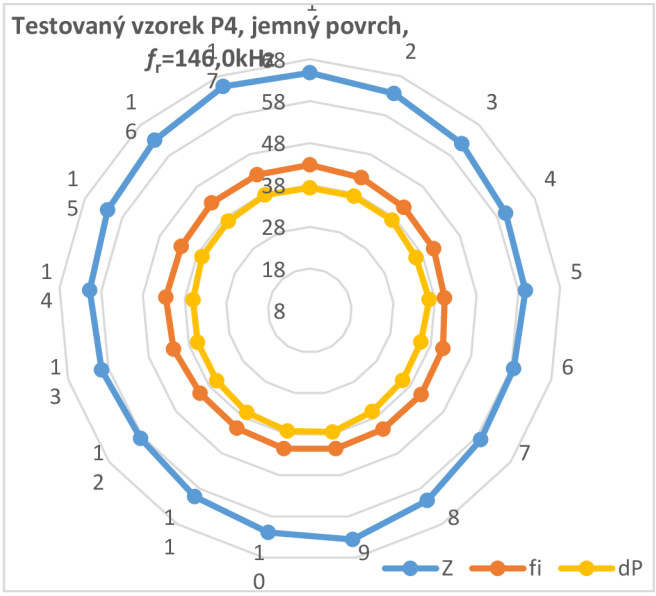


Obr. F-11-13 Vyhodnocení měření modulu impedance a fáze impedance testovaného vzorku P4, f_r = kHz ze strany hladké s nerovností Δxfi < 0,2mm

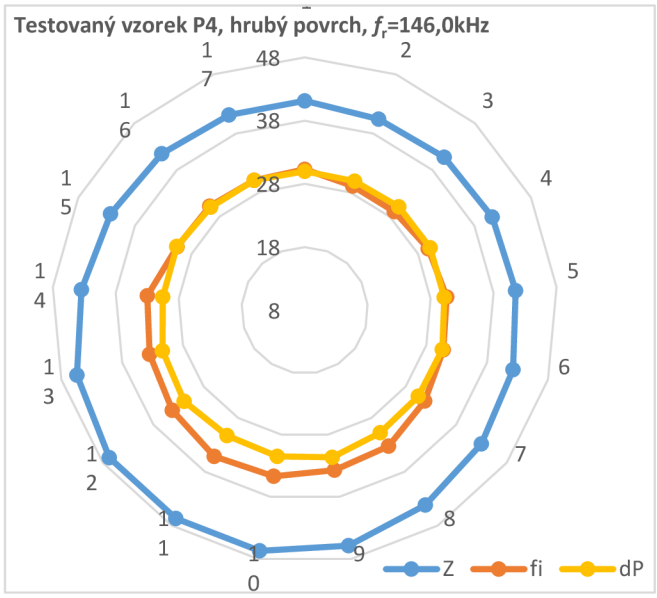
kovových elementů kompozitu dP_{fant} = 22,8 mW, Obr. F-11-16, Obr. F-11-17, Obr. F-11-18.



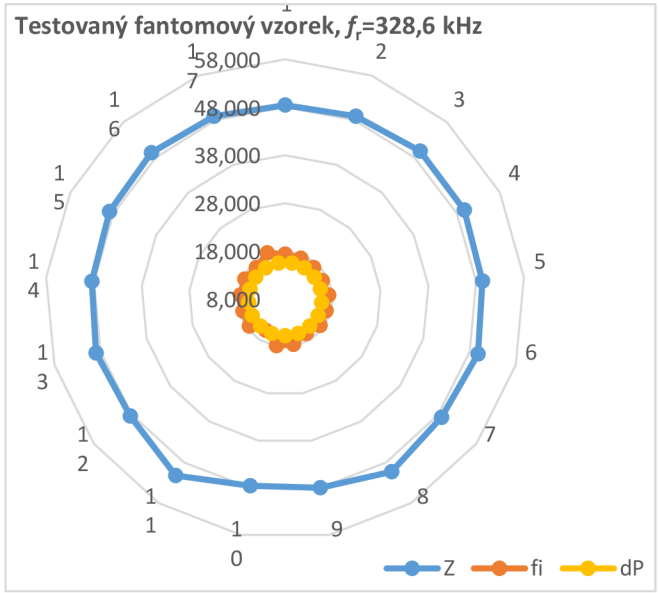
Obr. F-11-14 Vyhodnocení měření modulu impedance a fáze impedance testovaného vzorku P4, f_r = kHz ze strany hrubé nerovnosti Δxfi < 10mm.



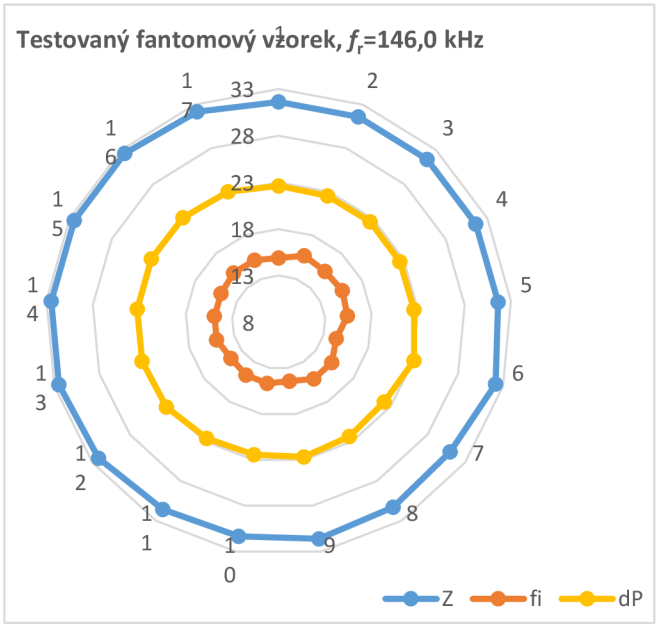
Obr. F-11-15 Vyhodnocení měření modulu impedance a fáze impedance testovaného vzorku P4, f_r = 146,0 kHz ze strany hladké s nerovností Δxfi < 0,2 mm.



Obr. F-11-16 Vyhodnocení měření modulu impedance a fáze impedance testovaného vzorku P4, f_r = 146,0 kHz ze strany hrubé nerovnosti $\Delta xfi \cong$ 10 mm.



Obr. F-11-17 Vyhodnocení měření modulu impedance a fáze impedance testovaného vzorku, f_r = kHz bez ocelových elementů kompozitu.



Obr. F-11-18 Vyhodnocení měření modulu impedance a fáze impedance testovaného vzorku, f_r = 146,0 kHz bez ocelových elementů kompozitu

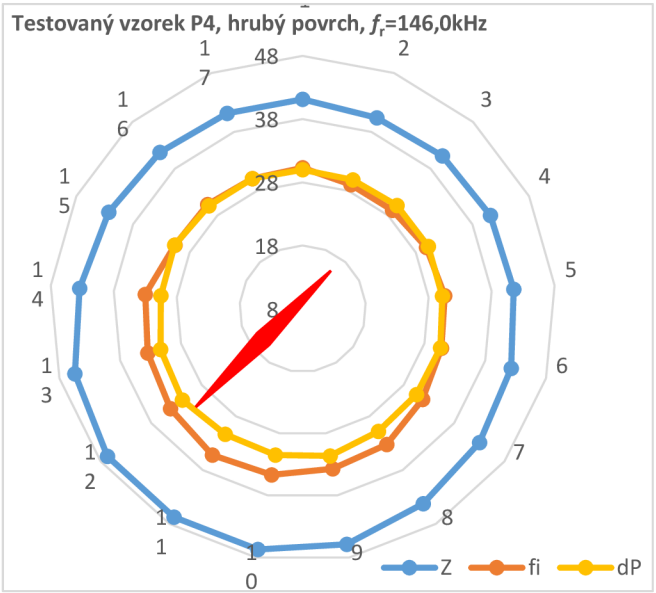
Vzorky bloků, které byly testovány a vyhodnocovány na rozložení (homogenitu) složek kompozitního materiálu, Obr. F-11-11, byly analyzovány pro frekvence f_{r1} = 3,450kHz, f_{r2} = 21,900kHz, f_{r3} = 50,120kHz, f_{r4} = 146,000 kHz, f_{r5} = 3 kHz. Tyto frekvence byly nastavovány pro to, aby bylo možné vyhodnotit ztrátový výkon dP az něho objemovou hustotu ρ sledovaných kovových element. Pomocí jednoduchého testu byly stanoveny objemy V_i, kde i = 1,..5, aktivně zasažené magnetickým polem generovaným pomocí magnetického nástavce z Obr. E-7-2. Pro vyhodnocení objemové hustoty ρ je možné dále využít vyhodnocené objemy $V_5 \cong 75\text{cm}^3$ (f_{r5} = 3 kHz), $V_4 \cong 375\text{cm}^3$ (f_{r4} = 146,000 kHz) $V_3 \cong 600\text{cm}^3$ (f_{r3} = 50,120 kHz) $V_2 \cong 900\text{cm}^3$ (f_{r2} = 21,900 kHz), $V_1 \cong 1125\ \text{cm}^3$ (f_{r1} = 3,450 kHz). Pomocí koeficientu k_v lze stanovit měřenou hustotu kovového kompozitu ρ_{sam} pro náš případ je uvažována ocel s měrnou elektrickou vodivostí γ = 9,93 MS/m, objemovou hustotou ρ_{fe} a výsledná objemová hustota testovaného vzorku dle (19).

Potom podle vztahu (19) a (20) je vyjádřen koeficient obsahu sledované složky kompozitu, z něhož je vyčíslena objemová hustota ρ. Koeficient hustoty sledované složky potom pro vzorek P4 v hloubce do 10 mm od povrchu je ze strany hladkého povrchu $\rho_{P4,f,10mm}$ = 87,2 kg/m^3, ze strany hrubého povrchu $\rho_{P4,co,10mm}$ = -135 kg/m^3.

Obdobně lze analyzovat pro hloubku 50 mm ze strany hladkého povrchu $\rho_{P4,f,50mm}$ = 61,4 kg/m^3, ze strany hrubého povrchu $\rho_{P4,co,50mm}$ = 27,6 kg/m^3. Metoda je citlivá na kvalitu kontaktního povrchu vzorku a snímacího jha. Pokud je kontakt nedostatečný je výsledná hustota výrazně odlišná, Obr. E-8-5, nebo výsledná hustota má dokonce zápornou hodnotu.

Výše uvedené výsledky testů provedených 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. Z Obr. F-11-12 Obr. F-11-18 lze interpretovat nehomogenity rozložení sledované složky kompozitu, ty lze hodnotit ze složek modulu impedance Z, fáze φ a ztrátového výkonu dP v grafické interpretaci radiálního zobrazení



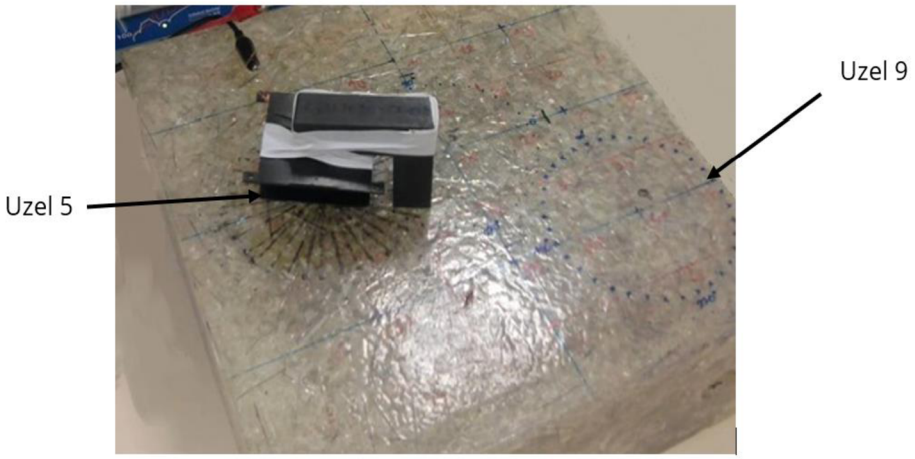
Obr. F-11-19 Měření a vyhodnocení modulu a fáze impedance složky sledované části kompozitu (červená barva) vzorku P4 f_r = 146,0 kHz, měření ze strany s nerovností $\Delta x_{fi} \cong 10mm$

veličin.

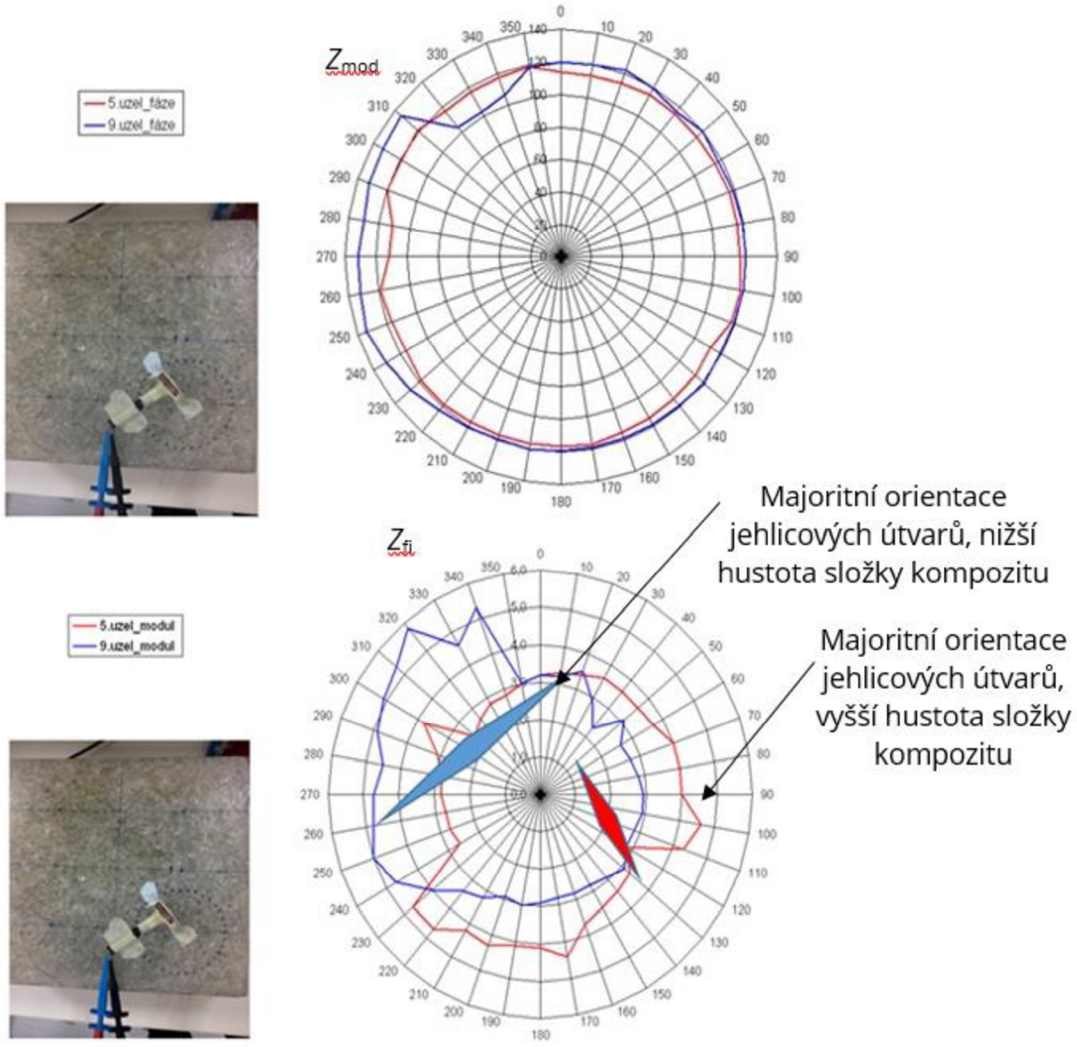
3. Při analýzách, kde jsou vlastnosti testovaného vzorku posuzovány s rozdílnou hloubkou pod povrchem, a při vyhodnocení je nutné zohlednit parametry elektromagnetického pole. Jak bylo výše popsáno, při nekvalitní úpravě

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 z Obr. F-11-12 a Obr. F-11-14 a činných ztrát dP_{co} = 39,1 μW, 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 d*P* 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. F-11-19, lze vyhodnotit nerovnoměrnost rozložení ocelových kompozitů v měřeném místě. Změna fáze signalizuje změnu /nerovnoměrnost rozložení složek, Obr. F-11-21 [71].



Obr. F-11-20 Testování zkušebního vzorku kompozitního materiálu



Obr. F-11-21 Laboratorní vyhodnocení modulu a fáze impedance pro měřicí body 5 a 9 na zkušebním vzorku, vyhodnocení homogenity rozložení sledované složky kompozitu

G. TESTOVÁNÍ NAVRŽENÉ METODIKY NA DRÁTKOBETONOVÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLESECH

Posledním dílčím výzkumným zaměřením dizertační práce bylo ověření funkčnosti a využitelnosti navrženého měřicího zařízení a popsané metodiky vyhodnocení koncentrace a orientace ocelových drátků v drátkobetonu. K experimentům popsaným v následujících kapitolách bylo přistoupeno za účelem se co nejvíce přiblížit 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 radiační (rentgen, počítačová tomografie) a normativní destruktivní metoda pro stanovení reálné hodnoty koncentrace drátků.

12. Laboratorní zkoušky drátkobetonových zkušebních těles

V další etapě experimentální části dizertační práce bylo provést laboratorních zkoušky na drátkobetonových tělesech. Tělesa byla vyrobena speciálně pro ověření navržené metodiky a měřicího zařízení. Celkem byly vyrobeny tři sady těles z drátkobetonu odlišných koncentrací označeny S1, S2 a S3. Receptury jsou uvedeny v Tabulce G-12-1.

Tab. G-12-1 Receptury drátkobetonových směsí [76]

SRFC	Cement 42,5 R	Voda	Vodní součinitel	Kamenivo			Plastifikátor	Ocelová drátky
				0 – 4	4 – 8	8 - 16		
	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[-]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[kg/m^3]
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 navržená 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

Obr. G-12-1 Destruktivní zkouška referenčních těles – drátkobetonové krychle; separace drátků (vpravo)

hodnot byla stanovena koncentrace drátků pro každé zkušební těleso tvaru krychle zvlášť. Následně byly určeny hodnoty obsahu drátků v kg/m^3 pomocí destruktivní metody zkoušení [43]. Určeny byly také pevnosti v tlaku pro každou betonovou záměs. Ocelové drátky byly pomocí magnetu separovány po rozdrcení zkušebního tělesa a následně zváženy, viz Obr. G-12-1.

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

$$k_o = \frac{\rho_{des}}{\rho_c} \tag{40}$$

kde ρ_{des} je hodnota koncentrace ocelových drátků určená destruktivní metodou dle a ρ_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. F-12-2 až Tab. F-12-4.

Tab. G-12-2 Hodnoty koncentrací ρ_{des} a ρ_c a hodnoty opravného součinitele k_o pro S1

S1	ρ_{des}	ρ_c	$k_{o1,i}$	k_{o1}
	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[-]	[-]
S1-K1	36	1102,8	0,0326	0,0319
S1-K2	36	1146,5	0,0314	
S1-K3	36	1136,9	0,0317	

Tab. G-12-3 Hodnoty koncentrací ρ_{des} a ρ_c a hodnoty opravného součinitele k_o pro S2

S2	ρ_{des}	ρ_c	$k_{o2,i}$	k_{o2}
	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[-]	[-]
S2-K1	80	1344,0	0,0595	0,0656
S2-K2	80	1155,4	0,0692	
S2-K3	80	1176,9	0,0680	

Tab. G-12-4 Hodnoty koncentrací ρ_{des} a ρ_c a hodnoty opravného součinitele k_o pro S3

S3	ρ_{des}	ρ_c	$k_{o3,i}$	k_{o3}
	[kg/m^3]	[kg/m^3]	[-]	[-]
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.

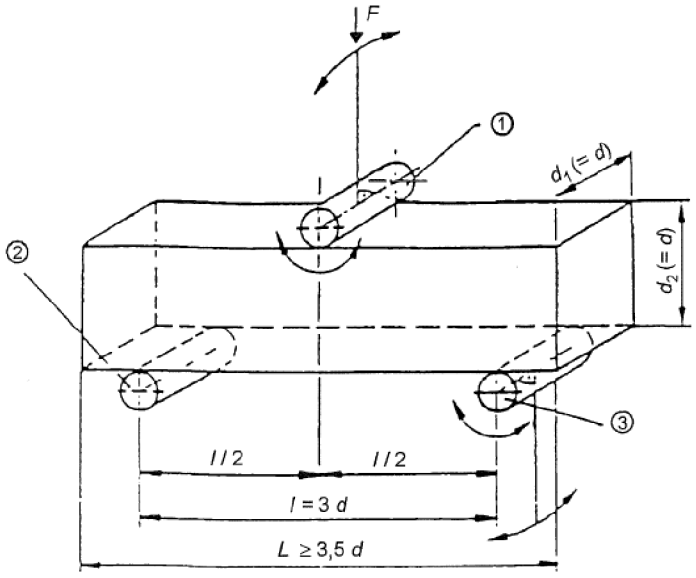
Přítomnost ocelových vláken ani jejich koncentrace nemá zásadní vliv na výsledné hodnoty pevností v tlaku, což prokazují výsledné hodnoty pevností v tlaku uvedené v Tabulce G-12-2.

Tab. G-12-5 Průměrné hodnoty pevností v tlaku a koncentrací ocelových vláken v drátkobetonových krychlích jednotlivých receptur

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

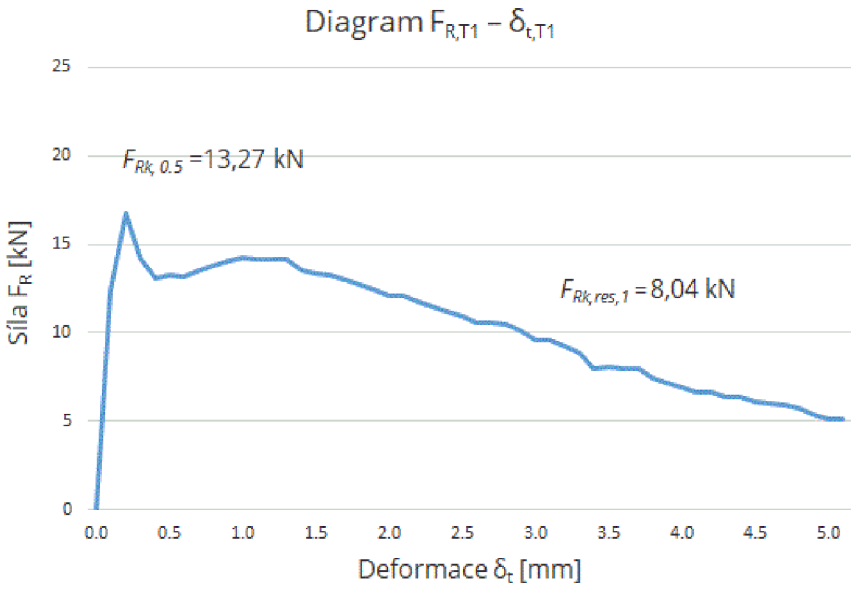
Pro drátkobetony je hlavní zkouškou pevnost v tahu za ohybu, která byla provedena na hranolových zkušebních tělesech. Tělesa byla odzkoušena na tříbodový ohyb pro ověření narůstajícího trendu, kdy zvýšené množství ocelových vláken v kompozitu má za následek zvýšení nejen pevnosti v tahu za ohybu ale také jejich duktility.

Zkouška byla prováděna s řízenou deformací a těleso bylo zatěžováno jedním zatěžovacím válečkem uprostřed rozpětí dle ČSN EN 12390-5 [77] Obr. G-12-2. Zatěžování trámce probíhá rovnoměrnou rychlostí tak, aby průhyb uprostřed trámce rostl při zatěžování rovnoměrně s časem, tj. rovnoměrnou rychlostí zatěžování. Během každé zkoušky jednotlivých zkušebních trámců je proveden záznam průběhu zatěžování a odezvy F_{Ri} – δ_{ti}. Pro každý získaný záznam diagramu se vyhodnotí síla při $F_{Rk,0,5}$ při dohodnutém průhybu $\delta_{t,0,5}$ = 0,5 mm a síla $F_{Rk,res,1}$ při dohodnutém mezním průhybu δ_{t1} = 3,5 mm ve středu rozpětí.



Obr. G-12-2 Schéma testování zkušebního tělesa [76]

V následujících obrázcích jsou znázorněny vyhodnocené průměrné diagramy zavilosti síly na deformaci F_{Ri} – δ_{ti}. Vyznačeny jsou i průměrné hodnoty sil $F_{Rk,\ 0,5}$

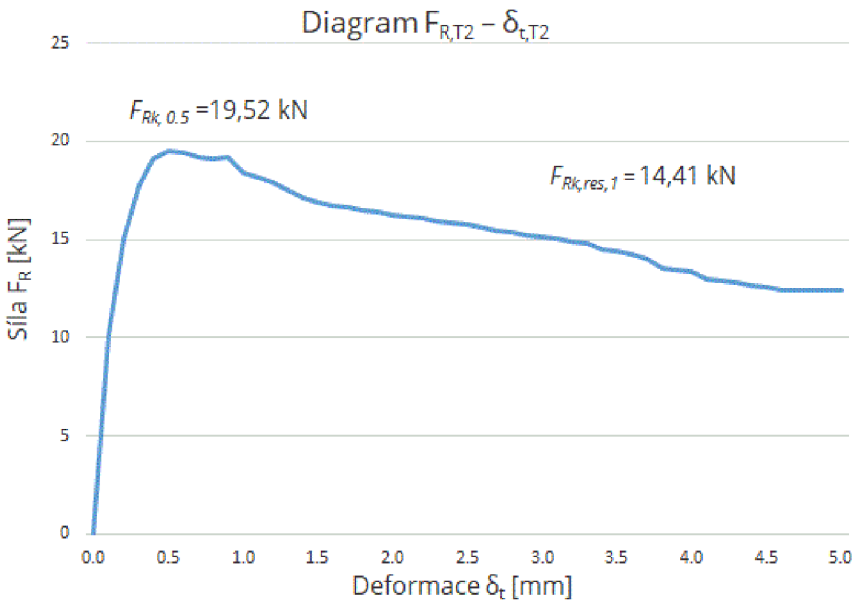


Obr. G-12-3 Průměrný diagram odolnosti pro zkušební tělesa receptury S1 [76]

při dohodnutém průhybu $\delta_{t,0,5}$ = 0,5 mm a síla $F_{Rk,res,1}$ při dohodnutém mezním průhybu δ_{t1} = 3,5 mm. Z grafů je zřejmé, že při zvýšení koncentrace o 40 kg/m^3 se jednak zvyšuje pevnost v tahu za ohybu a také dochází k zvýšení únosnosti po vzniku trhliny. Obr. G-12-3 znázorňuje průměrný diagram F_{Ri} – δ_{tit} pro koncentraci 40 kg/m^3 – sada těles receptury S1. Tento graf je typický pro běžný konstrukční drátkobeton, kdy po vzniku trhliny dochází k výraznému poklesu síly, avšak díky duktilitě a aktivaci ocelových vláken ve vzniklé trhlině únosnost prvku klesá pozvolna. Maximální síla měla hodnotu F_{max} = 16,7 kN a byla dosažena při průhybu δ_t = 0,2 mm

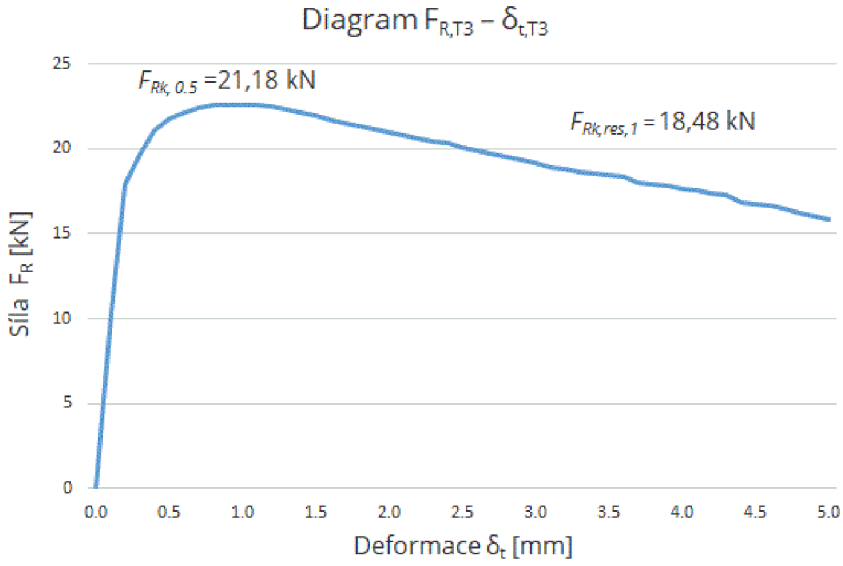
Z výsledků testování těles sady S2 (80 kg/m^3) a z jejich průměrného diagramu F_{Ri} – δ_{tit} Obr. G-12-4 je možné konstatovat, že došlo ke zvýšení celkové únosnosti, kdy síla $F_{Rk,0,5}$ při předepsaném průhybu $\delta_{t,0,5}$ = 0,5 mm je zároveň rovna maximální dosažené síle F_{max} při zatěžování. Samotný průběh průměrného diagramu napovídá, že během zkoušek ocelové drátky plnily svou funkci a nedošlo k jejich vytažení.

U těles sady S3 (120 kg/m^3) měla dosažená maximální síla hodnotu F_{max} = 22,5 kN při průhybu δ_t = 1,1 mm. U těles daných rozměrů a s touto koncentrací se zdálo být problematické zajištění jejich homogenity. Přesto z průběhu průměrného diagramu Obr. G-12-4 je zřejmé, že byla vyrobena homogenní drátkobetonové tělesa i s takto velkou koncentrací. Celkově je možné konstatovat, že při koncentraci 120 kg/m^3 mají



Obr. G-12-4 Průměrný diagram odolnosti pro zkušební tělesa receptury S2 [76]

drátkobetony velkou únosnost a především duktilitu.



Obr. G-12-5 Průměrný diagram odolnosti pro zkušební tělesa receptury S3 [76]

V porovnání dosažených výsledků měření lze shrnout, že hodnota $F_{Rk,\,0,5}$ sady těles S2 vzrostla o cca 47% oproti $F_{Rk,\,0,5}$ sady těles S1 a u sady těles S3 o 60 %. Dosažená síla $F_{Rk,\,res,\,1}$ sady těles S2 se zvětšila o 79 % v porovnání s $F_{Rk,\,res,\,1}$ sady těles S1a u S3 vláken dokonce asi o 130 %.

Pro lepší pochopení chování zkušebních těles během tříbodového ohybového testu byla použita metoda akustické emise, která je podrobně popsána v Příloze 2 v kapitole 3.2.3. Pro měření akustických emisí byl použit systém měření akustických emisí XEDO společnosti DAKEL (Česká republika). Tento systém se skládal z pěti kanálů. Ochranný snímač eliminoval mechanický a elektrický šum. Pro tato měření byly použity čtyři akustické emisní senzory typu MIDI (vyrobené společností DAKEL), které mají stejný kmitočtový rozsah a byly na povrch vázány včelím voskem [78]. Výsledky průměrných hodnot měřených parametrů získaných z měření AE jsou uvedeny v Tabulce G-12-6.

Tab. G-12-6 Průměrné hodnoty vybraných parametrů získaných z měření AE (variační koeficienty v %) [76]

Označení receptur	Počet událostí	Amplituda signálu AE	Čas trvání signálu AE
	[-]	[mV]	[μs]
S1-T	10218 (1,17)	1647 (0,05)	1684 (0,03)
S2-T	11780 (1,16)	1601 (0,06)	1544 (0,04)
S3-T	14353 (1,18)	1585 (0,05)	1529 (0,05)

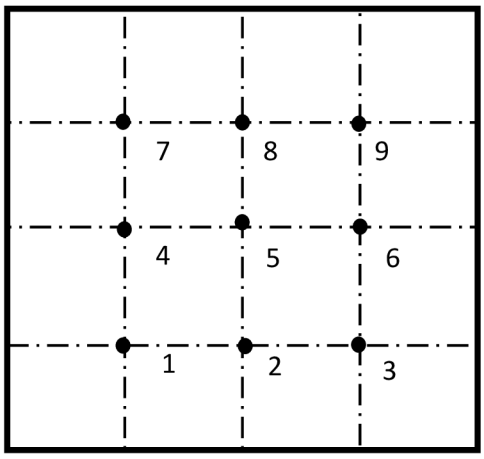
Když snímač AE zachycuje signál nad určitou úrovní, zaznamená se událost AE. Výskyt velkého počtu prasklin vytváří poměrně velký počet událostí během měření. Nejvyšší počet událostí byl zjištěn u vzorků sady zkušebních těles S3 s největším množstvím ocelových drátů. Jelikož množství ocelových drátů klesá, počet událostí AE se mírně zmenšuje. Amplituda je největší naměřené napětí v křivce. To je důležitý parametr při inspekci AE, protože určuje detekovatelnost signálu. Signály s amplitudami pod minimálním právem definovaným provozovatelem se nezaznamenávají. Vyšší amplituda znamená vytvoření větší a významnější trhliny. Hodnoty amplitudy se měřily mezi 1585 a 1647 mV po amplifikaci 65 dB. Se zvětšeným množstvím ocelových drátů se amplituda mírně snížila. Doba trvání

signálu AE je časový rozdíl mezi překročením prvního a posledního prahu. Doba trvání signálů AE dosažená u vzorků s vyšším množstvím ocelových drátů byla nižší než u vzorků s nižším množstvím ocelových drátů. Nicméně pokles trvání signálů AE s rostoucím množstvím ocelových drátů nebyl tak významný.

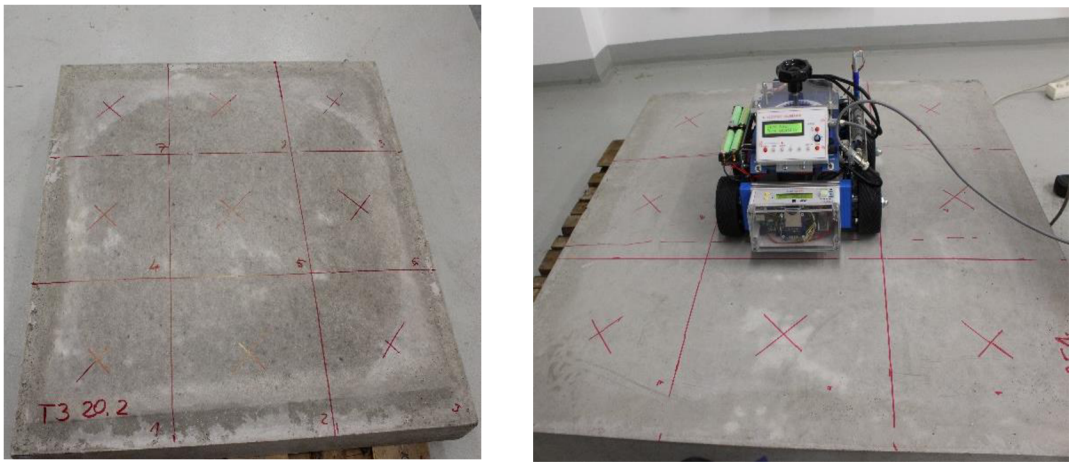
Výsledné hodnoty parametrů signálů AE zaznamenaných během zatěžovacích zkoušek velmi dobře odpovídají výsledkům zkoušek pevnosti v tahu za ohybu, díky čemuž se tato metoda jeví jako vhodná pro lepší pochopení chování zkušebních vzorků při zatížení s kontrolovanými deformacemi.

13. Stanovení koncentrace drátků navrženou NDT metodou

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 a závěrem z nich byly odebrány jádrové vývrty pro ověření koncentrace destruktivní metodou. Na každé z desek o ploše 1000 mm × 1000 mm bylo vyznačeno celkem 9 bodů měření



Obr. G-13-1 Schéma bodů měření na drátkobetonové desce



Obr. G-13-2 Drátkobetonová deska D3, vyznačené body měření, testování koncentrace elektromagnetickou cívkou

symetricky, aby měření pomocí elektromagnetické cívky bylo prováděno v rastru, Obr. G-13-1 a Obr. G-13-2.

Pro testování drátkobetonových desek byly zvoleny pouze dvě frekvence rezonance f_{r4} a f_{r5}. Výsledky výpočtových hodnot koncentrace ocelových vláken v kg/m^3 pro drátkobetonové desky jsou uvedeny v následujících tabulkách Tab. G-13-1 až Tab. G-13-3.

Tab. G-13-1 Výpočtové hodnoty koncentrace ocelových vláken desky D1 v jednotlivých bodech měření v [kg/m^3]

frekvence	Koncentrace ocelových vláken v [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. G-13-2 Výpočtové hodnoty koncentrace ocelových vláken desky D2 v jednotlivých bodech měření v [kg/m^3]

frekvence	Koncentrace ocelových vláken v [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. G-13-3 Výpočtové hodnoty koncentrace ocelových vláken desky D3 v jednotlivých bodech měření v [kg/m^3]

frekvence	Koncentrace ocelových vláken v [kg/m^3] 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 výpočtové hodnoty koncentrací při různých nastaveních frekvence rezonance se vzájemně liší, a to až v řádech 10 kg/m^3. Pro lepší ilustraci dosažených výsledků byly výsledky graficky zpracovány.

14. Validace dosažených výsledků

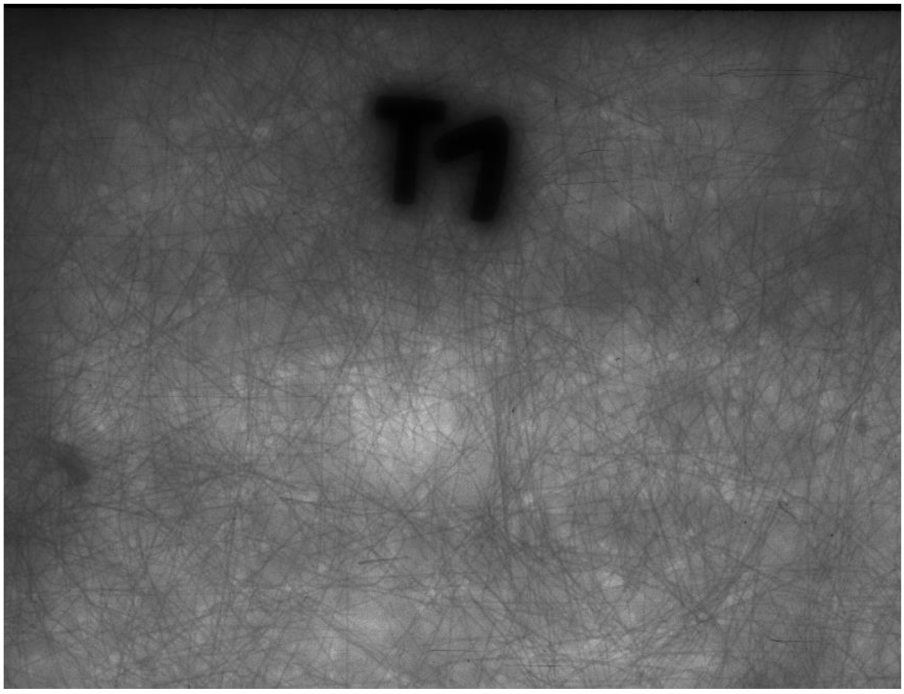
Pro kontrolu homogenity rozptýlení drátků byla zvolena také radiografická metoda, založená na průchodu a zeslabení rentgenového záření. Jako zdroj záření byl použit rentgen YXLON SMART 300 HP, pro záznam prošlého a zeslabeného záření byly užity paměťové folie Dürr v kombinaci se Skenerem CR35 NDT Plus.

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



Obr.G-14-1 Příklad inverzní varianty radiogramu desky D1, kdy objekty s větší hustotou jsou tmavší

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. G-14-1 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. Radiogramy jednotlivých desek jsou uvedeny v Příloze 12.

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 Obr. G-14-2. Místa odběru byla totožná s místy přikládání osy

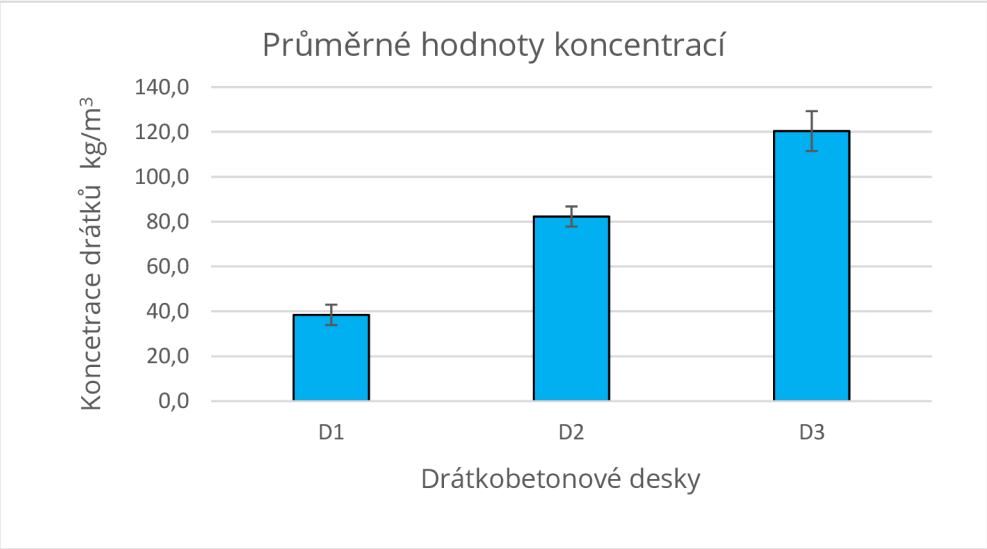
Obr. G-14-2 Odběr jádrového vývrtu z drátkobetonové desky

elektromagnetické cívky. Jádrové vývrty byly upraveny a odzkoušeny na pevnost v tlaku. Po rozdrcení 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 G-14-1 a graficky zpracovány na Obr. G-14-3. Průměrné hodnoty koncentrací ocelových vláken stanovené na jádrových vývrtech se nelišily o více jak 3 kg/m^3 od volených hodnot uvedených v recepturách. Průměrné hodnoty

koncentrací byly stanoveny pro desku D1 38,4 kg/m^3, desku D2 82,3 kg/m^3 a desku D3 120,4 kg/m^3.

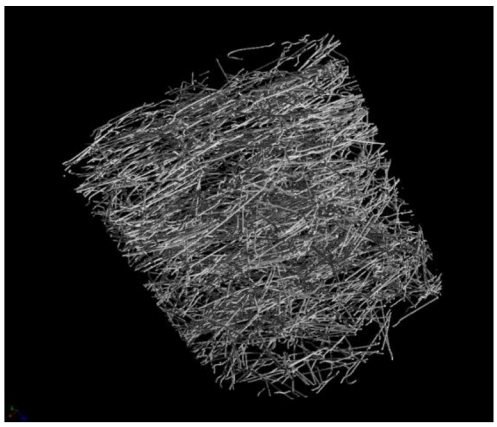
Tab. G-14-1 Hodnoty koncentrací drátků pro jednotlivé vývrty odebrané ze drátkobetonových desek v kg/m^3

Označení jádrového vývrtu	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
Aritmetický průměr	*38,4*	*82,3*	*120,4*
Směrodatná odchylka	*4,55*	*4,47*	*8,88*

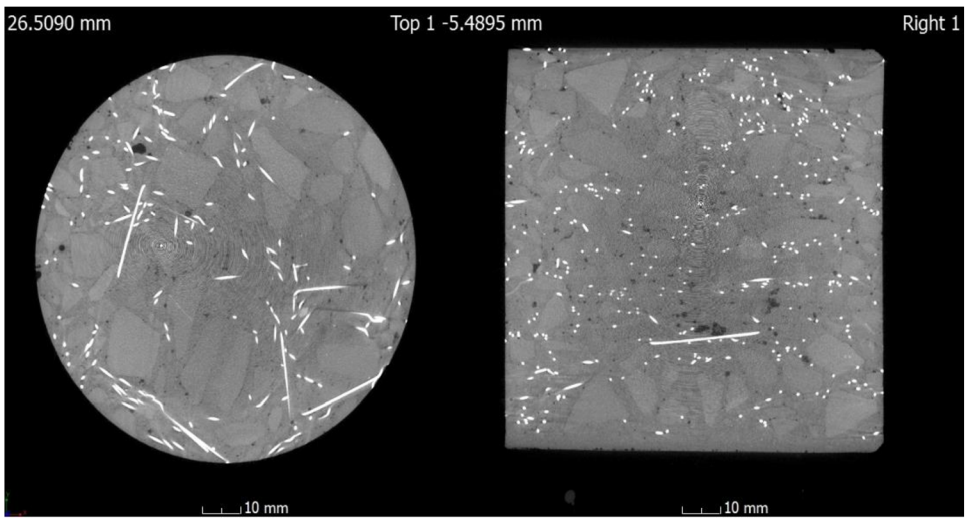


Obr. G-14-3 Průměrné hodnoty koncentrací stanovené na jádrových vývrtech pro každou drátkobetonovou desku

Z hlediska snahy provedení komplexního hodnocení drátkobetonových desek byly na jádrových vývrtech odebraných z desky D2 provedení laboratorní zkoušky pomocí počítačové tomografie. Požadavkem byla pouze možnost vizuální kontroly rovnoměrnosti rozložení ocelových vláken v tělese, viz Příloha 13, i když výsledky měření pomocí CT umožňuje 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. G-15-4, Obr. G-15-5. Z jednotlivých scanů jádrových vývrtů je možné hodnotiti dobrou rovnoměrnost rozložení ocelových drátků, tedy se jedná o homogenní drátkobeton.



Obr. G-14-4 Ukázka 3D vyhodnocení prozařování jádrového vývrtu počítačovou tomografií



Obr. G-14-5 Ukázka 2D vyhodnocení řezu jádrových vývrtů

H. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Navržené měřicí zařízení s popsanou metodou měření bylo nejprve laboratorně testováno pro ověření 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 nahodilé chyby 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 nástavce 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=120mm). Přepokládaný maximální dosah navrženého zařízení je 100 mm od povrchu vzorku nelze úplně vyloučit vzhledem k nelineární povaze provedeného měření.

Vyhodnocení orientace vláken (ocelových drátků v kompozitu) testované pomocí polykarbonátového vzorku na tvar elektromagnetického pole a velikost impedance (modulu, fáze) byl určen, ale není tak dominantní, jako u vyhodnocení koncentrace. Z dílčích popsaných experimentů při testování polykarbonového vzorku popsaných v kapitole F 10 vyplývá, že nebyl vhodně zvolen testovací vzorek, 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 ¼ 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 jho 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.

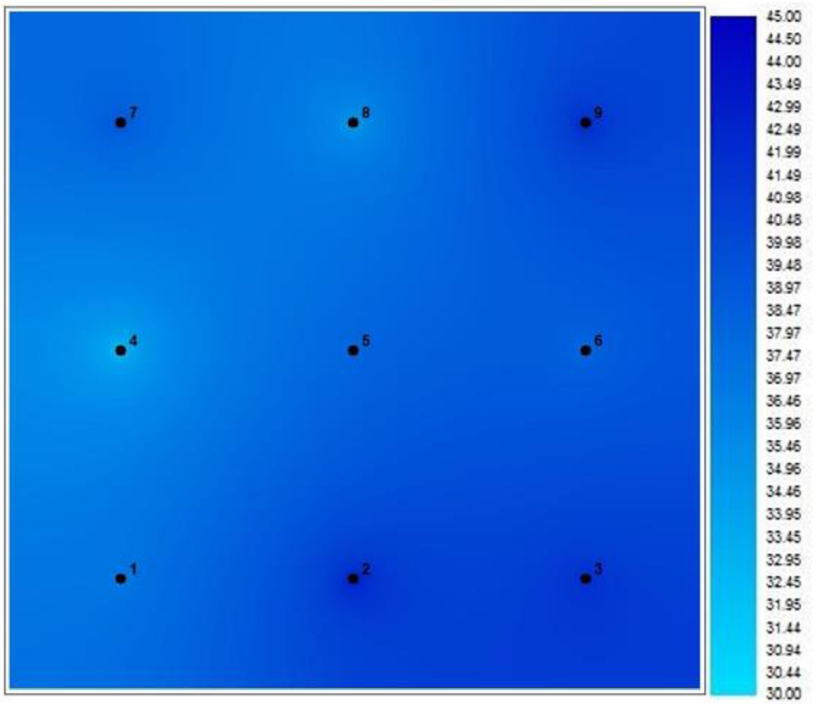
Speciálně vyrobené drátkobetonové desky byly zhotoveny pro simulaci reálné situace mimo laboratorní případy, ve stavební praxi. Také proto ke každé drátkobetonové desce byla vyrobena referenční (doprovodná) zkušební tělesa (krychle, trámec). Testovány byly nejprve drátkobetonové krychle. Byly určeny vybrané mechanické vlastnosti – pevnosti v tahu za ohybu na drátkobetonových trámcích a pevnosti v tlaku na drátkobetonových krychlí. 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 popsané 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

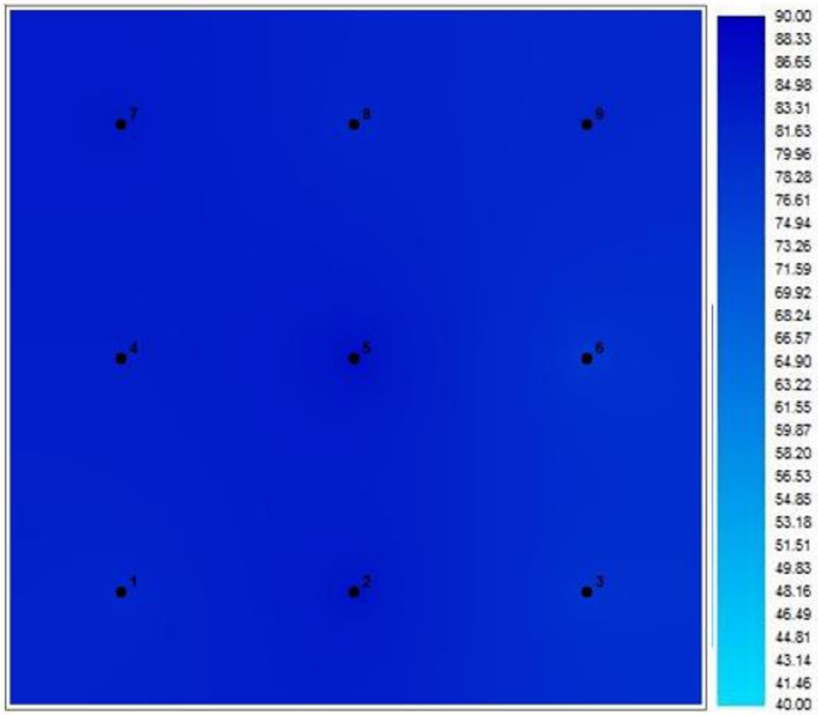
$$k_o = \frac{\rho_{des}}{\rho_c}, \tag{41}$$

kde je ρ_{des} koncentrace drátků určená na jádrových vývrtech a ρ_c koncentrace drátků určena na základě měření navrženou elektromagnetickou cívkou byla určena hodnota opravného součinitele k_o pro každou drátkobetonovou desku dané koncentrace, Příloha 11, Tab. P11-1 až P11-3. Tímto součinitelem byly opraveny naměřené hodnoty koncentrací určené z měření pomocí elektromagnetické cívky. Upřesněné výpočtové průměrné hodnoty koncentrací byly stanoveny pro desku D1 (40kg/m^3) 37,6 kg/m^3, desku D2 (80kg/m^3) 72,1 kg/m^3, desku D3 (120kg/m^3) 116,7 kg/m^3. Pro lepší interpretaci dosažených výsledků bylo provedeno

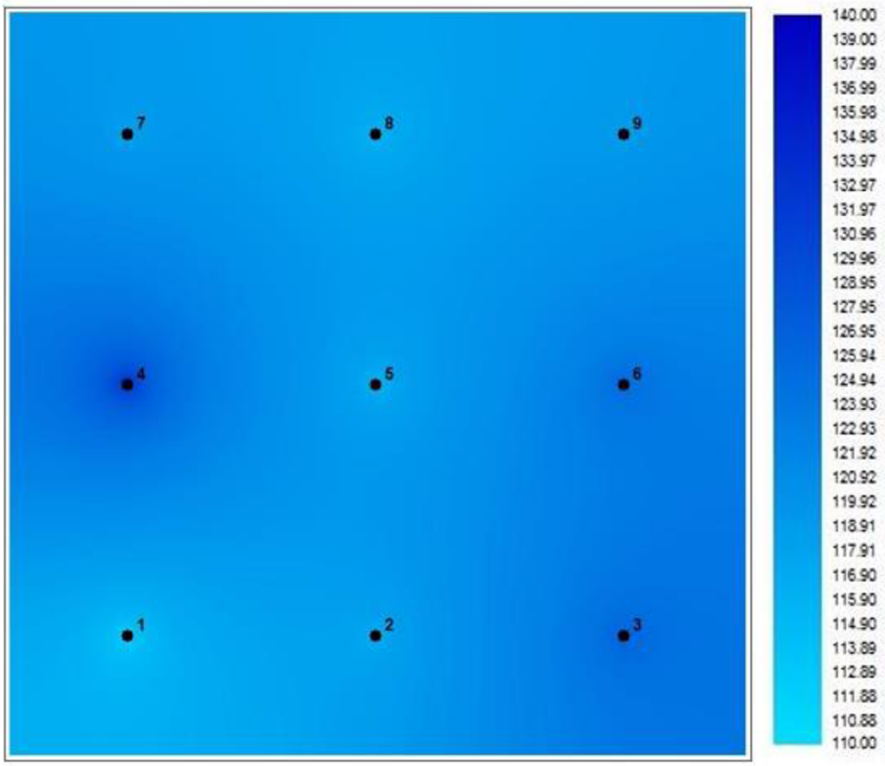
grafické vyhodnocení koncentrací drátků pro každou desku po ploše, Obr. H-1 až Obr. H-3. Z těchto obrázků lze konstatovat, že byl dodržen technologický postup výroby, tedy se jedná o homogenní drátkobeton. Stejné závěry je možné vyvozovat z vyhodnocení testů pomocí počítačové tomografie. Na Obr. H-4 jsou sestaveny 3D obrazy jádrových vývrtů odebraných z desky D3.



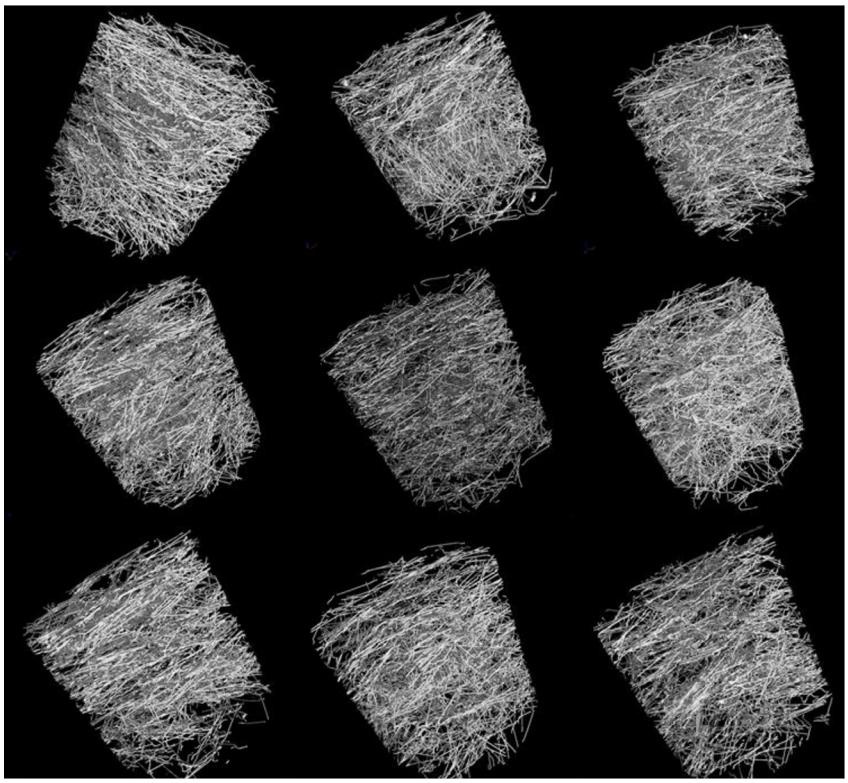
Obr. H-1 Grafické vyhodnocení koncentrace desky D1



Obr. H-2 Grafické vyhodnocení koncentrace desky D2

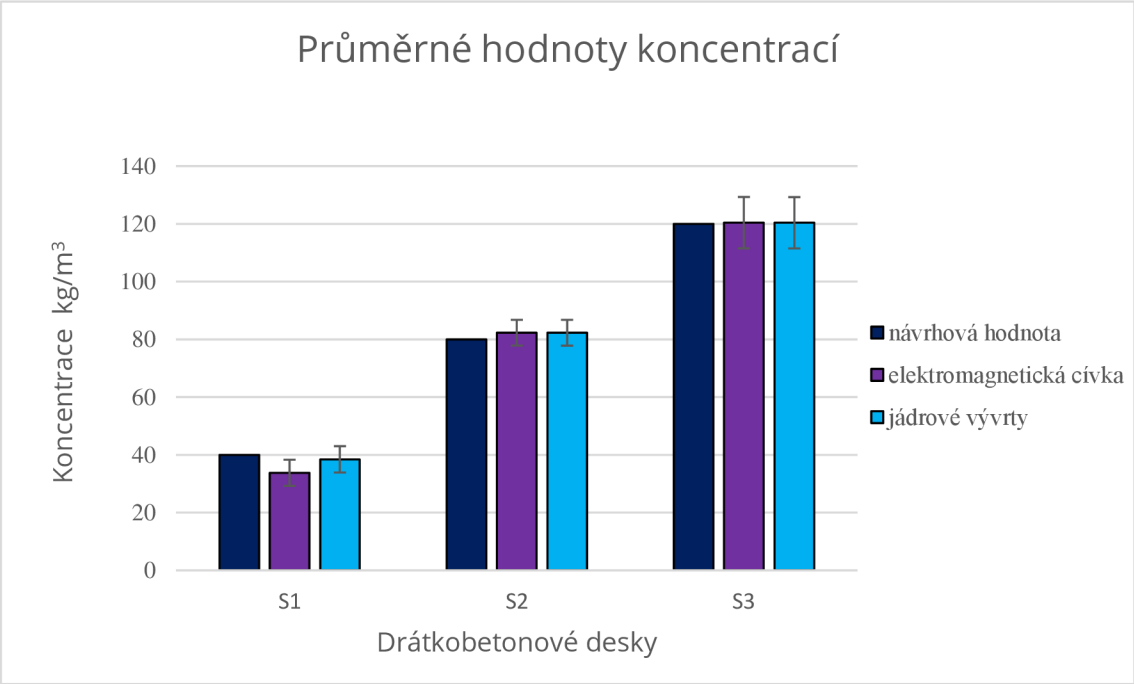


Obr. H-3 Grafické vyhodnocení koncentrace desky D3



Obr. H-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 navrhovanou metodou za užití opravného součinitele určeného na referenčních tělesech je uvedeno na Obr. H-5. Dosažené výsledky prokazují využitelnost nově navržené metody a experimentálního měřicího zařízení při měření a vyhodnocení koncentrace a homogenity drátkobetonu NDT metodami.



Obr. H-5 Grafické porovnání návrhové koncentrace, určené elektromagnetickou cívkou a destruktivní metodu

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 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, potvrzující i výsledné hodnoty pevností v tlaku určené na referenčních tělesech a také výsledky pevnosti v tahu za ohybu stanovené na drátkobetonových trámcích.

Přesto že samotné naměřené hodnoty elektromagnetickou metodou NDT neodpovídají voleným koncentracím drátků v navržených recepturách, lze konstatovat, že rovnoměrnost drátků v drátkobetonových deskách různých koncentrací byla potvrzena všemi užitými NDT metodami včetně nově navrženého NDT přístroje s ověřením normativní metody, odběru jádrových vývrtů.

Z toho vyplývá, že unikátní navržené 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 tlouštěk, kdy v běžné stavební praxi 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.

I. PŘÍNOS DIZERTAČNÍ PRÁCE

Předkládaná dizertační práce se zabývá problematikou v oboru měření a metrologie NDT pro hodnocení stavebního materiálu, a tím je drátkobeton. V práci bylo stanoveno několik hlavních cílů a ty byly postupně řešeny. Doposud není legislativně ani v oblasti odborné literatury na mezinárodní úrovni popsána NDT metoda, pomocí které by bylo možné hodnotit nejdůležitější parametr drátkobetonu – jeho homogenitu.

V práci byla navržena a testována NDT diagnostika založená na měření elektrické impedance. Tato metodika a metoda byla patentována, provedené experimenty byly publikovány v IF časopisech a na mezinárodních konferencích.

Byl navržen a ověřen koncept měřicího zařízení, byla provedena řada laboratorních testů jak elektrické části měřicího zařízení, tak jeho schopnost vyhodnocení koncentrace složky kompozitního materiálu a jeho vlastnost- orientace ocelových vláken. Byly zkoumány a nalezeny zákonitosti měřené veličiny – elektrické impedance na vzdálenosti a koncentraci vláken od povrchu vzorku materiálu. Byly testovány rozdílné frekvence rezonančního obvodu pro vyhodnocení měřeného materiálu a popsány závislosti přesnosti měření na frekvenci.

V práci byla popsána a experimenty ověřena metodika hodnocení kvality drátkobetonových těle. Byla provedena validace metodika pomocí nezávislých měřicích metod.

V práci byla prokázána využitelnost navržené elektromagnetické NDT měřicí metody a její použitelnost při validaci drátkobetonových konstrukcí se závěrem nalezení využitelného zařízení pro nelaboratorní prostředí- praxi.

Ve výzkumu se ukázalo několik potřebných témat řešení, například nalezení nelineárních funkcí vlivu vířivých proudů a magnetické vodivosti ovlivňující přesnost měření drátkobetonových těles s vysokou koncentrací ocelových drátků. Nalezení funkcí by mohlo řádově metodu rozvinout na vyhodnocení extrémních koncentrací drátků a zachovat její přesnost.

Při výzkumu metody se ukázalo, že by bylo vhodné využívat rozdílných frekvencí rezonance senzoru a měřeného tělesa, a to pro možnost vyhodnocení koncentrace drátků nejen v ploše (2D) ale i v hloubce pod povrchem (3D.)

Tato témata doposud nebyla výrazně publikována a byla by dalším přínosem předložené disertační práce.

J. 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 parametrů 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 popsaná 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.

Použité zkratky a symboly

Zkratky

AE	*Akustická emise*
CT	*Počítačová tomografie*
μCT	*Počítačová mikrotomografie*
ČR	*Česká republika*
EMG	*Elektromagnetické pole*
FAST	*Fakulta stavební*
FEKT	*Fakulta elektrotechniky*
NDT	*Nedestruktivní tetsování (Non-destructive testing)*
SFRC	*Steel fiber reinforce conceret*
SZK	*Ústav stavebního zkušebnictví*
UTEE	*Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky*
VUT (BUT)	*Vysoké učení technické (Brno university of technology)*

Symboly

A, B, C	*Rozměry feromagnetického nástavce*
C	*Kapacita*
c	*Kapacita elektrického obvodu*
D	*Vzdálenost cívky od povrchu zkušebního tělesa*
dP	*Změna hodnoty výkonu*
dP_{fant}	*Hodnota výkonu určená na referenčním tělese*
dX, dY	*Vzdálenosti popisující posun elektromagnetické cívky*
δ_{ti}	*Průhyb zkušebního tělesa*
$\delta_{t,0,5}$	*Dohodnutý průhyb 0,5 mm zkušebního tělesa*
$\delta_{tk,cr}$	*Dohodnutý průhyb na mezi vzniku makrotrhliny zkušebního tělesa*
$\hat{E}$	*Komplexní vektor intenzity elektrického pole*
f	*Frekvence*
f_d	*Dolní frekvence rezonanční křivky*
f_r	*Frekvence rezonance*
f_{ri}	*Volená frekvence rezonance*
F_{max}	*Maximální síla*
$F_{Rk,\ cr}$	*Síla při průhybu na mezi vzniku makrotrhliny* $\delta_{tk,cr}$

$F_{Rk,\ 0,5}$	*Síla při dohodnutém průhybu $\delta_{t,\ 0,5}$ = 0,5 mm*
$F_{Rk,\ res,\ 1}$	*Síla při dohodnutém mezním průhybu δ_{t1} = 3,5 mm*
φ	*Fáze impedance – upravená hodnota*
φ_0	*Fáze impedance*
Φ	*Magnetický tok*
$\hat{H}$	*Komplexní vektor intenzity magnetického pole*
i	*Elektrický proud*
I	*Modul elektrických proudů*
k_a	*Analytický koeficient*
k_o	*Opravný součinitel*
k_v	*Koeficient sledované sloky kompozitu*
L	*Indukčnost*
M	*Vzájemná indukčnost*
μ_r	*Relativní permeabilita*
ω	*Úhlová frekvence*
P	*Ztrátový elektrický výkon*
$\hat{\Pi}$	*Komplexní vektor měrné hustoty elektrického výkonu*
Q_d	*Koeficient kvality – dolní mez*
Q_h	*Koeficient kvality – horní mez*
Q_{max}	*Koeficient kvality – maximální hodnota*
Q_{sq}	*Koeficient kvality*
R	*Rezistor*
ρ_c	*Koncentrace ocelových drátků určená elektromagnetickou cívkou*
ρ_d	*Návrhová hodnota koncentrace ocelových drátků*
ρ_{des}	*Koncentrace ocelových drátků určená destruktivní zkušební metodou*
ρ_{Fe}	*Hustota oceli*
ρ_{sam}	*Koncentrace drátků ve zkušebním tělese v kg/m^3*
t	*Čas*
u	*Elektrické napětí*
$\hat{U}$	*Komplexní tvar elektrického napětí*
V	*Objem*
Z	*Impedance*
$\hat{Z}$	*Komplexní impedance*
$\hat{Z}_c$	*Modul impedance kondenzátoru*

$\hat{Z}_L$	*Modul impedance indukčnosti*
Z_m	*Modul Impedance – upravená hodnota*
Z_0	*Modul impedance*
$Z_{0,Re}$	*Reálná složka* Z_0
$Z_{0,Im}$	*Imaginární složka* Z_0
ω	*Úhlová frekvence*

Seznam tabulek

Tab. E-8-1	*Hodnoty frekvence a kapacity pro 5 variant nastavení elektrického obvodu*	*47*
Tab. F-9-1	*Průměrné hodnoty f_i se směrodatnými odchylkami pro jednotlivé frekvence v daných hloubkách umístění polystyrenového plátu s ocelovými drátky*	*59*
Tab. F-9-2	*Průměrné hodnoty Z se směrodatnými odchylkami pro jednotlivé frekvence v daných hloubkách umístění polystyrenového plátu s ocelovými drátky*	*59*
Tab. F-9-3	*Výpočtové hodnoty koncentrací pro jednotlivé frekvence v závislosti vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky*	*64*
Tab. F-10-1	*Průměrné hodnoty f_i se směrodatnými odchylkami pro jednotlivé frekvence v daných hloubkách umístění polykarbonového plátu s ocelovými drátky*	*67*
Tab. F-10-2	*Průměrné hodnoty Z se směrodatnými odchylkami pro jednotlivé frekvence v daných hloubkách umístění polykarbonového plátu s ocelovými drátky*	*68*
Tab. F-10-3	*Výpočtové hodnoty koncentrací pro jednotlivé frekvence v závislosti vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky*	*72*
Tab. F-11-1	*Složení směsí druhé sady zkušebních těles z epoxidové pryskyřice s volenou koncentrací ocelových vláken s různými druhy ocelových vláken [14]*	*77*
Tab. F-11-2	*Složení směsí první sady zkušebních těles z epoxidové pryskyřice s volenou koncentrací ocelových vláken se stejným typem ocelových vláken*	*78*
Tab. F-11-3	*Výpočtové hodnoty koncentrace ocelových vláken v kg/m³ ve zkušebních tělesech P2 – P5 a P80 pro jednotlivé frekvence rezonance*	*80*
Tab. F-11-4	*Hodnoty součinitele k_a pro jednotlivé frekvence stanovené na zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice*	*81*
Tab. F-11-5	*Výpočtové hodnoty koncentrace ocelových vláken v kg/m³ ve zkušebních tělesech TRITREG a DRAMIX pro jednotlivé frekvence rezonance*	*82*
Tab. F-11-6	*Hodnoty součinitele k_a pro jednotlivé frekvence stanovené na zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice s drátky TRITREG A DRAMIX*	*83*
Tab. G-12-1	*Receptury drátkobetonových směsí [76]*	*96*
Tab. G-12-2	*Hodnoty koncentrací ρ_{des} a ρ_c a hodnoty opravného součinitele k_o pro S1*	*97*
Tab. G-12-3	*Hodnoty koncentrací ρ_{des} a ρ_c a hodnoty opravného součinitele k_o pro S2*	*97*
Tab. G-12-4	*Hodnoty koncentrací ρ_{des} a ρ_c a hodnoty opravného součinitele k_o pro S3*	*98*
Tab. G-12-5	*Průměrné hodnoty pevností v tlaku a koncentrací ocelových vláken v drátkobetonových krychlích jednotlivých receptur*	*98*
Tab. G-12-6	*Průměrné hodnoty vybraných parametrů získaných z měření AE (variační koeficienty v %) [76]*	*102*
Tab. G-13-1	*Výpočtové hodnoty koncentrace ocelových vláken desky D1 v jednotlivých bodech měření v [kg/m³]*	*105*
Tab. G-13-2	*Výpočtové hodnoty koncentrace ocelových vláken desky D2 v jednotlivých bodech měření v [kg/m³]*	*105*
Tab. G-13-3	*Výpočtové hodnoty koncentrace ocelových vláken desky D3 v jednotlivých bodech měření v [kg/m³]*	*105*
Tab. G-14-1	*Hodnoty koncentrací drátků pro jednotlivé vývrty odebrané ze drátkobetonových desek v kg/m³*	*108*

Seznam obrázků

Obr. B-4-1	*Schéma principu prozařování zkušebního tělesa pomoc CT.....*	*18*
Obr. B-4-2	*a) Zobrazení separovaných ocelových drátků se směrovou analýzou (vlevo) b) Axonomické zobrazení transparentního vzorku krychle pomocí CT (vpravo).....*	*19*
Obr. B-4-3	*Příklad klasického zobrazení radiogramu při prozáření drátkobetonové desky tloušťky 100 mm, kdy zčernání je úměrné prošlé dávce záření. Objekty s větší hustotou jsou světlejší a vpravo inverzní varianty radiogramu, objekty s větší hustotou jsou tmavší.....*	*20*
Obr. B-4-4	*Ukázka grafického znázornění přednostní orientace drátků v testovaných vzorcích.....*	*21*
Obr. B-4-5	*Přístroj BSM 100 pro stanovení obsahu ocelových vláken v drátkobetonu.....*	*22*
Obr. B-4-6	*Schéma sondy PeMaSo a její aplikace na zkušebním tělese.....*	*23*
Obr. B-4-7	*a) Zobrazení intensity magnetického pole (vlevo) b) Zobrazení intensity magnetického pole na jednotlivých drátcích pro danou polohu magnetu (vpravo).....*	*24*
Obr. B-4-8	*Přístroj Melvis – testování pryskyřicového zkušebního tělesa.....*	*24*
Obr. D-1	*Princip impedanční NDT vyhodnocení kvality kompozitního materiálu*	*29*
Obr. E-6-1	*Schéma měřícího zařízení – vzájemné uspořádání feromagnetického nástavce a elektrické cívky vzhledem ke zkoušenému materiálu.....*	*32*
Obr. E-6-2	*Rezonanční křivka průběhu koeficientu kvality.....*	*33*
Obr. E-6-3	*Elektrické schéma nedestruktivního zkoušení kompozitního materiálu.....*	*34*
Obr. E-6-4	*Schéma zapojení náhradního modelu.....*	*34*
Obr. E-6-5	*Elektrické schéma NDT metody.....*	*35*
Obr. E-6-6	*Schéma metody NDT založené na impedanci: vyhodnocení testovaných parametrů vzorku.....*	*39*
Obr. E-6-7	*Schéma metodiky měření pomocí elektromagnetické cívky.....*	*39*
Obr. E-7-1	*Elektrické schéma NDT metody.....*	*42*
Obr. E-7-2	*Navrhované typy cívek, magnetické jho.....*	*43*
Obr. E-7-3	*Měřící vozítko – celkový náhled, upevnění elektromagnetické cívky, ovládací panel.....*	*43*
Obr. E-7-4	*Blokové schéma systému.....*	*44*
Obr. E-7-5	*Ukázka uložených dat na SD kartě.....*	*46*
Obr. E-8-1	*Sestava měřicího přístroje s externě připojeným osciloskopem.....*	*47*
Obr. F-9-1	*Polystyrenová deska s upevněnými ocelovými vlákny.....*	*50*
Obr. F-9-2	*Testování dosahu elektromagnetické cívky pro různá nastavení pomocí polystyrenových desek.....*	*50*
Obr. F-9-3	*Měření hmotnosti testovacích materiálů fantomového kompozitního vzorku –polystyrenové desky a drátková plná vrstva.....*	*51*
Obr F-9-4	*Schéma závislosti testovaného objemu materiálu na frekvenci f budicího signálu, pro frekvenci f_{r1}.....*	*52*
Obr. F-9-5	*Schéma vyhodnocení závislosti testovaného objemu materiálu na frekvenci f budicího signálu, pro frekvence $f_1, < f_2$.....*	*52*
Obr. F-9-6	*Schéma nastavení fantomové desky pro vyhodnocení závislosti testovaného objemu materiálu na frekvenci f budicího signálu.....*	*55*
Obr. F-9-7	*Schéma nastavení fantomové desky pro vyhodnocení závislosti testovaného objemu materiálu na frekvenci f pro závislost na magnetické vodivosti komponentu kompozitního materiálu.....*	*56*

Obr. F-9-8 *Schéma nastavení fantomové desky pro vyhodnocení závislosti testovaného objemu materiálu na frekvenci f pro závislost na elektrické vodivosti komponentu kompozitního materiálu (efekt vířivých proudů)..... 57*
Obr. F-9-9 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_φ pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky..... 60*
Obr. F-9-10 *Grafické vyhodnocení směrodatných odchylek naměřených hodnot Z_φ pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky..... 60*
Obr. F-9-11 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_{mod} pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky..... 61*
Obr, F-9-12 *Grafické vyhodnocení směrodatných odchylek naměřených hodnot Z_{mod} pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky..... 61*
Obr. F-9-13 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_φ a Z_{mod} a směrodatných odchylek pro fr1 = 327,00 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky..... 62*
Obr. F-9-14 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_φ a Z_{mod} pro fr4 = 21,90 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky..... 62*
Obr. F-9-15 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_φ a Z_{mod} pro fr2 = 145,0 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky..... 63*
Obr. F-9-16 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_φ a Z_{mod} pro fr3 = 50,12 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky..... 63*
Obr. F-9-17 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_φ a Z_{mod} pro fr5 = 3,45 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky..... 64*
Obr. F-9-18 *Grafické vyhodnocení výpočtových hodnot koncentrací pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky. 65*
Obr. F-9-19 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot hustoty komponentu ρ v závislosti na frekvencích $f_n = f_{r1} - f_{r5}$ a vzdálenosti uložení fantomového vzorku (plné obsazení) s ocelovými drátky (obr.F-9-1)..... 66*
Obr. F-10-1 *Zkušební vzorek polykarbonátu s ocelovými vlákny v konstantních vzdálenostech..... 67*
Obr. F-10-2 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_φ pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky..... 68*
Obr. F-10-3 *Grafické vyhodnocení směrodatných odchylek naměřených hodnot Z_φ pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky..... 69*
Obr. F-10-4 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_{mod} pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky..... 69*
Obr. F-10-5 *Grafické vyhodnocení směrodatných odchylek naměřených hodnot Z_{mod} pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky..... 70*
Obr. F-10-6 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_φ a Z_{mod} pro f_{r1} = 327 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky..... 70*
Obr. F-10-7 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_φ a Z_{mod} pro f_{r2} = 145 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky..... 71*
Obr. F-10-8 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_φ a Z_{mod} pro f_{r3} = 50,12 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky..... 71*
Obr. F-10-9 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_φ a Z_{mod} pro f_{r4} = 21,9 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky..... 71*
Obr. F-10-10 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot Z_φ a Z_{mod} pro f_{r5} = 3,45 kHz v závislosti na vzdálenosti uložení polystyrenu s ocelovými drátky..... 72*

Obr. F-10-11 *Grafické vyhodnocení výpočtových hodnot koncentrací pro jednotlivé frekvence v závislosti na vzdálenosti uložení polykarbonátu s ocelovými drátky..... 73*
Obr. F-10-12 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot hustoty komponentu ρ v závislosti na frekvencích fn = fr1 - fr5 a vzdálenosti uložení fantomového vzorku (polykarbonát) s ocelovými drátky (Obr. F-9-4)..... 73*
Obr. F-11-1 *Formy pro výrobu zkušebních těles z epoxidové pryskyřice; vlevo – použití alobalové pásky, vpravo – použití silikonové pryže..... 76*
Obr. F-11-2 *Výroba zkušebního tělesa z epoxidové pryskyřice tzv. směrového vzorku, uložení ocelových vláken v jednom směru v daných vzdálenostech..... 78*
Obr. F-11-3 *Umístění ocelových vláken v ¼ kvadrantu zkušebního tělesa z epoxidové pryskyřice..... 79*
Obr. F-11-4 *Grafické vyhodnocení průměrných hodnot součinitele k_a pro dané frekvence stanovené na zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice..... 81*
Obr. F-11-5 *Grafické vyhodnocení průměrných hodnot součinitele k_a pro dané frekvence stanovené na zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice s drátky TRITREG... 83*
Obr. F-11-6 *Grafické vyhodnocení průměrných hodnot součinitele k_a pro dané frekvence stanovené na zkušebních tělesech z epoxidové pryskyřice s drátky DRAMIX... 84*
Obr. F-11-7 *Zkušební těleso z epoxidové pryskyřice P4 – dolní hladký povrch (vlevo); horní povrch (vpravo)..... 84*
Obr. F-11-8 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot pro P4 – dolní hladký povrch (vlevo); horní povrch (vpravo)..... 85*
Obr. F-11-9 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot pro směrový vzorek 1 pro nastavení f_{r1}..... 85*
Obr. F-11-10 *Grafické vyhodnocení naměřených hodnot pro směrový vzorek 2 pro nastavení f_{r5}..... 86*
Obr. F-11-11 *Příklad testovaných ocelových drátků (elementů) kompoziního materiálu..... 87*
Obr. F-11-12 *Vzorek kompozitního materiálu a) rovinná kontaktní plocha, b) hrubý kontaktní povrch..... 87*
Obr. F-11-13 *Vyhodnocení měření modulu impedance a fáze impedance testovaného vzorku P4, fr = 328,63 kHz ze strany hladké s nerovností Δxfi < 0,2mm..... 88*
Obr. F-11-14 *Vyhodnocení měření modulu impedance a fáze impedance testovaného vzorku P4, fr = 328,62 kHz ze strany hrubé nerovnosti Δxfi < 10mm..... 89*
Obr. F-11-15 *Vyhodnocení měření modulu impedance a fáze impedance testovaného vzorku P4, fr = 146,00 kHz ze strany hladké s nerovností Δxfi < 0,2 mm..... 89*
Obr. F-11-16 *Vyhodnocení měření modulu impedance a fáze impedance testovaného vzorku P4, fr = 146,00 kHz ze strany hrubé nerovnosti Δxfi $\cong$ 10 mm..... 90*
Obr. F-11-17 *Vyhodnocení měření modulu impedance a fáze impedance testovaného vzorku, fr = 328,62 kHz bez ocelových elementů kompozitu..... 90*
Obr. F-11-18 *Vyhodnocení měření modulu impedance a fáze impedance testovaného vzorku, fr = 146,00 kHz bez ocelových elementů kompozitu..... 91*
Obr. F-11-19 *Měření a vyhodnocení modulu a fáze impedance složky sledované části kompozitu (červená barva) vzorku P4 fr = 146.00 kHz, měření ze strany s nerovností Δxfi $\cong$ 10mm..... 92*
Obr. F-11-20 *Testování zkušebního vzorku kompozitního materiálu..... 94*
Obr. F-11-21 *Laboratorní vyhodnocení modulu a fáze impedance pro měřicí body 5 a 9 na zkušebním vzorku, vyhodnocení homogenity rozložení sledované složky kompozitu..... 94*
Obr. G-12-1 *Destruktivní zkouška referenčních těles – drátkobetonové krychle; separace drátků (vpravo)..... 96*

Obr. G-12-2	*Schéma testování zkušebního tělesa*	*99*
Obr. G-12-3	*Průměrný diagram odolnosti pro zkušební tělesa receptury S1*	*100*
Obr. G-12-4	*Průměrný diagram odolnosti pro zkušební tělesa receptury S2*	*101*
Obr. G-12-5	*Průměrný diagram odolnosti pro zkušební tělesa receptury S3*	*101*
Obr. G-13-1	*Schéma bodů měření na drátkobetonové desce*	*104*
Obr. G-13-2	*Drátkobetonová deska D3, vyznačené body měření, testování koncentrace elektromagnetickou cívkou*	*104*
Obr. G-14-1	*Příklad inverzní varianty radiogramu desky D1, kdy objekty s větší hustotou jsou tmavší*	*106*
Obr. G-14-2	*Odběr jádrového vývrtu z drátkobetonové desky*	*107*
Obr. G-14-3	*Průměrné hodnoty koncentrací stanovené na jádrových vývrtech pro každou drátkobetonovou desku*	*108*
Obr. G-14-4	*Ukázka 3D vyhodnocení prozařování jádrového vývrtu počítačovou tomografií*	*109*
Obr. G-14-5	*Ukázka 2D vyhodnocení řezu jádrových vývrtů*	*109*
Obr. H-1	*Grafické vyhodnocení koncentrace desky D1*	*112*
Obr. H-2	*Grafické vyhodnocení koncentrace desky D2*	*112*
Obr. H-3	*Grafické vyhodnocení koncentrace desky D3*	*113*
Obr. H-4	*3D vykreslení koncentrace drátků v jádrových vývrtech odebraných z desky D3*	*113*
Obr. H-5	*Grafické porovnání návrhové koncentrace, určené elektromagnetickou cívkou a destruktivní metodu*	*114*

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 CŽV*. Brno, 2015.

[3] CIKRLE, P, ANTON O. DEVELOPMENT OF NONDESTRUCTIVE METHODS FOR TESTING OF CONCRETE SINCE 1990. *Beton TKS: Sanace, rekonstrukce a diagnostika*. Praha: Beton TKS, s.r.o., 2015, 15(3), 3-7. ISSN ISSN 1213-3116.

[4] ANTON O, CIKRLE P, HEŘMÁNKOVÁ V. Zkušenosti s georadarem při stavebně technických průzkumech. *TZB - info*. Praha, 2014, , 1-12. ISSN 1801-4399.

[5] CIKRLE P, ANTON O, KINCLOVA A, KOCAB D. Determining reinforcement coverage using an electromagnetic rebar detector. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, 385 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.1088/1757-899X/385/1/012009. ISSN 1757-8981. Dostupné z: http://stacks.iop.org/1757-899X/385/i=1/a=012009?key=crossref.805e008c6f3e3a12c82bcd6036319803

[6] CIKRLE P, KOCÁB D, KUCHARCZYKOVÁ B, ANTON O. IIn Situ/i Determination of the Elastic Modulus of Concrete by Means of Ultrasonic Pulse Method. *Solid State Phenomena* [online]. 2018, 272, 70-75 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.272.70. ISSN 1662-9779. Dostupné z: https://www.scientific.net/SSP.272.70

[7] CIKRLE P, KOCAB D, MISAK P. Experimental determination of the initial compressive strength of concrete using a rebound test hammer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, 385 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.1088/1757-899X/385/1/012008. ISSN 1757-8981. Dostupné z: http://stacks.iop.org/1757-899X/385/i=1/a=012008?key=crossref.0b251b6f4afec05256f85f5ba73f6823

[8] ANTON O, VITEK L, HERMANKOVA V, KOMARKOVA T, CIKRLE P. Detection of reinforcement in the non-traditional building structures - historical statues. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, 385 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.1088/1757-899X/385/1/012001. ISSN 1757-8981. Dostupné z: http://stacks.iop.org/1757-899X/385/i=1/a=012001?key=crossref.0d7118013e8ad2e52cfd78931ae42b6e

[9] HOBST L, ANTON O, VODICKA J, SCUCKA J. Homogeneity Detection of Fibre-Concrete Structures Using Radiographic Technique. BÜYÜKÖZTÜRK, Oral, Mehmet TAşDEMIR, 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

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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

[14] 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.

[15] Concrete. *Building Materials in Civil Engineering* [online]. Elsevier, 2011, s. 81-423 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1533/9781845699567.81. ISBN 9781845699550. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845699550500050

[16] *ČSN EN 206: Beton - specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 2. Praha: ÚNMZ, 2014.

[17] *Design and Control of Concrete Mixtures* [online]. 4. Printed in the United States of America: Portland Cement Association 2002, 2008 [cit. 2018-03-13]. ISBN 0-89312-217-3. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Steven_Kosmatka/publication/284663491_Design_and_Control_of_Concrete_Mixtures/links/5655d8f908aefe619b1c5f2b/Design-and-Control-of-Concrete-Mixtures.pdf

[18] MENG B, MÜLLER U, RÜBNER K. Components in concrete and their impact on quality: an overview. *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures* [online]. Elsevier, 2010, s. 82-93 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1533/9781845699536.1.82. ISBN 9781845695606. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845695606500052

[19] LI Z. *Advanced concrete technology*. Hoboken, N.J: Wiley, 2011. ISBN 9780470950067.

[20] BENTUR A, MINDESS S. Concrete beams reinforced with conventional steel bars and steel fibres: properties in static loading. *International Journal of*

Cement Composites and Lightweight Concrete [online]. 1983, 5(3), 199-202 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1016/0262-5075(83)90007-6. ISSN 02625075. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0262507583900076

[21] SHAH S, RANGAN BV. Fiber reinforced concrete properties. *Journal of the American Concrete Institute*. 1971, 68(2), 126-135. ISSN 0002-8061.

[22] FU Ch, YE H, WANG K, ZHU K, a HE C. Evolution of mechanical properties of steel fiber-reinforced rubberized concrete (FR-RC). *Composites Part B: Engineering* [online]. 2019, 160, 158-166 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.10.045. ISSN 13598368. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135983681831028X

[23] SHAHIDAN S, ABDUL RAHIM M, NIK ZOL N, AZIZAN M,a ISMAIL I. Properties of Steel Fiber Reinforcement Concrete with Different Characteristic of Steel Fiber. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2015, 773-774, 28-32 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.28. ISSN 1662-7482. Dostupné z: https://www.scientific.net/AMM.773-774.28

[24] GETTU R, D.R. GARDNER, SALDÍVAR H, BARRAGÁN B.E. Tudy of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens. *Materials and Structures*. Rilem, 2005, 38(1), 31-37.

[25] 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

[26] BRANDT A. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures* [online]. 2008, 86(1-3), 3-9 [cit. 2018-03-20]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.03.006. ISSN 02638223. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822308000597

[27] MOHAMMADI Y, SINGH S.P, KAUSHIK S.K. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials* [online]. 2008, 22(5), 956-965 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.004. ISSN 09500618. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061806003515

[28] BARTOŠ JM, Peter. Fibre reinforced concrete. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Czech Concrete Society, 2012, 2012(7), 69-77. ISSN 1213-3116.

[29] VODIČKA J, VESELÝ V, KOLÁŘ K, KRÁTKÝ J. Fibre concrete in practice. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Czech Concrete Society, 2010, 2010(2), 53-55. ISSN 1213-3116.

[30] MORRIS A.D, GARRETT G.G. A comparative study of the static and fatigue behaviour of plain and steel fibre reinforced mortar in compression and direct tension. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* [online]. 1981, 3(2), 73-91 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1016/0262-

5075(81)90002-6. ISSN 02625075. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0262507581900026

[31] SIMõES T, COSTA H, DIAS-DA-COSTA D, JÚLIO E. Influence of fibres on the mechanical behaviour of fibre reinforced concrete matrixes. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 137(1), 548-556 [cit. 2017-09-01]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.104. ISSN 09500618. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817301423

[32] HARRIS B, VARLOW J, ELLIS C.D. The fracture behaviour of fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 1972, 2(4), 447-461 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1016/0008-8846(72)90059-2. ISSN 00088846. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008884672900592

[33] VODIČKA J, VESELÝ V, KRÁTKÝ J. Specifics of fibre concrete technology. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Czech Concrete Society, 2010, 2010(2), 38-42. ISSN 1213-3116.

[34] BANTHIA N, MINDESS S, TROTTIER J.F. Impact resistance of steel fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*. 1996, 93(5), 472-479. ISSN 0889325X.

[35] FLORY J, HEARLE J, MCKENNA H, PARSEY M. *About 75 Years of Synthetic Fiber Rope History*. 1. Washington, DC: OCEANS MTS/IEEE Conference, 2015. ISBN 978-0-933957-43-5.

[36] HOLSCHEMACHER K, MUELLER T, RIBAKOV Y. Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials & Design (1980-2015)* [online]. 2010, 31(5), 2604-2615 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.11.025. ISSN 02613069. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026130690900644X

[37] YANG J, MIN K, SHIN H, YOON Y. Effect of steel and synthetic fibers on flexural behavior of high-strength concrete beams reinforced with FRP bars. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2012, 43(3), 1077-1086 [cit. 2018-03-13]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.01.044. ISSN 13598368. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812000509

[38] RUDNOV V, BELYAKOV V, MOSKOVSKY S. Properties and Design Characteristics of the Fiber Concrete. *Procedia Engineering* [online]. 2016, 150(1), 1536-1540 [cit. 2017-10-30]. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.107. ISSN 18777058. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705816314163

[39] KOMÁRKOVÁ T, LÁNÍK J, DVOŘÁK P. Influence of Dispersed Reinforcement on the Physico-Mechanical Properties of the SFRC. *Key Engineering Materials* [online]. 2017, 755, 75-81 [cit. 2017-10-08]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.75. ISSN 1662-9795. Dostupné z: http://www.scientific.net/KEM.755.75

[40] VÍTEK J, SMIŘINSKÝ S, VESELÝ P, VESELÝ V. Variation of steel-fibre concrete parameters depending on the mixing procedure. In: *Fibre concrete 2013*. Praha, 2013, s. 1-17. ISBN 978-80-01-05240-2.

[41] *ČSN P 73 2450 Vláknobeton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ÚNMZ, 2015.

[42] *ČSN P 73 2451 Vláknobeton: Zkoušení čerstvého vláknobetonu*. Praha: ÚNMZ, 2015.

[43] *ČSN P 73 2452 Vláknobeton: Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu*. Praha: ÚNMZ, 2015.

[44] 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

[45] 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

[46] BALÁZS G, CZOBOLY O, LUBLÓY É, KAPITÁNY K, BARSI 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

[47] 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

[48] 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

[49] 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

[50] 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

[51] 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

[52] 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/

[53] 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

[54] *ČSN EN 12390-3: Zkušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2009.

[55] 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.

[56] MÜLLER B, KUPSCH A, LAQUAI R, NELLESEN J, TILLMANN W, KAPSEROVICH G, BRUNO G. Microstructure Characterisation of Advanced Materials via 2D and 3D X-Ray Refraction Techniques. *Materials Science Forum* [online]. 2018, 941, 2401-2406 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.2401. ISSN 1662-9752. Dostupné z: https://www.scientific.net/MSF.941.2401

[57] MÜLLER, B, LÉONARD F, LANGE A, KUPSCH A, BRUNO G. X-Ray Refraction Techniques for Fast, High-Resolution Microstructure Characterization and Non-Destructive Testing of Lightweight Composites. *Materials Science Forum* [online]. 2015, 825-826, 814-821 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.825-826.814. ISSN 1662-9752. Dostupné z: https://www.scientific.net/MSF.825-826.814

[58] FILIPPOA A, RUBTSOV V, TARASOV S, BELOBORODOV V. Application of 3D Computed Microtomography for Investigating the Microstructural Defects of Carbon Fiber Reinforced Composite Made by 3D-Printing. *Key Engineering Materials* [online]. 2016, 712, 324-327 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.324. ISSN 1662-9795. Dostupné z: https://www.scientific.net/KEM.712.324

[59] BATRANINA, CHAKHLOV S, GRINEV D, KAPRANOV B, KLIMENOV V. Design of the X-Ray Micro-CT Scanner TOLMI-150-10 and its Perspective Application in Non-Destructive Evaluation. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2013,

379, 3-10 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.379.3. ISSN 1662-7482. Dostupné z: https://www.scientific.net/AMM.379.3

[60] LUBLÓY É, BALÁZS G. Možnosti použití počítačové tomografie (CT) ke studiu betonu. *Beton TKS*. 2013, 13(6), 43-45. ISSN 1213-3116.

[61] ZEZULOVÁ E, KOMÁRKOVÁ T. Techniques of Non-Destructive Testing of Steel Fiber Reinforced Concrete. *Key Engineering Materials* [online]. 2017, 755, 153-158 [cit. 2018-04-06]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.153. ISSN 1662-9795. Dostupné z: http://www.scientific.net/KEM.755.153

[62] HOBST L, BÍLEK P, ANTON O, ZIKMUND T. Sledování anomálního rozmístění drátků v kalibračních vzorcích počítačovou tomografií. *Beton TKS: Sanace, rekonstrukce a diagnostika*. Praha: Beton TKS, s.r.o., 2014, 2014(3), 54-57. ISSN 1213-3116.

[63] ANTON O, KOMÁRKOVÁ T, HEŘMÁNKOVÁ V. Conclusive Determination of Compliance with the Prescribed Reinforcement Elements of Concrete Structures - The Appropriate Methods and their Capabilities. *Key Engineering Materials* [online]. 2018, 776, 76-80 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.776.76. ISSN 1662-9795. Dostupné z: https://www.scientific.net/KEM.776.76

[64] YAHAGHI E, MOVAFEGHI A, AHMADI S, ANSARI S, TAHERI M, RASTKHAH N. Cultural Heritage Object Identification by Radiography Nondestructive Method and Digital Image Processing. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2011, 83, 35-40 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.83.35. ISSN 1662-7482. Dostupné z: https://www.scientific.net/AMM.83.35

[65] HOBST L, ANTON O, VODIČKA J, ŠČUČKA J. Radiografická metoda stanovení homogenity drátkobetonu v konstrukcích. In: *Construmat 2011*. Košičká Belá, 2011, s. 1-6. ISBN 978-80-553-0685-8.

[66] HOBST L, VALA J. K možnostem nedestruktivního vyšetřování materiálových vlastností drátkobetonu. *TZB-info*. Praha: TZB-info, 2017, , 1-5. ISSN 1801-4399.

[67] VALA J, HOBSTL. Identification of Structural Parameters of Metal Fibre Concrete Using Magnetic Approach. *Key Engineering Materials* [online]. 2013, 592-593, 157-160 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.592-593.157. ISSN 1662-9795. Dostupné z: https://www.scientific.net/KEM.592-593.157

[68] HOBST L, VODIČKA J, BÍLEK P, VALA J. Measurement of Set Fibre-Concrete Homogeneity in Finished Steel Fibre-Concrete Structure of Segmental Tunnel Lining. *Advanced Materials Research* [online]. 2015, 1106, 41-44 [cit. 2019-02-23]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1106.41. ISSN 1662-8985. Dostupné z: https://www.scientific.net/AMR.1106.41

[69] ZEZULOVÁ E, KOMÁRKOVÁ T. Techniques of Non-Destructive Testing of Steel Fiber Reinforced Concrete. *Key Engineering Materials* [online]. 2017, 755, 153-158 [cit. 2017-10-08]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.153. ISSN 1662-9795. Dostupné z: http://www.scientific.net/KEM.755.153

[70] KOMARKOVA T, FIALA P, STEINBAUER M, ROUBAL Z. 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

[71] *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.

[72] 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.

[73] 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

[74] FIALA P, FRIEDL M, ROUBAL Z, KŘÍŽ T. *Vozítko pro měření drátkobetonu: Technická zpráva*. Brno, 2016.

[75] 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

[76] 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

[77] *ČSN EN 12390-5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2009.

[78] TOPOLÁŘ L, PAZDERA L, CIKRLE P. Acoustic Emission Monitoring during Static Modulus Elasticity Test of Concrete Specimen. In: *51st Annual of the International Scientific Conference on Experimental Stress Analysis*. Switzerland, 2013, s. 267-272. ISBN 978-3-03785-977-3. ISSN 1660-9336.

[79] KOMÁRKOVÁ T, KRÁLÍKOVÁ M, KOVÁCS P, KOCÁB D, STAVAŘ T. Application of computed tomography in comparison with the standardized methods for determining the permeability of cement-composite. *Materiali in Technologije*. 2015, 49(4), 587-595. DOI: 10.17222/mit.2014.194. ISSN 15802949.

[80] BACHOREC T, FIALA, P, STEINBAUER, M. ROUBAL, Z. A Non-Destructive Impedance Method Using Resonance to Evaluate the Concentration of Steel Fibers in Concrete. *Measurement Science Review,* 2018, roč. 18, č. 5, s. 218-226. ISSN: 1335-8871.

Seznam norem

ČSN EN 206	*Beton - specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. 2.* Praha: ÚNMZ, 2014.
ČSN EN 12350	*Zkoušení čerstvého betonu*. Praha: ÚNMZ, 2009.
ČSN EN 12350-1	*Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Odběr vzorků*. Praha: ÚNMZ, 2009.
ČSN EN 12350-2	*Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: ÚNMZ, 2009.
ČSN EN 12350-3	*Zkoušení čerstvého betonu - Část 3: Zkouška Vebe*. Praha: ÚNMZ, 2009.
ČSN EN 12350-4	*Zkoušení čerstvého betonu - Část 4: Stupeň zhutnitelnosti*. Praha: ÚNMZ, 2009.
ČSN EN 12350-5	*Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím.* Praha: ÚNMZ, 2009.
ČSN EN 12350-6	*Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost.* Praha: ÚNMZ, 2009.
ČSN EN 12350-7	*Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody*. Praha: ÚNMZ, 2009.
ČSN EN 12371	*Zkušební metody přírodního kamene: Stanovení mrazuvzdornosti*. Praha: ÚNMZ, 2010.
ČSN EN 12390-1	*Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy*. Praha: ÚNMZ, 2013.
ČSN EN 12390-3	*Zkušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.* Praha: ÚNMZ, 2009.
ČSN EN 12390-4	*Zkušení ztvrdlého betonu - Část 4: Pevnost v tlaku - Požadavky na zkušební lisy.* Praha: ÚNMZ, 2001.
ČSN EN 12390-5	*Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2009.
ČSN EN 12390-6	*Zkušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles.* Praha: ÚNMZ, 2010.

ČSN EN 12504-1 *Zkoušení betonu v konstrukcích: Část 1: Vývrty - Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku*. ÚNMZ: Praha, 2009.

ČSN EN 12504-4 *Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení šíření ultrazvukového impulsu.* Praha: ÚNMZ, 2005.

TP FC 1-1 *Technické podmínky 1: Vláknobeton – Část 1 Zkoušení vláknobetonu: Vyhodnocení destruktivních zkoušek a stanovení charakteristického pracovního diagramu vláknobetonu pro navrhování vláknobetonových konstrukcí.* 1. Praha: Českomoravský beton, a.s., 2007.

ČSN EN14889-1 *Vlákna do betonu: Část 1: Ocelová vlákna - Definice, specifikace a shoda*. Praha: ÚNMZ, 2007.

ČSN P 73 2450 *Vláknobeton: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: ÚNMZ, 2015.

ČSN P 73 2451 *Vláknobeton: Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu*. Praha: ÚNMZ, 2015.

ČSN P 73 2452 *Vláknobeton: Zkoušení čerstvého vláknobetonu*. Praha: ÚNMZ, 2015.

ČSN 73 1371 *Nedestruktivní zkoušení betonu: Ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu.* Praha: ÚNMZ, 2011.

ČSN 73 1372 *Nedestruktivní zkoušení betonu: Rezonanční metoda zkoušení betonu.* Praha: ÚNMZ, 2012.

ČSN EN 14146 *Zkušební metody přírodního kamene: Stanovení dynamického modulu pružnosti (pomocí základní resonanční frekvence)*. Praha: ÚNMZ, 2005.

Seznam vlastních prací vztahující se k tématu dizertační práce

1. KOMÁRKOVÁ, T.; PŐSSL, P.; POSPÍŠIL, O. EXPRIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ NAVRŽENÉ NDT METODIKY PRO HODNOCENÍ DRÁTKOBETONU. In *Juniorstav 2018 20. odborná konference doktorského studia.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2018. s. 684-688. ISBN: 978-80-86433-69-1.
2. ANTON, O.; KOMÁRKOVÁ, T.; HEŘMÁNKOVÁ, V. Methods Appropriate for Determination of the Prescribed Reinforcement of the Elements of Reinforced Concrete Structures - Nowadays Used Methods. In *Rehabilitation and Reconstruction of Buildings. Key Engineering Materials (print).* Switzerland: Trans Tech Publications, 2018. s. 41-45. ISBN: 978-3-0357-1361-9. ISSN: 1013-9826.
3. ANTON, O.; KOMÁRKOVÁ, T.; LÁNÍK, J.; HEŘMÁNKOVÁ, 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. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* Bristol: IOP Publishing, 2018. s. 1-6. ISSN: 1757-8981.
4. KOMÁRKOVÁ, T.; LÁNÍK, J.; TOPOLÁŘ, L.; ŠTOLLER, J.; STONIŠ, P. Experimental assessment of steel fibre reinforced concretes with different concentrations of fibres. In *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* Bristol: IOP Publishing, 2018. s. 1-6. ISSN: 1757-8981.
5. KOMÁRKOVÁ, T.; LÁNÍK, J.; ANTON, O. Evaluation of Selected Physicomechanical Properties of SFRC according to Different Standards. *Advances in Materials Science and Engineering,* 2018, roč. 2018, č. 1, s. 1-9. ISSN: 1687-8434.
6. ANTON, O.; KOMÁRKOVÁ, T.; HEŘMÁNKOVÁ, V. Conclusive Determination of Compliance with the Prescribed Reinforcement Elements of Concrete Structures - The Appropriate Methods and their Capabilities. In *Rehabilitation and Reconstruction of Buildings. Key Engineering Materials (print).* Switzerland: Trans Tech Publications, 2018. s. 76-80. ISBN: 978-3-0357-1361-9. ISSN: 1013-9826.
7. KOMÁRKOVÁ, T.; FIALA, P.; STEINBAUER, M.; ROUBAL, Z. Testing an Impedance Non-destructive Method to Evaluate Steel-Fiber Concrete Samples. *Measurement Science Review,* 2018, roč. 18, č. 1, s. 35-40. ISSN: 1335-8871.
8. 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. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* Bristol: IOP Publishing, 2018. s. 1-6. ISSN: 1757-8981.
9. KOMÁRKOVÁ, T.; LÁNÍK, J.; DVOŘÁK, P. Influence of Dispersed Reinforcement on the Physico-Mechanical Properties of the SFRC. In *Key*

Engineering Materials. Key Engineering Materials (print). Switzerland: Trans Tech Publications, 2017. s. 75-81. ISSN: 1013-9826.

10. ZEZULOVÁ, E., KOMÁRKOVÁ, T. Techniques of Non-Destructive Testing of Steel Fiber Reinforced Concrete. In *Key Engineering Materials. Key Engineering Materials (print).* Switzerland: Trans Tech Publication, 2017. s. 153-158. ISSN: 1013-9826.
11. ANTON, O.; KOMÁRKOVÁ, T.; HEŘMÁNKOVÁ, V. *Methods Appropriate For Determination Of The Prescribed Reinforcement Of The Elements Of Reinforced Concrete Structures - Nowadays Used Methods.* Sanace a rekonstrukce staveb 2017, CRRB - 19th International Conference on Rehabilitation an Reconstruction of Building. Praha: Nakladatelství ČVUT - výroba. Zikova 4, 166 36 Praha 6, 2017. s. 115-115. ISBN: 978-80-01-06347-7.
12. KOMÁRKOVÁ, T. Vybrané nedestruktivní metody zkoušení drátkobetonu. In *18. odborná konference doktorského studia Juniorstav 2016.* 18. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 331/95, Brno 60200, 2016. s. 179-185. ISBN: 978-80-214-5311- 1.
13. KOMÁRKOVÁ, T. Design of Methodology for Non-Destructive-Testing of Steel-Reinforced-Fiber- Concrete. In *Proceedings of the 17th Conference on the Rehabilitation and Reconstruction of Buildings (CRRB 2015). Key Engineering Materials (print).* Switzerland: Trans Tech PublicationsLtd, 2016. s. 179-185. ISBN: 978-3-03835-719- 3. ISSN: 1013-9826.
14. KOCÁB, D.; KOMÁRKOVÁ, T.; KRÁLÍKOVÁ, M.; MISÁK, P.; MORAVCOVÁ, B. *Experimental Determination of the Influence of Water/ Cement Ratio Value on the Resistance of Concrete to the Action of Water and Chemical Thawing Agents.* 23rd International Conference on Materials and Technology. Book of Abstracts. Ljubljana, Slovenia: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, 2015. s. 144-144. ISBN: 978-961-92518-8- 1.
15. HOBST, L.; KOMÁRKOVÁ, T.; VALA, J. Electromagnetic approach to nondestructive testing of fibre concrete. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MATERIALS,* 2015, roč. 2, č. 2015, s. 35-39. ISSN: 2313- 0555.
16. KOMÁRKOVÁ, T.; FRIEDL, M. *Methodology for non-destructive evaluation of concentration and orientation of steel fibers in steel-fiber- reinforced concrete.* Book of abstracts. 23rd International Conference on Materials and Technology. Ljublana: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana, Lepi pot 11, 2015. s. 136-136. ISBN: 978-961-92518-8- 1.
17. BÍLEK, P.; KOMÁRKOVÁ, T. Výroba transparentních zkušebních vzorků s drátky pro ověřování nedestruktivních zkušebních metod. In *Sborník anotací konference Junior Forensic Science Brno 2014.* JuFoS. Brno, Česká Republika: LITERA BRNO, 2014. s. 33-33. ISBN: 978-80-214-4935- 0.
18. KOMÁRKOVÁ, T. Výroba zkušebních těles pro vývoj nedestruktivní zkušební metody. In *Sborník anotací Juniorstav 2014.* 2014. s. 200-200. ISBN: 978-80-214-4851- 3.
19. VALA, J.; GROHOVÁ, T. A magnetic approach to the identification of effective characteristics of metal fibre composites used in civil engineering. In *Proceedings of IRF (Integrity, Reliability and Failure of*

Mechanical Systems) in Funchal. Porto: University of Porto, 2013. s. 4001- 1 (4001-11 s.)ISBN: 978-972-8826-27- 7.
20. GROHOVÁ, T.; HOBST, L. Kontrola koncentrace drátků v drátkobetonu elektromagnetickou nedestruktivní metodou. In *Sborník anotací konference Juniorstav 2013.* VUT v Brně, Fakulta stavební: 2013. s. 239-239. ISBN: 978-80-214-4669- 4.
21. BÍLEK, P.; GROHOVÁ, T. Další měření a poznatky s ověřováním homogenity drátkobetonu v konstrukci vyvíjenou magnetickou metodou. In *Sborník anotací konference Juniorstav 2013.* Juniorstav. Brno, Česká republika: Omega Design, s.r.o., 2013. s. 242-242. ISBN: 978-80-214-4669-4.

Dizertační práce navazuje na problematiku řešenou v projektech VUT, u kterých byla autorka práce řešitelkou či spoluřešitelkou:

- **FAST/ÚSI-S-12-1** (2012) – Určení vlastností a kalibrace magnetických sond pro stanovení homogenity ztvrdlého drátkobetonu
- **FAST-S-14-2490** (2014) – Využití a kalibrace elektromagnetických sond pro stanovení homogenity drátkobetonu
- **FAST/ÚSI-J-15-2945** (2015) – Zhodnocení využitelnosti vyvíjených magnetických a elektromagnetických metod pro kontrolu homogenity drátkobetonu.
- **FAST-S-15-2874** (2015) – Nedestruktivní stanovení struktury cementových kompozitů zpevněných kovovými vlákny
- **FAST-S-17-4736** (2017) – Návrh a experimentální ověření komplexní metodiky pro hodnocení drátkobetonu nedestruktivními metodami