



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

ROZVOJ A VYUŽITÍ NEDESTRUKTIVNÍCH ZKUŠEBNÍCH METOD Z HLEDISKA SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ

DEVELOPMENT AND USE OF NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS FROM THE POINT OF VIEW OF
FORENSIC ENGINEERING

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. et Ing. Petr Bílek

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.

BRNO 2019

Zadání dizertační práce

Student: **Ing. et Ing. Petr Bílek**
Studijní program: Soudní inženýrství (kombinovaná forma)
Studijní obor: Soudní inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.**
Akademický rok: 2018/19
Ústav: Ústav soudního inženýrství

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma dizertační práce:

Rozvoj a využití nedestruktivních zkušebních metod z hlediska soudního inženýrství

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při vzniku poruch nebo havárií betonových konstrukcí vyztužených drátky je nezbytné pečlivě zkoumat skutečné provedení rozptýlené výztuže. Koncentrace drátků v drátkobetonové konstrukci má zásadní vliv na pevnost betonu, především v tahu. Je známo, že u drátkobetonových konstrukcí dochází často k anomáliím, např. ke shlukování drátků a jejich převažující orientaci v jednom směru, což má velký vliv na celkovou nehomogenitu a následný pokles předpokládané pevnosti. Dosud stále se hledají nedestruktivní metody, které by koncentraci drátků s dostatečnou přesností určily. Jednou ze zkoumaných metod je metoda, která využívá změny magnetického pole, vyvolaného permanentními magnety. Tato změna je zjišťována hallovými sondami a velmi záleží na poloze těchto sond vzhledem k umístění permanentních magnetů. Právě počet použitých permanentních magnetů, umístění detekční hallové sondy a nakalibrování celé soupravy na zhotovených kalibračních vzorcích bude stěžejní částí disertační práce.

Cíle dizertační práce:

Vývoj metody na stanovení koncentrace drátků v drátkobetonové konstrukci s využitím permanentních magnetů

- Teoretický a praktický průběh siločar v okolí permanentních magnetů
- Návrh experimentální sondy na měření deformací magnetického pole v drátkobetonu
- Zhotovení sady kalibračních vzorků s různou koncentrací drátkobetonu
- Kontrola kalibračních vzorků průmyslovým tomografem
- Nastavení optimální polohy hallový sondy vzhledem k permanentním magnetům
- Návrh magnetické sondy, vhodné k praktickému měření v terénu
- Sestavení kalibrační křivky, využitelné pro praktické měření

Seznam doporučené literatury:

- 1) Hobst L., Adámek J. a kol.: Diagnostika stavebních konstrukcí – Přednášky
- 2) Krátký, J. - Trtík, K. - Vodička, J.: Drátkobetonové konstrukce. Praha: EBS, 1999
- 3) Colleopardi M.: Moderní beton. Praha, EBS, 2009
- 4) Kopec B.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Brno, CERM, 2008
- 5) Bradáč A.: Soudní inženýrství. Brno, CERM, 1999
- 6) Ošlejšek J., Bradáč A.: Znalecká činnost ve stavebnictví. Brno, CERM, 1994
- 7) Janíček P., Marek J. a kol.: Expertní inženýrství v systémovém pojetí. Praha, GRADA, 2013
- 8) Janíček P.: Systémová metodologie - brána do řešení problémů. Brno, CERM, 2014
- 9) Mayer D.: Aplikovaný elektromagnetismus. České Budějovice, KOPP, 2012

Termín odevzdání dizertační práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Aleš Vémola, Ph.D.
ředitel

Bibliografická citace

BÍLEK, P. *Rozvoj a využití nedestruktivních zkušebních metod z hlediska soudního inženýrství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Ústav soudního inženýrství, 2019. 125 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem doktorskou disertační práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

Souhlasím s tím, aby práce byla zpřístupněna pro studijní a výzkumné účely.

V Brně dne 27. 6. 2019

.....
Ing. et Ing. Petr BÍLEK

Výzkumné projekty

Práce vznikla při řešení vědecko-výzkumných projektů:

FAST/ÚSI-S-12-1 „Určení vlastností a kalibrace magnetických sond pro stanovení homogenity ztvrdlého drátkobetonu.“, spoluřešitel, zahájení: 01.01.2012, ukončení: 31.12.2013

FAST/ÚSI-J-15-2945 „Zhodnocení využitelnosti vyvíjených magnetických a elektromagnetických metod pro kontrolu homogenity drátkobetonu.“, hlavní řešitel, zahájení: 01.01.2015, ukončení: 31.12.2015

Poděkování

Upřímné poděkování patří Prof. Ing., Leonardu Hobstovi, CSc. za cenné rady, připomínky a všeobecnou podporu vedoucí k vypracování doktorské disertační práce. Děkuji také ostatním pracovníkům Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební VUT v Brně, jejichž kolektivu jsem z mnoha odborných i jiných diskusí čerpal rady, poznatky a zkušenosti.

Abstract

Concretes reinforced by, using distributed steel reinforcements (fibres) are known as fibre-concrete. Fibre concretes belong to modern building materials whose possible applications have not been fully utilized so far. Have been mainly used for floor structures loaded with factory halls and warehouses. Recently, thanks to well-known physical and mechanical properties of fibre-concrete, there were numerous attempts of designers, and namely investors, to utilize this kind of materials for support structures either. Favorable properties of wire-concrete can be utilized if there is a necessity to increase the resistance of concrete to stresses exceeding its strength, cyclic stress or impact stress. Daily practice shows to prove that the applications of fibre-concrete in such structures lead to the economic success.

Necessary condition for successful application of steel fiber reinforced concrete in constructions however consists in its uniform dispersion, a homogeneous distribution of the wires throughout the volume of the structure. In case of inappropriate processing and deposition of the mixture during the manufacturing process fiber-concrete structures, the fibers are often unevenly distributed. Wires itself represent unfavourably shaped mixture components and they are extremely deteriorating its workability. A grouping of wires may be encountered as well, which reduces the overall homogeneity and the quality of steel fiber-concrete structures.

If the homogeneity of fibre-concrete is not kept, the material possess different properties in various parts of the structure (for example, tensile strength), which can lead to defects in the structure (generation and development of cracks). The relevant lower reliability of the structure which is caused by unequal distribution of fibres (wires) in concrete volume can lead to damage of the property as well as the safety and the human lives can be jeopardized. Hence it is necessary to secure the effective control of the fibre-concrete homogeneity in ready support fibre-concrete structures.

Contemporary homogeneity control is still ongoing on fresh blends, but if the fibre-concrete hardened and is a part of the construction, no known reliable methods are currently in available to test the homogeneity of the fibre-concrete on the structure without its destruction.

The methods developed to control the concentration of wires in wire-concrete structures are based mostly on magnetic or electromagnetic properties of wires.

The thesis deals with the development of the magnetic method in situ using permanent magnets for monitoring the distribution of fibers in hardened steel fiber-concrete structures. The test principle is based on measurements of the changes in magnetic field strength of permanent magnets which are induced by a change in wire distribution in steel fibre-concrete structure. Test is characterized as a so called local- failure- test using a small diameter core drill. In this sense it is a semi-destructive method.

Keywords

Non-destructive testing, steel fibre-concrete structures, wire, homogeneity of wire distribution, probe, magnetic method, industrial tomograph, computed tomography, numerical simulation, calibration, forensic engineering.

Abstrakt

Betony vyztužené rozptýlenou ocelovou výztuží (drátky) jsou známé pod názvem drátkobetony. Drátkobetony patří k moderním stavebním materiálům, jejichž možnosti využití nejsou dosud zcela vyčerpány. Používány jsou především na podlahové konstrukce zatěžovaných továrních hal a skladů. V posledních letech se díky dobrým fyzikálně mechanickým vlastnostem drátkobetonu velmi často vyskytuje snaha projektantů a investorů, využít tohoto materiálu také pro nosné konstrukce. Příznivých vlastností drátkobetonu lze využít, pokud potřebujeme zvýšit odolnost betonu vůči napětí překračujícímu jeho pevnost, cyklickému namáhání, nebo rázovému namáhání. Praxe ukazuje, že aplikace drátkobetonu na takto namáhané konstrukce je cestou, která vede k pozitivním ekonomickým efektům.

Podmínkou využití drátkobetonu v konstrukcích je však zajištění rovnoměrného rozptýlení, tedy homogenního rozložení drátků v celém objemu konstrukce. Nevhodným zpracováním a ukládáním směsi během výrobního procesu drátkobetonu jsou vlákna často nerovnoměrně rozložena. Samotné drátky jsou tvarově nepříznivá složka směsi a velmi zhoršují její zpracovatelnost. Může docházet k seskupení drátků, což snižuje celkovou homogenitu a tím i kvalitu drátkobetonových konstrukcí.

Pokud homogenita drátkobetonu není dodržena, dochází k nepříznivému jevu, kdy v různých částech konstrukce má materiál jiné charakteristiky (např. tahovou pevnost), což může vést k poruchám konstrukce, tj. vzniku a vývoji trhlin. Případná nižší spolehlivost konstrukce, způsobená nerovnoměrným rozptýlením drátků v objemu betonu, může znamenat nejen škody na majetku, ale především ohrožení bezpečnosti a životů lidí. Je proto potřebné zajistit účinnou kontrolu homogenity drátkobetonu ve zhotovené nosné drátkobetonové konstrukci.

Současná kontrola homogenity probíhá dosud na čerstvé směsi, ale pokud drátkobeton ztvdne a je součástí konstrukce, nejsou v současnosti vyvinuty žádné známé spolehlivé metody, jak homogenitu drátkobetonu na konstrukci ověřit, aniž by došlo k jejímu znehodnocení.

Vyvíjené metody na kontrolu koncentrace drátků v drátkobetonových konstrukcích jsou založeny většinou na magnetických nebo elektromagnetických vlastnostech drátků.

Práce se zabývá rozvojem magnetické metody in situ za použití permanentních magnetů pro kontrolu rozložení vláken ve ztvrdlém drátkobetonu. Princip zkoušky je založena

na měření změny intenzity magnetického pole permanentních magnetů, vyvolané změnou koncentrace drátků v drátkobetonové konstrukci. Metoda má charakter zkoušek tzv. lokálního porušení, jádrovým vývrtem malého průměru. Jedná se tedy o metodu semidestruktivní.

Klíčová slova

Nedestruktivní testování, drátkobeton, drátky, homogenita drátkobetonu, sonda, magnetické metody, průmyslový tomograf, počítačová tomografie, numerická simulace, kalibrace, soudní inženýrství.

Obsah

ZADÁNÍ PRÁCE	2
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE.....	4
PROHLÁŠENÍ.....	4
VÝZKUMNÉ PROJEKTY	5
PODĚKOVÁNÍ	5
ABSTRACT	6
KEYWORDS.....	7
ABSTRAKT	8
KLÍČOVÁ SLOVA.....	9
OBSAH.....	10
1. ÚVOD.....	14
1.1. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	14
1.2. MATRICE	14
1.3. BETON	14
1.4. OCELOVÁ VLÁKNA – DRÁTKY	15
1.5. DRÁTKOBETONY	15
1.6. PROBLEMATIKA VÝROBY DRÁTKOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	16
1.7. NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ	18
1.8. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	19
1.8.1. Zkoušení čerstvého drátkobetonu	20
1.8.2. Zkoušení ztvrdlého drátkobetonu.....	21
1.8.3. Stanovení množství kovových vláken v drátkobetonu.....	22
1.8.4. Nedestruktivní testování drátkobetonu.....	23
1.8.5. Vyhodnocení současného stavu poznání v NDT pro drátkobeton	27
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	28

2.1.	VYMEZENÍ ŘEŠENÉ OBLASTI DISERTAČNÍ PRÁCE	28
2.2.	JMENOVITÉ CÍLE PRÁCE.....	28
2.3.	METODY ŘEŠENÍ	29
3.	MAGNETISMUS.....	31
3.1.	MAGNETICKÉ MATERIÁLY	31
3.1.1.	<i>Diamagnetické materiály</i>	<i>31</i>
3.1.2.	<i>Paramagnetické materiály</i>	<i>31</i>
3.1.3.	<i>Feromagnetické materiály.....</i>	<i>32</i>
3.2.	MAGNETICKÉ PRVKY	32
3.2.1.	<i>Permanentní magnety.....</i>	<i>32</i>
3.2.2.	<i>Elektromagnet</i>	<i>34</i>
3.3.	ROZBOR VLASTNOSTÍ PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	35
3.3.1.	<i>Magnetické pole v látce.....</i>	<i>35</i>
3.3.2.	<i>Fyzikální popis magnetického pole</i>	<i>35</i>
3.3.3.	<i>Reakce materiálu na magnetické pole</i>	<i>36</i>
3.3.4.	<i>Přednostní osa orientace permanentního magnetu.....</i>	<i>37</i>
3.4.	MAGNETICKÉ POLE STACIONÁRNÍ	38
3.5.	PRINCIP HALLOVA ČLÁNKU	39
4.	VÝVOJ NOVÉ METODY	42
4.1.	NOVĚ ZÍSKANÉ POZNATKY VE STUDOVANÉ OBLASTI	42
4.2.	VÝVOJ HLOUBKOVÉ PERMANENTNÍ MAGNETICKÉ SONDY (PeMASo)	44
4.3.	VÝVOJOVÁ SONDA – PERMANENTNÍ MAGNETICKÁ SONDA PeMASo - 01	48
4.4.	PROTOTYP SONDY – PERMANENTNÍ MAGNETICKÁ SONDA PeMASo – 02	50
4.5.	OVĚŘENÍ MAGNETICKÉ METODY NA TESTOVACÍCH VZORCÍCH	51
4.6.	SADA SKLO-EPOXIDOVÝCH VZORKŮ	54
5.	PROBLEMATIKA VZORKŮ	56
5.1.	TOMOGRAFICKÉ VYŠETŘENÍ DRÁTKOBETONOVÝCH VZORKŮ	56
5.1.1.	<i>Principy tomografie a mikrotomografie</i>	<i>57</i>
5.1.2.	<i>Tomografické artefakty</i>	<i>58</i>
5.1.3.	<i>Válcový vzorek o průměru 100 mm</i>	<i>59</i>
5.1.4.	<i>Drátkobetonová krychle o hraně 150 mm.....</i>	<i>61</i>

5.1.5.	Finální povrch.....	64
5.1.6.	Závěr mikrotomografie.....	65
5.1.7.	Zjištěné anomálie drátkobetonových vzorků.....	66
5.1.8.	Závěr tomografické vyšetření drátkobetonových vzorků	68
5.2.	VLIV OKRAJOVÉHO EFEKTU NA HOMOGENITU DRÁTKOBETONOVÝCH VZORKŮ	69
5.3.	UŽITNÝ VZOR PERMANENTNÍ MAGNETICKÉ SONDY	71
6.	EXPERIMENTÁLNÍ VYŠETŘOVÁNÍ	72
6.1.	VÝROBA NOVÝCH KALIBRAČNÍCH VZORKŮ S DRÁTKY KH.....	72
6.2.	VÝROBA SMĚROVÉHO VZORKU	73
6.3.	VÝSLEDKY MĚŘENÍ KONCENTRACE DRÁTKŮ NA VZORCÍCH OSTĚNÍ	74
6.4.	VÝSLEDKY MĚŘENÍ KONCENTRACE DRÁTKŮ PŘÍMO NA VZORCÍCH OSTĚNÍ A V LABORATOŘI ...	77
7.	NUMERICKÁ ČÁST	81
7.1.	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	81
7.2.	ANSYS	81
7.3.	NUMERICKÝ MODEL.....	82
7.4.	GEOMETRICKÝ A FYZIKÁLNÍ MODEL.....	82
7.5.	VÝSLEDKY	83
7.6.	ANALÝZA CITLIVOSTI PODLE VZDÁLENOSTI A ORIENTACE DRÁTKU NA MĚŘENÍ	85
7.7.	ANALÝZA VLIVU VZDÁLENOSTI DRÁTKŮ NA MĚŘENÍ	88
7.8.	ANALÝZA VLIVU ORIENTACE SKUPINY DRÁTKŮ NA MĚŘENÍ	91
7.9.	ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ NUMERICKÝCH SIMULACÍ	95
7.10.	ANALÝZA STL MODELU ZÍSKANÉHO Z POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE.....	95
8.	METODIKA MĚŘENÍ.....	96
8.1.	KALIBRAČNÍ VZORKY	96
8.2.	KORELAČNÍ KŘIVKA.....	96
8.3.	METODIKA MĚŘENÍ HOMOGENITY DRÁTKOBETONOVÉ KONSTRUKCE PRO ÚČELY SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ.....	97
8.4.	METODIKA MĚŘENÍ KONCENTRACE DRÁTKŮ V DRÁTKOBETONOVÉ KONSTRUKCI PRO ÚČELY SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ	97
8.5.	NÁLEŽITOSTI PROTOKOLU	97
8.6.	NÁLEŽITOSTI POSUDKU	98

8.7. KVALIFIKACE PERSONÁLU	99
8.8. PŘÍNOS K ROZVOJI OBORU SOUDNÍ INŽENÝRSTVÍ	101
9. ZÁVĚR	103
9.1. ZÁVĚREČNÉ SHRnutí	103
9.2. DOSAŽENÍ CÍLŮ	104
9.3. PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE	104
9.4. DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM	105
<i>9.4.1. Efektivní převod obrazu z průmyslového tomografu do ANSYSU.....</i>	<i>105</i>
<i>9.4.2. Další optimalizace sondy</i>	<i>106</i>
<i>9.4.3. Generátor náhodných drátků pro MKP</i>	<i>106</i>
10. SEZNAM PUBLIKACÍ	107
10.1. POUŽITÁ SOUVISEJÍCÍ LITERATURA	107
10.2. NORMY A PŘEDPISY	111
10.3. PUBLIKOVANÉ PRÁCE AUTORA VZTAHUJÍCÍ SE K DISERTACI	112
11. SEZNAM ZKRATEK	117
12. SEZNAM OBRÁZKŮ	118
13. SEZNAM TABULEK	122
14. SEZNAM GRAFŮ	123
15. SEZNAM PŘÍLOH	125

1. ÚVOD

1.1. Kompozitní materiály

Kompozitní materiál je materiál tvořený dvěma nebo více materiály s rozdílnými vlastnostmi, které dohromady dávají výslednému výrobku nové vlastnosti, jež nemá sama o sobě žádná z jeho součástí. U vláknobetonu se jedná o ztužení struktury kompozitu vlákny.

1.2. Matrice

Hlavní úlohou matrice je zajištění celistvosti kompozitního tělesa, tj. dokonalé spojení nosné části a vytvoření vnějšího tvaru, který musí zajistit řádnou funkci tělesa. Materiálové vlastnosti matrice a vláken musí být v souladu pro dosažení optimálních vlastností celého kompozitu. Specifické funkce matrice je možné vyjádřit v několika bodech:

- spojuje vlákna v kompaktní celek,
- zprostředkuje zatížení vláken v místech vnějšího zatížení,
- vytváří vnější funkční povrch tělesa a estetický vzhled.

1.3. Beton

Beton je kompozitní stavební materiál, ze kterého po ztvrdnutí pojiva vzniká pevný umělý slepenec. Nejobvyklejším druhem běžného betonu je cementový beton. Beton sestává ze dvou hlavních složek plniva a pojiva, kde pojivem je cementová matrice a plnivem kamenivo. Kamenivo se skládá z písku a štěrku nebo drti a tvoří kostru betonové směsi. Cementová matrice je složená z cementu a vody, také bývá označována jako cementová pasta. Samotný cement může být různého typu, nejznámějším je portlandský cement.

Beton je tedy směs cementu, hrubého a drobného kameniva, vody, přísad a příměsí, která získá své konečné vlastnosti hydratací cementu.

Historie praktického využití technologie betonu sahá až do roku 3600 let př. n. l., kdy jsou zaznamenány sloupy v Egyptě postavené z umělého kamene. Značný rozvoj betonu nastal v 19 stol. a v současnosti se beton řadí mezi nejvyužívanější stavební materiály.

1.4. Ocelová vlákna – drátky

ČSN EN 14889-1 specifikuje požadavky na ocelová vlákna do betonu pro použití se statickou funkcí nebo bez statické funkce. Použití vláken se statickou funkcí je pro zvýšení únosnosti betonového dílce.

Ocelová vlákna (Obr. 1) jsou přímá nebo tvarovaná. Vyrábí se ze zastudena taženého ocelového drátu, stříháním z plechu, oddělováním z taveniny nebo z ocelového bloku frézováním.

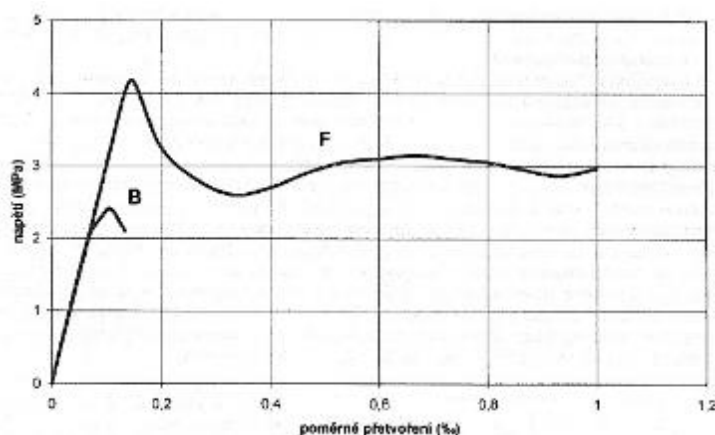


Obr. 1. Drátky Dramix s koncovou úpravou

Výrobce musí deklarovat tvar vlákna. Kontrola tvaru a přípustné odchylky musí být specifikovány pro každý odlišný tvar samostatně, a kde to přichází v úvahu, je nutno deklarovat druh sduřování vláken. [54]

1.5. Drátkobetony

Beton má pevnost v tlaku řádově v desítkách MPa (speciální betony až 100 MPa), avšak v tahu pouze v jednotkách MPa. Za účelem zvýšení únosnosti betonu v tahu, v tahu za ohybu a pro snížení deformací se do betonu vkládá betonářská výztuž.



Obr. 2. Pracovní diagram v tahu drátkobetonu (křivka F) a obdobného prostého betonu (křivka B) [2]

Betony vyztužené rozptýlenou ocelovou výztuží (drátky) jsou známé pod názvem drátkobetony. Drátkobetony jsou vláknobetony, kde byla při výrobě použita ocelová vlákna. V posledních letech se díky dobrým fyzikálně mechanickým vlastnostem drátkobetonu (Obr. 2) velmi často vyskytuje snaha projektantů využít tohoto materiálu také pro nosné konstrukce. Ukazuje se, že aplikace drátkobetonu na takovéto konstrukce je cestou, která vede k dobrým ekonomickým výsledkům, pokud potřebujeme zvýšit odolnost betonu vůči napětí překračujícímu jeho pevnost, cyklickému namáhání, náhlým teplotním změnám nebo rázovému namáhání. Všesměrně rozptýlená vlákna zvyšují odolnost betonu proti vzniku mikrotrhlin.

V současnosti se zhruba každý třetí čtvereční metr průmyslových podlah v Evropě navrhuje z drátkobetonu a poptávka po tomto materiálu stále roste. Ve vývoji jsou dimenzační softwary pro návrh a výpočet konstrukcí zhotovených z drátkobetonu. Na vývoji softwaru spolupracují i výrobci ocelových drátků. V roce 2020 má být drátkobeton jako materiál zahrnut do soustavy evropských technických norem (Eurokódy), které se zabývají navrhováním a posuzováním stavebních konstrukcí.

Tab. 1. Dávkování drátků pro některé typy konstrukcí (Podlahy 2008)

Typ konstrukce	Dávkování drátků	
	[kg/m ³]	[%]
Průmyslové podlahy s řezanými spárami	20 - 25	0.25 - 0.30
Průmyslové podlahy bezesparé	35 - 45	0.45 - 0.55
Stříkaný drátkobeton	30 - 50	0.40 - 0.65
Základové konstrukce	40 - 60	0.50 - 0.75
Stropní desky z drátkobetonu	80 - 100	1.00 - 1.25

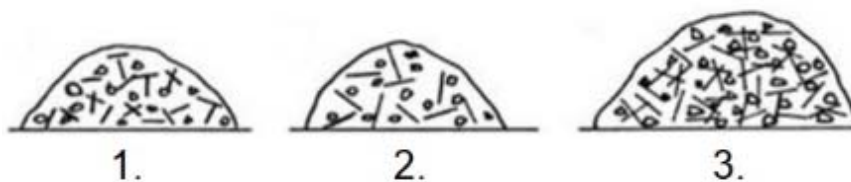
1.6. Problematika výroby drátkobetonových konstrukcí

Jedním z nejdůležitějších faktorů pro zajištění spolehlivosti drátkobetonové konstrukce je (z makroskopického pohledu) homogenní struktura drátkobetonu. Pokud homogenita drátkobetonu není dodržena, dochází k tomu, že v různých částech konstrukce má materiál jiné charakteristiky (zejména mechanické, např. tahovou pevnost), což může vést k poruchám konstrukce (vznik a vývoj trhlin).



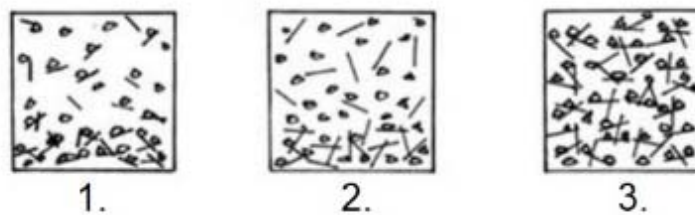
Obr. 3. Vznik shluků drátů v důsledku nevhodného dávkování [48]

V případě makroskopicky anizotropní struktury materiálu se totéž týká charakteristik v různých směrech. Případná nižší spolehlivost konstrukce, způsobená nerovnoměrným rozptýlením drátů v objemu betonu, může znamenat nejen vážné škody na majetku, ale především ohrožení bezpečnosti a životů lidí. Je proto nezbytné vytvořit účinnou kontrolu homogenity drátkobetonu ve zhotovené nosné drátkobetonové konstrukci pro objasňování těchto negativních technických jevů, jak z hledisek potřeb státních orgánů (justice, policie, orgánů státní správy apod.) tak i z hledisek privátního sektoru (podniků příp. občanů).



Obr. 4. Čerstvě vyrobený vláknobeton – porovnání [48]

Pro názornou ilustraci problematiky homogenity drátkobetonu je na obrázku příklad porovnání nesprávného a správného návrhu složení drátkobetonové směsi (Obr. 4 a Obr. 5). První sada obrázků je pro čerstvě vyrobený vláknobeton s ocelovými vlákny, kde jsou na prvním obrázku zvolena příliš krátká vlákna (Obr. 4.1) nebo u druhého obrázku nižší než minimální hmotnostní dávka vláken (Obr. 4.2). Třetí obrázek ukazuje, jak má vypadat správné rozložení směsi (Obr. 4.3). U zpracovaného vláknobetonu dochází po uložení směsi k dalšímu negativnímu jevu, kterým je segregace krátkých i dlouhých drátů (Obr. 5.1 a Obr. 5.2). Na třetím obrázku je v kontrastu, jak má vypadat rozložení vláken pro homogenní vláknobeton (Obr. 5.3).



Obr. 5. Zpracovaný vláknobeton – porovnání [48]

1.7. Nedestruktivní testování

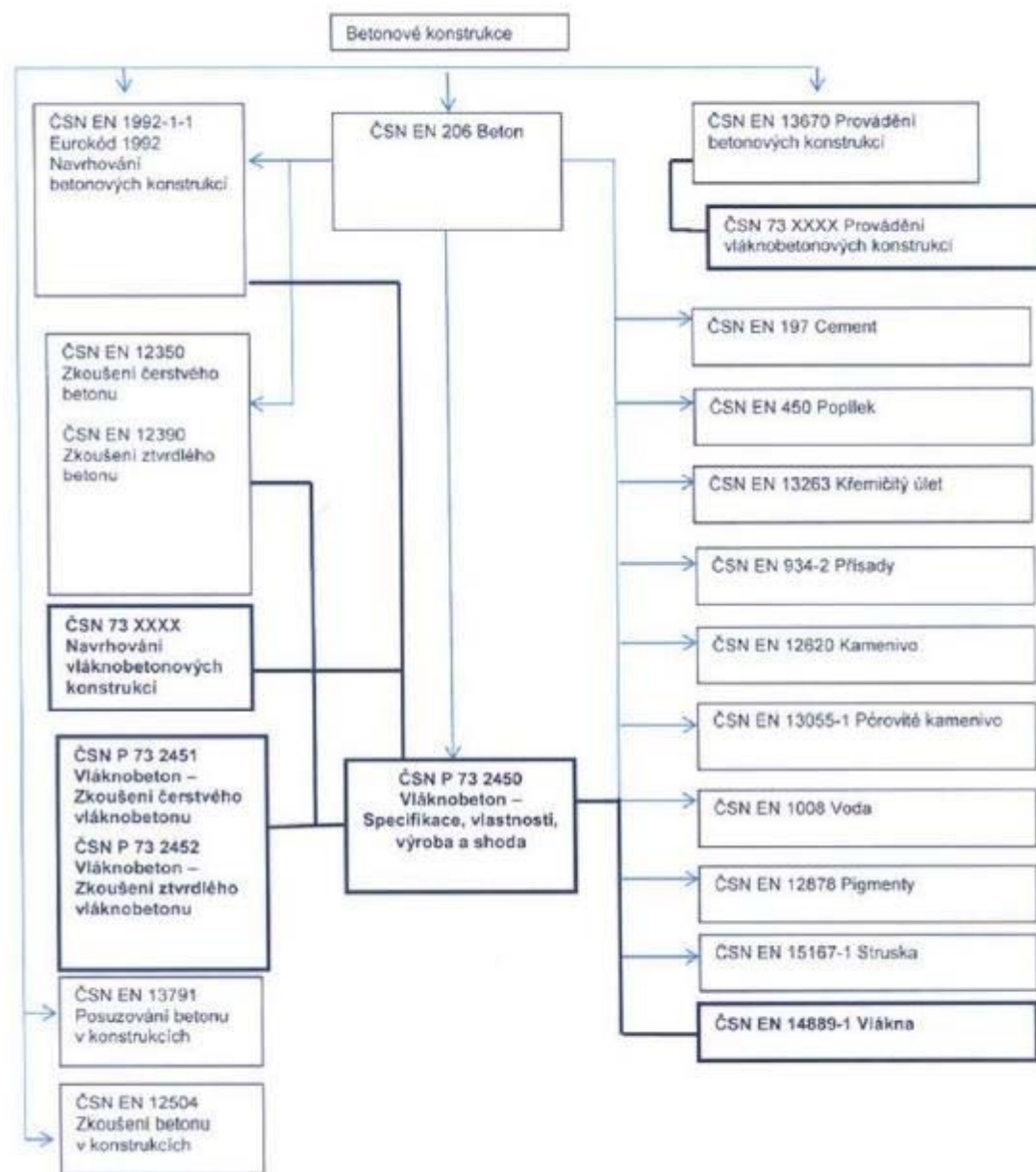
Nedestruktivní metody zkoušení mají řadu výhod, k nimž patří především opakovatelnost a reprodukovatelnost zkoušek, minimální poškození či zásah do zkoušené konstrukce nebo konstrukčního prvku a tím i ekonomický přínos. Zvláště v soudním inženýrství je kladen důraz na zachování důkazů či možnosti opakovat měření. Pomocí nedestruktivního zkoušení lze odhalit a popsat vady materiálu a výrobků takovými postupy, při jejichž aplikaci se výrobky neporuší, nezmění se ani jejich budoucí použitelnost nebo schopnost plnit předpokládanou funkci. Půjdeme-li do historie NDT metod (nedestruktivní zkoušení či testování) z pohledu vývoje, zjistíme, že na počátku byly materiály posuzovány pouze observačně (pomocí vizuálního hodnocení) na základě dlouholetých zkušeností. Současný obor nedestruktivního zkoušení je charakteristický širokým využitím elektroniky a moderní výpočetní techniky. Na materiály používané ve stavebnictví jsou kladeny stále větší požadavky, především požadavky na jejich kvalitu a spolehlivost. S tím souvisí i pokrok v rozvoji kontroly stavebních materiálů a rozvoj diagnostických metod. Pro hodnocení zkoušeného materiálu či prvku je zapotřebí znalost o zkoušeném materiálu a zkušenost s měřicími přístroji i správná interpretace naměřených hodnot (vyhodnocení měření).

Vývoj nových nedestruktivních metod pro zkoušení ztvrdlého drátkobetonu byl náplní projektu, podporovaného Grantovou agenturou ČR od roku 2009 (reg. č.103/09/1073), řešeného na ústavu SZK FAST VUT v Brně. Do jeho úspěšného ukončení v roce 2011 se podařilo vyvinout rentgenografickou metodu kontroly vzorků drátkobetonu Hobst et al. (2010) [20]; v posledních měsících roku 2011 byly pak vyvinuty a odzkoušeny sondy založené na magnetických vlastnostech drátkobetonu Hobst et al. (2011b) [22]. Vyvinutá magnetická sonda byla v roce 2013 úspěšně zaregistrována jako „užitný vzor“. Problematikou drátkobetonu se zabývají i ostatní fakulty VUT v Brně. Velké zkušenosti s elektromagnetickými metodami, které se využívají na kontrolu homogenity

drátkobetonu mají na FEKT VUT v Brně. Dobrá spolupráce probíhá i s CEITEC VUT v Brně, kde průmyslová radiografie umožňuje stanovit přesné rozložení drátků v kalibračních vzorcích drátkobetonu. Používané magnetické metody mají různou citlivost a různé dosahy své účinnosti.

1.8. Současný stav poznání

Vláknobeton je označován zkratkou FRC (Fibre Reinforced Concrete), což v překladu znamená beton vyztužený vlákny. Vláknobetonem je podle ustanovení ČSN EN 206 materiál, jehož základní struktura je doplněna vlákny, která mohou být z libovolného materiálu, libovolných tvarů a rozměrů; **vlákna musí tvořit v objemové jednotce vláknobetonu takový podíl** (objemový stupeň ztužení vlákny), **aby vznikl homogenní vláknobeton, který umožní zlepšit alespoň některou z fyzikálně mechanických vlastností původního betonu.** [53]



Obr. 6. Vztah mezi ČSN P 73 2450 a normami pro navrhování a provádění betonových konstrukcí, normami pro složky betonu a normami pro zkoušení[50]

1.8.1. Zkoušení čerstvého drátkobetonu

Vlastnosti čerstvého vláknobetonu se ověřují standardizovanými zkušebními postupy shodnými pro zkoušky obyčejného čerstvého betonu (Obr. 6), tedy podle souboru norem ČSN EN 12350. [50]

Přímo zkoušením čerstvého drátkobetonu se zabývá norma ČSN P 73 2451 Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu. [51]

1.8.2. Zkoušení ztvrdlého drátkobetonu

Zkoušením ztvrdlého drátkobetonu se zabývá norma ČSN P 73 2452 Vlákno-beton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu [51] a zkoušky se provádějí standardizovanými postupy podle norem řady ČSN EN 12390 (Obr. 6) pro zkoušky obyčejného ztvrdlého betonu jako jsou pevnost v tlaku, v tahu.

Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti betonu v tlaku se provádí podle ČSN EN 12390 – 3 na zkušební krychli, nebo zkušebním válci. Třída betonu se označuje oběma charakteristickými hodnotami těchto pevností (C 30/37).

Pevnost v tahu

Zkouškami bylo ověřeno, že pevnost vláknobetonu v tahu narůstá rychleji oproti nárůstu pevnosti v tlaku. Pevnost v tahu má pro chování vláknobetonových prvků značný význam. To platí zvláště u prvků z „prostého“ vláknobetonu, tedy vláknobetonu bez měkké (prutové) výztuže, kde pevnost v tahu rozhoduje o únosnosti prvku. Rozptýlená ocelová vlákna ovlivňují nejen mez vzniku tahových trhlin u prvku, ale dokonce zajišťují určitou reziduální únosnost prvku po vzniku trhliny a tedy jeho duktilitu.

U vláknobetonu, zvláště u vláknobetonu s ocelovými vlákny, je nutné pevnosti v tahu zjistit experimentálními zkouškami na vhodných tělesech. Určí se tak zaručené hodnoty pevností nutné pro zatřídění materiálu i pro navrhování vláknobetonových konstrukcí. Zkouška v příčném tahu je zkouškou jednoduchou a rychlou. Jejím nedostatkem je, že pevnost je prokazována v předem stanoveném průřezu na zkušebním vzorku.

Pro zkoušení vláknobetonu ohybem jsou užívány tři varianty sestavy zkoušek. Používán je odlišný postup zatěžování zkušebního tělesa od postupu zatěžování obyčejného betonu podle ČSN EN 12390 – 5. V případě zkoušky obyčejného betonu je zatěžování břemenem řízeno plynulým přírůstkem síly až do porušení. Při zkoušení vláknobetonu ohybem je naopak zatěžování břemenem proměnné a je řízeno rychlostí průhybu tělesa. Při čtyřbodovém zatěžování zkušebního trámce není předem určen kritický průřez, ve kterém vznikne ohybová trhlina.

Další možností prokázání ohybové únosnosti vláknobetonu je zkouška trámce s centrálním zářezem tříbodovým ohybem podle ČSN EN 14845 – 2. Předmětem této

normy je zkušební metoda pro stanovení vlivu ocelových nebo polymerových vláken na zbytkovou pevnost v tahu ohybem referenčního betonu. Pro zkoušku tříbodovým ohybem je vydána i evropská norma ČSN EN 14651 + A1, která stanovuje zkušební metodu pro určení meze úměrnosti a hodnoty zbytkové pevnosti v tahu za ohybu u betonu vyztuženého kovovými vlákny do délky 60 mm a u betonu v kombinaci kovových vláken i s jinými vlákny.

Výsledky zkoušek vláknobetonu jsou následně použity k zatřídění vláknobetonu podle:

- pevnostní třídy vláknobetonu v tlaku;
- pevnostní třídy vláknobetonu v tahu za ohybu na mezi vzniku makrotrhliny;
- pevnostní třídy vláknobetonu v reziduální pevnosti v tahu za ohybu po vzniku makrotrhliny.

1.8.3. Stanovení množství kovových vláken v drátkobetonu

Stanovení množství kovových vláken v betonu jak v čerstvém drátkobetonu (Obr. 7), tak ve ztvrdlém řeší doposud jediná technická norma, zabývající se problematikou zjišťování množství a rozložení drátků v drátkobetonu – ČSN EN 14721+A1. [55]



Obr. 7. Přístroj na separaci drátků z čerstvé směsi [49]

V případě stanovení množství vláken u zatvrdlého drátkobetonu uvádí norma jedinou možnost provedení, a sice odběr minimálně tři jádrových vývrtů z konstrukce, přičemž celkový objem odebraného betonu musí být minimálně 5 litrů. Tělesa vývrtů jsou následně rozdrcena ve zkušebním lisu, uvolněná kovová vlákna jsou posbírána a zvážena

(Obr. 8). Výsledkem je tedy pouze průměrný obsah vláken v jistém objemu betonu, není možno stanovit dílčí změny rozložení drátků v jednotlivých částech konstrukce, ani určit jejich orientaci. Přitom právě tyto aspekty mohou být klíčové při posuzování kvality provedení konstrukce, nebo při zjišťování příčin vad a poruch konstrukce.



Obr. 8. Separace drátku magnetem z rozdrčeného vzorku ztvrdlého drátkobetonu [61]

V systému norem je stanovení množství kovových vláken u ztvrdlého drátkobetonu pojato jen jako destruktivní metoda, která stanovuje pouze hmotnostní podíl vláken.

1.8.4. Nedestruktivní testování drátkobetonu

Ve světové literatuře lze najít několik alternativních metod kontroly ztvrdlého drátkobetonu, založených vesměs na magnetických vlastnostech drátků. Je to např. práce Van Damme et al.(2004) [37], která měří efektivní permitivitu materiálu. Využívá přitom koaxiální sondu reflektometrie spolu s mikrovlnou technikou. Na rozdíl od této metody Ozyurt et al (2006) [28], vychází z AC-impedanční spektroskopie a Lataste et al. (2008) [25], provádí speciální nízkofrekvenční elektrické měření odporu v drátkobetonu. Další práce Faifer et al. (2009) [17], rozvíjí metodu založenou na frekvenčním měření. Vlastní sonda sestává ze dvou elektrod, vyhodnocování se pak uskutečňuje Fourierovou transformací. Později se Faifer et al. (2011)[18] a Wichmann et al. (2012) [39], pokusili o využití feromagnetického chování kovových vláken, aby změřili jejich objemový podíl ve vzorcích drátkobetonu. V těchto případech odchylka naměřených hodnot poskytuje základní informace o zjišťované homogenitě drátkobetonu. Všechny zveřejněné metody jsou zatím ve fázi laboratorních měření; výjimkou je jedině práce Wichmann et al. (2012) [39], která se však týká pouze měření homogenity drátkobetonu na zkušebních krychlích 150 x 150 x 150 mm (Obr. 9).



Obr. 9. Metoda „BSM 100“ - elektromagnetická analýza rozložení drátků ve vzorku

Z hlediska fyzikálního modelování a simulací jde zpravidla o analýzu rozložení (díky vhodným podmínkám měření) stacionárního magnetického pole, jež lze budit různými způsoby, zejména permanentním magnetem či cívkou, jíž protéká stejnosměrný či střídavý elektrický proud. Soustavu obecných Maxwellových rovnic elektromagnetického pole lze pak redukovat na Laplacovu rovnici s jedinou efektivní (makroskopickou) materiálovou charakteristikou, za niž můžeme (pro zjednodušení) v tomto textu považovat relativní permeabilitu μ zkoumaného kompozitního materiálu: je-li relativní permeabilita prostého betonu blízká 1, vypovídá μ (při vhodné organizaci experimentů) o míře homogenity a izotropie drátků v materiálu, případně z ní lze zpětně (s využitím optimalizačních metod) zjistit objemové množství (koncentraci) drátků v materiálu. Využití tohoto poznatku dosud nicméně omezuje skutečnost, že i při předem známé periodické struktuře kompozitního materiálu je stanovení μ netriviální z fyzikálního, formálně matematického i prakticky výpočtového hlediska, odkazujíc k různým (technicky, fyzikálně či matematicky motivovaným) homogenizačním přístupům.

Formální převzetí jednoduchého vztahu z Šmilauer & Bittnar (2006) [30], formulovaného původně pro linearizovaně pružné chování tuhnoucí betonové směsi, vede k výpočtovým výsledkům, jež se rozcházejí s experimentálními. Pro sférické částice v kompozitním materiálu je k dispozici (přinejmenším pro jejich nízkou koncentraci) klasický Maxwellův-Garnettův směšovací vzorec, jež lze podle Sihvola & Kong (1988) a Sihvola & Lindell (1992) [29], zobecnit pro rotační (a za cenu značných technických obtíží i pro obecně trojosé) elipsoidy, jež limitně aproximují rotační (i eliptické) válce. Tento přístup postupně, odkazující na tzv. Brugemannův přístup podle Aspnes (1982), zobecňují Giordano (2003) a Giordano (2008) [19], pracující se soustavou elipsoidů jako

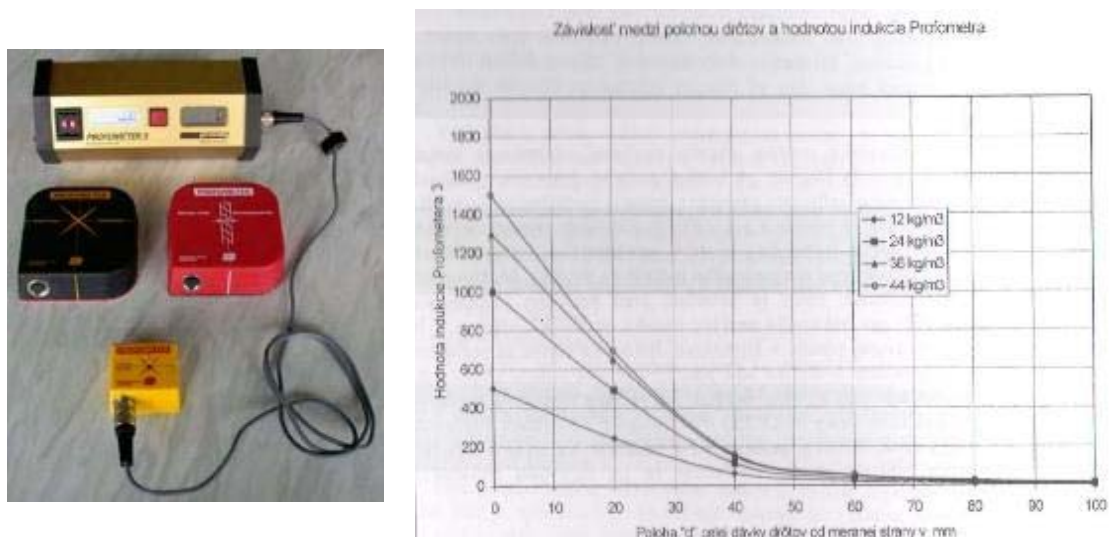
referenčních objemových prvků. Opravné členy pro vyšší koncentrace částic studuje pro Maxwellův-Garnettův případ Mallet et al. (2005). Pro prakticky stejnou úlohu odstraňuje Kristensson (2003) [24] všechny umělé zjednodušující fyzikální předpoklady s odkazem na matematickou teorii dvouškálové homogenizace podle Cioranescu & Donato (1999) [15], využívající metodu oscilujících testovacích funkcí pocházející z Tartar (1978). Jiná zobecnění se týkají tvaru částic: tak Ouchetto et al. (2006) připouští kromě koulí též krychle a válce, zatímco Whites (2000), Wu & Whites (2001) [40] a Whites & Wu (2002) překonávají potíže se složitým tvarem částic pomocí techniky hraničních integrálů. Motivace pro další zobecnění (jmenovitě odstraňování předpokladu periodicity, zavádění pravděpodobností míry a přechod od dvou škálové konvergence k obecnější sigma-konvergenci) pak představují Marchenko & Khruslov (2005) [26], Svanstedt (2008) [32] a Nguetseng & Svanstedt (2011) [27]; jedná se nicméně o obtížné (částečně dosud neuzavřené) problémy matematické analýzy, k nimž nejsou k dispozici vhodné algoritmy pro praktickou numerickou analýzu.

Alternativní přístup k uvedené problematice představuje využití metod zpracování dvourozměrných rentgenografických snímků materiálu, na nichž lze metodami zpracování obrazu rozlišit drátky od betonové matrice (Obr. 10); Vala & Horák (2011) [36] poukazují na možnost využití rychlé Fourierovy transformace, inspirované Tuňák & Linka (2007) [34], zatímco Hobst et al. (2012) [23] se soustředí na detekci polohy jednotlivých drátků, z níž se usuzuje na míru (ne)homogenity a (an)izotropie.



Obr. 10. Rentgenografický snímek drátkobetonu (nalevo). Spektrum získané algoritmem (uprostřed). Výsledné rozložení směrů drátků (napravo). [23]

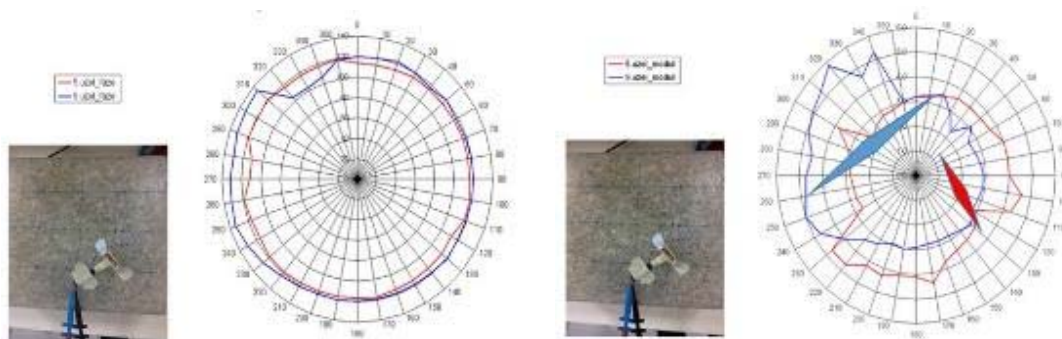
Možnosti zpracování výstupů třírozměrné tomografie demonstruje Aleman-Florez & Alvarez (2011) [13]. Řadu dalších relevantních odkazů lze najít v přehledovém článku Verma et al. (2013). [38]



Obr. 11. Elektromagnetický indikátor výztuže Profometr 3 a citlivost přístroje na polohu drátků [41]

Magnetickou indukcí se zabývala STU Bratislava Priechodský (2004) [41], když pro stanovení koncentrace drátkobetonové desky využili elektromagnetický indikátor výztuže „Profometr 3“ od firmy Proceq, který pracuje na principu vířivých proudů. Přístroj kvantifikuje velikost snímaných vířivých proudů pomocí číselné škály od 0 do 1999 (Obr. 11). Z obrázku je patrné, že dobrá rozlišitelnost koncentrace je do dávky 36 kg/m³ a do hloubky 30–40 mm, autor uvádí max. hloubku 50 mm.

Další nově vyvíjenou metodou zkoušení drátkobetonu je elektromagnetická povrchová sonda pro měření impedance, která je vyvíjena na Ústavu stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně (Obr. 12). Metoda je založena na fyzikálních principech vyhodnocení složek elektrické impedance vázaného magnetického obvodu k testovanému kompozitnímu vzorku. [46]



Obr. 12. Nově vyvíjená metoda zkoušení drátkobetonu na principu elektromagnetické povrchové sondy pro měření impedance – Laboratorní vyhodnocení modulu a fáze impedance pro měřicí body vzorku [46]

1.8.5. Vyhodnocení současného stavu poznání v NDT pro drátkobeton

Současné metody stanovení homogenity drátkobetonu jsou určeny pro testování homogenity povrchových vrstev drátkobetonu a jejich hloubkový dosah není velký. Výzkum této problematiky dosud neřešil oblast možnosti kontroly homogenity v celém objemu konstrukce na stavbách, která je v praxi důležitým hlediskem při posuzování kvality zhotovení konstrukce nebo při zjišťování příčin vad a poruch masivní konstrukce. Neexistuje tedy ani zařízení, které by umožňovalo měření koncentrace drátků v hloubkových vrstvách konstrukce drátkobetonu.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

2.1. Vymezení řešené oblasti disertační práce

Při vzniku poruch nebo havárií betonových konstrukcí vyztužených drátky je nezbytné pečlivě zkoumat skutečné provedení rozptýlené výztuže. Koncentrace drátků, jejich orientace a rovnoměrné rozložení v drátkobetonové konstrukci má zásadní vliv na pevnost betonu, především v tahu. Je známo, že u drátkobetonových konstrukcí dochází často k anomáliím, např. ke shlukování drátků a jejich převažující orientaci v jednom směru, což má velký vliv na celkovou nehomogenitu a následný pokles předpokládané pevnosti. Dosud se stále hledají nedestruktivní metody, které by koncentraci drátků s dostatečnou přesností určily. Cílem práce proto je vyvinout, odzkoušet a otestovat kontrolní metodu na stanovení homogenity drátkobetonu a stanovit podle zvolených kritérií jejich účinnost a tím i využitelnost v soudním inženýrství i inženýrské praxi.

Jednou ze zkoumaných metod je metoda, která využívá změny stacionárního magnetického pole, vyvolaného permanentními magnety. Tato změna je zjišťována Hallovy sondami a velmi záleží na poloze těchto sond vzhledem k umístění permanentních magnetů. Právě počet použitých permanentních magnetů, umístění detekční Hallové sondy a nakalibrování celé soupravy na zhotovených kalibračních vzorcích bude stěžejní částí disertační práce.

2.2. Jmenovité cíle práce

Pro dosažení cílů disertační práce byla zformulována tato konkrétní témata:

- Teoretický a praktický průběh siločar v okolí permanentních magnetů.
- Návrh experimentální sondy na měření deformací magnetického pole v drátkobetonu.
- Zhotovení sady kalibračních vzorků s různou koncentrací drátkobetonu.
- Kontrola kalibračních vzorků průmyslovým tomografem.
- Nastavení optimální polohy Hallové sondy vzhledem k permanentním magnetům.
- Návrh magnetické sondy, vhodné k praktickému měření v terénu.
- Sestavení kalibrační křivky, využitelné pro praktické měření.
- Využití v soudním inženýrství.

2.3. Metody řešení

Při tvorbě disertační práce, byly zvoleny tři metody. Primárně byla zvolena metoda experimentální (měření testovacích vzorků, měření in situ, zkoušky), sekundárně byla užita metoda teoretická (komparace, dedukce, analýza) a dále numerická metoda (numerická simulace metodou konečných prvků).

Práci lze rozdělit na hlavní cíle takto:

1) TEORETICKÁ ČÁST

Teoretický úvod do problematiky drátkobetonu a magnetismu.

Rešerše z hlediska kontroly homogenity drátkobetonu.

2) EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální části práce lze rozdělit na teoretické a praktické následovně:

A. Teoretická experimentální část

- Teoretický a praktický průběh siločar v okolí permanentních magnetů.
- Návrh experimentální sondy na měření deformací magnetického pole v drátkobetonu.

B. Praktická experimentální část

- Vývoj experimentální sondy a prototypu sondy na měření deformací magnetického pole v drátkobetonu.
- Nastavení optimální polohy Hallovy sondy vzhledem k permanentním magnetům.
- Ověření metody měření na testovacích vzorcích.
- Kontrola kalibračních vzorků průmyslovým tomografem.
- Zhotovení sady kalibračních vzorků s různou koncentrací drátků a zhotovení kalibrační křivky.
- Praktické měření na konstrukci a ověření výsledku při měření v laboratoři.

C. Simulace

Ověření možnosti numerické simulace jako prostředek pro potvrzení fyzikálních principů, citlivostní analýzu či případně optimalizaci měření.

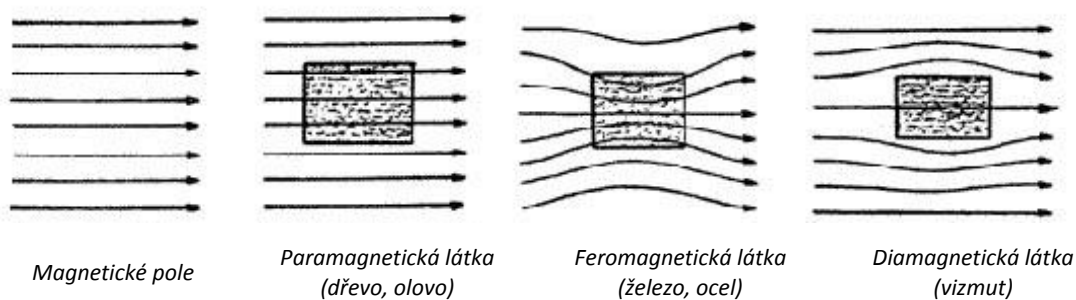
Pro splnění cílů práce bylo využito především pracoviště Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, Ústavu stavebního zkušebnictví a jeho laboratorního přístrojového vybavení. Dále byla navázána dobrá spolupráce se součástí CEITEC VUT

v Brně, pracovištěm zabývajícím se defektoskopií a zobrazováním vnitřních struktur průmyslových děl i Fakultou elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústavem teoretické a experimentální elektrotechniky.

3. MAGNETISMUS

3.1. Magnetické materiály

Rozdílné magnetické vlastnosti prostředí vyjadřuje zejména relativní (poměrná) permeabilita prostředí, podle jejíž hodnoty rozlišujeme materiály:



Obr. 13. Magnetické pole v různých materiálech (Ladislav Smrz, 1956)

3.1.1. Diamagnetické materiály

Diamagnetické materiály mají poměrnou permeabilitu o něco menší než jedna a pokud nejsou vloženy do magnetického pole, nevykazují magnetické vlastnosti. Po vložení do magnetického pole toto pole mírně zeslabují. V případě, že je magnetické pole nehomogenní, je diamagnetická látka vytlačována z oblasti s větší magnetickou indukcí. Mezi diamagnetické látky jsou zařazovány inertní plyny, bromid draselný, voda, kuchyňská sůl, měď, bizmut, rtuť, zinek, olovo, stříbro, zlato, některé plasty, organické látky, supravodiče a další látky. [8]

3.1.2. Paramagnetické materiály

Poměrná permeabilita paramagnetických materiálů je o něco větší než jedna. Po vložení do magnetického pole ho nepatrně zesilují. V případě, že je magnetické pole nehomogenní, pak je paramagnetická látka vtahována do oblasti s větší magnetickou indukcí. Do této skupiny je řazen např. plyný kyslík, kapalný kyslík, hliník, platina, paládium, vanad, chrom, titan, ebonit, hořčík, sodík, draslík, vzduch, různé přechodné kovy, kovy vzácných zemin, aktinidy a jiné látky. Poměrnou permeabilitu diamagnetických a paramagnetických materiálů můžeme v běžné praxi považovat za rovnu jedné. [8]

3.1.3. Feromagnetické materiály

Poměrná permeabilita feromagnetických materiálů je o mnoho větší než jedna a velmi závisí na intenzitě magnetického pole a na teplotě. Po vložení do magnetického pole ho velmi zesilují. Je-li magnetické pole nehomogenní, pak je feromagnetický materiál vtahován do oblasti s větší magnetickou indukcí. Feromagnetické materiály dosahují velkých magnetických toků i při relativně malých průřezích. Magnetizační křivka feromagnetických materiálů je závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole. Mezi feromagnetické látky je řazeno železo, kobalt, nikl, gadolinium a jejich slitiny. [8]

3.2. Magnetické prvky

Uvádí se, že druhové označení magnetického pole vzniklo vžitým zobecněním názvu starořeckého města Magnésie, v jehož okolí se 500 let p.n.l. vyskytovala rozsáhlá povrchová ložiska vydatné přirozeně zmagnetované železné rudy Fe_3O_4 (magnetovec).

Magnetický prvek je objekt, který díky jeho magnetickému poli přitahuje magnetickou složku k sobě. Magnetické prvky můžeme rozdělit do dvou odlišných skupin.

3.2.1. Permanentní magnety

Permanentní magnety jsou nejčastěji používaným magnetickým prvkem. Jejich výhodou je jednoduchá údržba, spolehlivost, nulová spotřeba, malé nároky na údržbu i na samotnou aplikaci. Nevýhodou při použití permanentních magnetů je ovšem malá adaptace na materiál s odlišnými magnetickými vlastnostmi než na materiál, pro který byl tento magnetický prvek určen. Každý permanentní magnet je tvořen dvěma póly. Dohodou bylo stanoveno označení magnetických pólů:

1. Severní – tento pól bývá označován také písmenem N (North) nebo v české odborné literatuře často písmenem „S“.
2. Jižní – podle anglického slova označován jako S (South) nebo v české odborné literatuře často písmenem „J“.

Mezinárodně dohodnutý směr působení siločar v magnetu je od severního pólu k jižnímu. Ze severního pólu poté dochází k vystupování těchto siločar z magnetu, přičemž se následně vrací zpět k jižnímu pólu. Tímto vznikají křivky ve tvaru víru. Takovému magnetickému poli se proto říká vířivé (Obr. 2). Fyzikální princip

permanentního magnetu je založen hlavně na vlastnostech elektronů v atomových obalech materiálů. Každý elektron má určitou spinovou rotaci kolem jádra. Tímto pohybem dochází ke vzniku dílčích magnetických momentů. Pokud jsou tyto magnetické momenty zcela nahodilé, výsledné magnetické pole materiálu je téměř nulové. Pokud jsou ovšem tyto magnetické momenty uspořádány, dochází k magnetickým projevům. Čím větší je toto uspořádání, tím silnější magnetické pole bude. K takovému uspořádání může dojít buď působením vnější magnetické síly, kdy dojde k ovlivnění spinu elektronu, nebo je toto uspořádání magnetických momentů v materiálu již přirozené. V prvním případě se po přerušení působení vnější magnetické síly buď vrátí pohyb elektronů v atomech do původního stavu, čímž bude mít těleso stejné magnetické vlastnosti jako před magnetizací, nebo můžou magnetické účinky přetrvávat. Ve druhém případě hovoříme o remanentním magnetismu. [8]

Permanentních magnetů je mnoho druhů jak z hlediska magnetických vlastností, tak materiálu, ze kterého jsou vyrobeny.

Feritové magnety

Jsou pro svou nízkou cenu a dobrou odolnost často využívány. Dají se rozdělit na magneticky tvrdé či měkké ferity. Magneticky tvrdé ferity bývají vyrobeny pomocí práškové metalurgie lisováním při vysokých tlacích. Lze je vyrobit dvěma způsoby.

- Anizotropní feritové magnety bývají lisovány za přítomnosti vnějšího magnetického pole a mají pouze jednu osu magnetizace. Tyto magnety jsou tedy účinné jen v jednom směru, který je shodný s tím, kterému byl vystaven při magnetizaci. Při stejné velikosti mívají proti izotropním magnetům větší indukční tok a vykazují i větší remanentní magnetismus
- Izotropní feritové magnety jsou vyráběny bez přítomnosti magnetického pole a jejich možnost magnetizace je ve všech osách stejná. Z toho vyplývá, že magnetické vlastnosti jsou v těchto směrech rovněž shodné.

Lisování těchto magnetů je z technologického hlediska prováděno buď za mokra, kde původní materiál tvoří suspenzi nebo za sucha, kde původní materiál tvoří sypkou směs. Za mokra se vyrábí anizotropní a za sucha izotropní feritové magnety. Pracovní teplota těchto magnetů se pohybuje v rozmezí $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při vzrůstající teplotě klesá magnetická remanence zhruba o 0,2 % na 1K a spolu s ní koercitivní intenzita pole stoupá o 0,3% na 1K. Při klesající teplotě dochází k opačnému efektu. [8]

Magnety ze vzácných zemin

V mnoha případech ovšem není velikost magnetických účinků feritových magnetů dostatečná. V těchto případech můžeme zvolit magnety ze vzácných zemin. Rozdělit lze na dva typy, které využívají rozdílné vzácné zeminy.

- Magnety Neodymové
- Magnety Samariové

Neodymové magnety jsou směsí neodymu, železa a boru (NdFeB). Jedná se o jedny z nejsilnějších magnetů. I malý magnet tohoto typu je schopen působit velmi silným magnetickým polem. Často používaným magnetem je Nd₂Fe₁₄B, který je v současné době považován za nejsilnější. Nevýhodou těchto magnetů je malá povrchová odolnost vůči vnějším vlivům. Proto se u nich přistupuje k povrchové úpravě. Pracovní bod je u těchto magnetů mezi +110 až +220 °C. Výroba těchto magnetů je prováděna práškovou metalurgií. Jsou lisovány za vysokého tlaku pomocí forem za přítomnosti magnetického pole. Vzhledem k tomu, že tento magnet má anizotropní strukturu, dosahuje se u něj vysokých hodnot remanentní magnetizace.

Druhým typem magnetu ze vzácných zemin je Samariový magnet (SCO), tedy magnet na bázi Samaria a Kobaltu. Jeho historie vývoje je starší než u NdFeB a oproti novým typům NdFeB je i magneticky slabší. Je křehčí, snadno dochází k odštěpu částíček, ale dokáže pracovat až do teploty +350 °C. [8]

3.2.2. Elektromagnet

Magnetickým prvkem je také elektromagnet. Elektromagnet funguje z fyzikálního hlediska na principu elektromagnetické indukce, hlavní je napětí a procházející proud. Největší výhodou oproti permanentním magnetům je schopnost regulace. Elektromagnet tvoří cívka s navinutým vodičem na nemagnetickém pouzdru. Vodič se volí takový, aby měl co nejnižší rezistivitu, u kterého nedochází k výrazným tepelným ztrátám (např. měď). Mnohdy má cívka několik vrstev závitů, které jsou vzájemně izolované. Pro zvýšení magnetických účinků se do cívky přidává jádro z magneticky měkké oceli.

3.3. Rozbor vlastností permanentních magnetů

3.3.1. Magnetické pole v látce

Magnetické pole je fyzikální pole, které vzniká v okolí pohybujícího elektrického náboje (např. v okolí vodičů s elektrickým proudem) nebo je jeho zdrojem permanentní magnet. Permanentním magnetem rozumíme trvale nebo dočasně magneticky polarizované těleso. Původní teorie o vzniku magnetického pole se opírala zejména o Ampérovu domněnku, která předpokládala, že magnetické vlastnosti látek jsou způsobeny existencí elementárních proudů, které v látce existují. Tuto domněnku zpřesnil až objev elektronu a atomového jádra, které elektron obíhá. Elektron při svém oběhu vytváří proudovou smyčku, kterou lze popsat vztahem:

$$\mathbf{m}_e = \mu_0 i \mathbf{S} = \mu_0 e v \mathbf{S} \quad (1)$$

, kde vektor $\mathbf{m}_e$ je orbitální magnetický moment proudové smyčky, kterou tvoří elektron o náboji e pohybující se obvodovou rychlostí v . Tím vznikne elektrický proud o velikosti i . Vektor $\mathbf{S}$ je kolmý na plochu o velikosti S , kterou pohybující se elektron vymezuje. Konstanta μ_0 je permeabilita vakua, její přibližná velikost je pro technické účely udávána hodnotou $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$. Mimo orbitálního magnetického momentu přispívá ke vzniku magnetického pole též spinový magnetický moment $\mathbf{m}_s$ elektronu. Dohromady s momentem orbitálním tak dává výsledný magnetický moment. Celá problematika se však poněkud komplikuje ve více elektronových atomech. Fyzikální správný popis vzniku magnetického pole tak dává až kvantová teorie, a dále teorie relativity při řešení pohybu nabitých částic v Lorentzově transformaci souřadnic. [12]

3.3.2. Fyzikální popis magnetického pole

Silové působení magnetického pole lze kvantitativně charakterizovat pomocí vektoru magnetické indukce $\mathbf{B}$. Ten charakterizuje magnetické pole vyvolané volnými elektrickými proudy $\mathbf{I}$ (proud vodivý, konvekční a posuvný), a dále proudy vázanými $\mathbf{I}_b$. Mezi proudy vázané řadíme kromě proudů polarizačních také proudy magnetizační, které vznikají v okolí částic v látce. Tento vznik souvisí zejména s orbitálním a spinovým magnetickým momentem elektronů. Souvislost magnetické intenzity $\mathbf{B}$ a obou typů proudů lze charakterizovat vztahem:

$$\oint_C \mathbf{B} \times d\mathbf{l} = \mu_0(I - I_i) \quad (2)$$

, kde dl je element délky.

Dalším vektorem pro popis magnetického pole je vektor magnetické intenzity H . Tento vektor však charakterizuje magnetické pole vyvolané pouze volnými elektrickými proudy.

Pro tento vektor platí:

$$\oint_C \mathbf{H} \times d\mathbf{l} = I. \quad (3)$$

Magnetické pole v látce lze schematizovat pomocí magnetických indukčních čar. Vzhledem k tomu, že magnetické pole je nezídkovým fyzikálním polem, jsou tyto čáry spojitě. Pro vektor magnetické indukce B a plošný vektor dS , jehož velikost dS představuje elementární plochu, kterou magnetické pole prochází, proto platí vztah:

$$\oint_S \mathbf{B} \times d\mathbf{S} = 0. \quad (4)$$

V případě magnetů se dle dohody místo výstupu magnetických indukčních čar označuje jako severní magnetický pól (N) a místo vstupu jako jižní magnetický pól (S). [12]

3.3.3. Reakce materiálu na magnetické pole

Představme si homogenní magnetické pole intenzity H . Před vložením vzorku do tohoto pole je velikost magnetické indukce B_0 , po vložení se však změní na hodnotu B , a to díky příspěvku magnetické indukce B_i . Lze tedy psát:

$$\mathbf{B} = B_0 + B_i. \quad (5)$$

Příspěvek B_i ve srovnání s B_0 malý a platí:

$$B_i = \kappa_m B_0 \quad (6)$$

, kde κ_m je tzv. magnetická susceptibilita, vyjadřující schopnost látky tělesa magnetovat se ve vnějším magnetickém poli o velikost B_0 . Dosazením z (7) do (8) získáme vztah:

$$\mathbf{B} = B_0 + \kappa_m B_0 = (1 + \kappa_m)B_0 = \mu_r B_0 \quad (9)$$

, kde μ_r je relativní permeabilita materiálu, kterou je možné úpravou vztahu (10) zapsat jako poměr:

$$\mu_r = \frac{B}{B_0} = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (11)$$

, kde μ je celková permeabilita, kterou lze vyjádřit vztah mezi velikostí magnetické indukce B a intenzitou magnetického pole H :

$$B = \mu_r \mu_0 H = \mu H. \quad (12)$$

Pro materiály permanentních magnetů je významná zejména reverzibilní permeabilita μ_{rev} . Jedná se o permeabilitu pro malé vratné změny intenzity vnějšího magnetického pole ($\Delta H \rightarrow 0$), které na magnet působí. Vratnou permeabilitu lze vyjádřit vztahem:

$$\mu_{rev} = \mu_0 \mu_{rrev} = \frac{\Delta B}{\Delta H} \Big|_{\Delta H \rightarrow 0} \quad (13)$$

, kde μ_{rrev} je relativní hodnota reverzibilní permeability. [12]

3.3.4. Přednostní osa orientace permanentního magnetu

Permanentní magnet dosahuje nejlepších magnetických vlastností obvykle v jednom směru, který je nazýván přednostní osa orientace. Této osy se docílí během výroby vystavením materiálu vnějšímu silnému magnetickému poli. Podle osy orientace lze permanentní magnety rozdělit do pěti skupin:

1. Izotropní permanentní magnety – nemají žádnou přednostní osu orientace. Směr a způsob magnetování je tedy libovolný.
2. Anizotropní permanentní magnety – jsou lisovány v magnetickém poli a dostávají tak přednostní osu orientace. Dobré magnetické vlastnosti mají pouze v této ose a mohou být magnetovány pouze v ní. Při stejném objemu magnetu se dosáhne vyššího magnetického toku nežli u magnetů izotropních. Remanence je přibližně dvojnásobná.
3. Permanentní magnety s axiální přednostní osou orientace takto, tzn. axiální, jsou orientovány kruhové a válcové magnety a hranoly přes výšku.

4. Permanentní magnety s diametrální přednostní osou orientace – pro zvláštní aplikace, kupříkladu u kruhových či válcových permanentních magnetů motorů nebo čerpadel, je přednostní osa orientace diametrální (kolmo k ose rotace).
5. Permanentní magnety pólově orientované – zde jsou póly uspořádány tak, jak bude provedeno pozdější vícepólové magnetování. Tyto trvalé magnety se používají převážně ve spojení se senzory, v pohonech motorů nebo v generátorech. Remanence je přibližně 1,5 až 2násobná v porovnání se stejným izotropním materiálem. [8]

3.4. Magnetické pole stacionární

Magnetické pole permanentních magnetů klasifikujeme jako statická nebo stacionární pole a je možné ho popsat z matematického hlediska formálně diferenciální rovnicí, např. Poissonovou nebo Laplaceovou rovnicí

V lineárním magneticky vodivém prostředí dále platí:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (14)$$

nebo

$$\mathbf{H} = \nu \mathbf{B} \quad (15)$$

V poli permanentních magnetů (magnetostatické pole), platí:

$$\text{rot } \mathbf{H} = 0 \quad (16)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (17)$$

a proto můžeme zavést skalární magnetický potenciál ϕ_m vztahem:

$$\mathbf{H} = -\text{grad } \phi_m \quad (18)$$

, potom 3D stacionární magnetické pole permanentních magnetů:

$$\text{div}(\mu \text{ grad } \phi_m) = 0. \quad (19)$$

, kde ϕ_m je magnetický skalární potenciál a μ permeabilita.

V lineárním prostředí vyhovuje potenciál ϕ_m Laplaceově rovnici:

$$\text{div grad } \phi_m = \Delta \phi_m = 0. \quad (20)$$

Na rozhraní prostředí s různou permeabilitou μ_1 , μ_2 musí pole splňovat podmínku spojitosti tečné složky intenzit a normálové složky indukci:

$$\Phi_{m1} = \Phi_{m2} \quad (21)$$

$$\mu_1 \frac{\partial \Phi_{m1}}{\partial n} = \mu_2 \frac{\partial \Phi_{m2}}{\partial n} \quad (22)$$

Na hranici oblasti, ve které hledáme řešení, je zadaná hodnota skalárního magnetického potenciálu:

$$\Phi_m = \Phi_{m0} \quad (23)$$

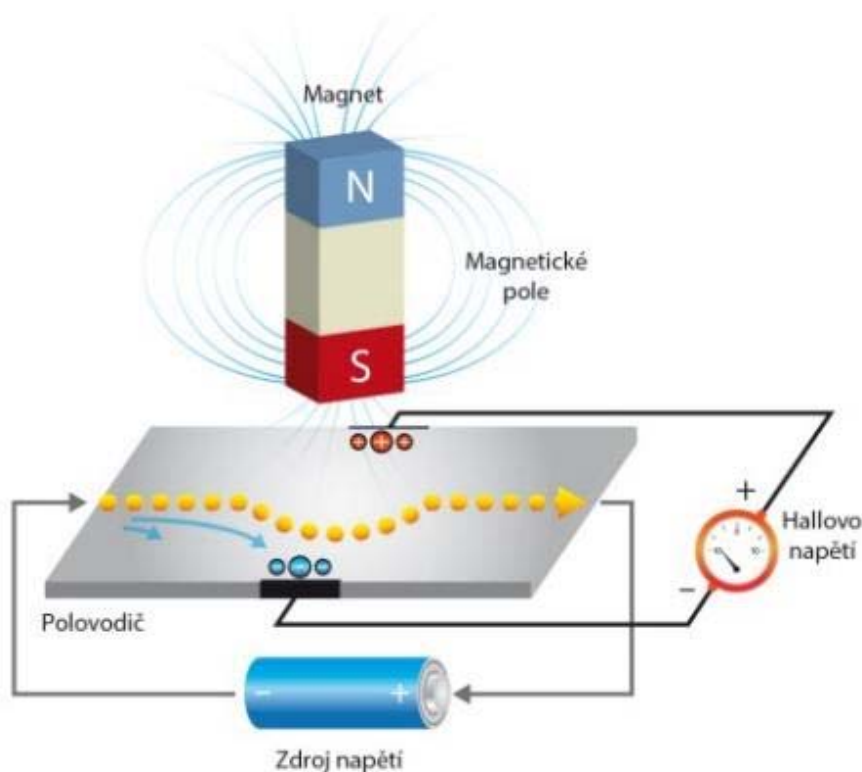
nebo je hranice totožná se siločarou pole (vektoru $\mathbf{H}$ nebo $\mathbf{B}$), kde platí:

$$\frac{\partial \Phi_m}{\partial n} = 0 \quad (24)$$

[11]

3.5. Princip Hallova článku

Hallův článek je tvořen úzkou polovodivou destičkou, přes kterou prochází proud. Při vložení destičky (článu) do magnetického pole jí prochází indukční tok a přeskupuje náboje v destičce na jednu stranu (Obr. 14).



(zdroj: RNDr. Čestmír Štuka, Ph.D., MBA)

Obr. 14. Schéma vzniku Hallova jevu

Tak na Hallově článku vzniká napětí. Hallovo napětí se dá vypočítat pomocí vzorce (25):

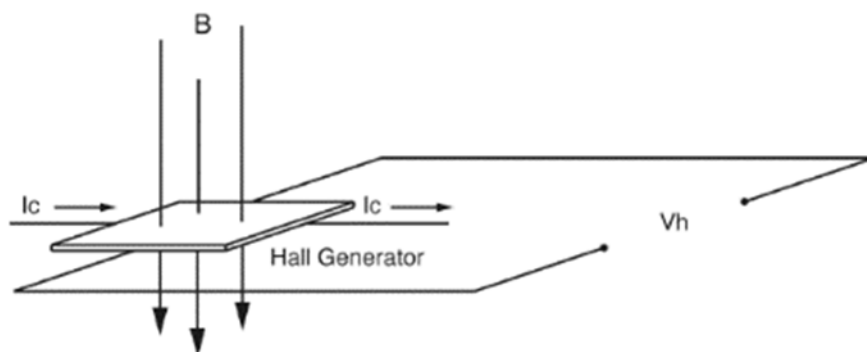
$$U_h = k * I * B \quad (25)$$

, kde

k je konstanta (zahrnuje typ materiál a tloušťku destičky),

I je stejnosměrný proud,

B je magnetická indukce způsobená magnetickým polem.

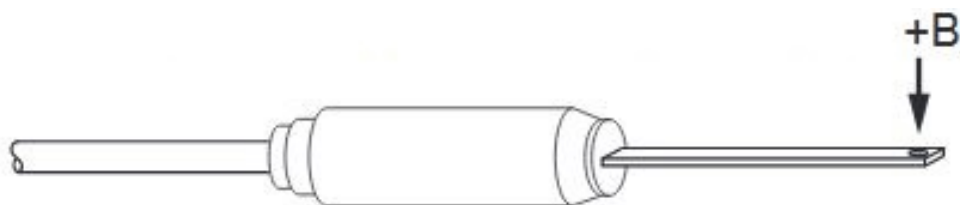


Obr. 15. Hallův článek [9]

Konstrukce samotné sondy může mít různě orientovanou Hallovu sondu, a to buď transverzálně (Obr. 17) nebo axiálně (Obr. 16).



Obr. 16. Konfigurace axiální Hallovy sondy [9]



Obr. 17. Konfigurace transverzální (tangenciální) Hallovy sondy [9]

Pro měření změn intezity magnetického pole byl zvolen měřič magnetického pole Bell (Obr. 18), který patří mezi špičkové přístroje používající digitální zpracování

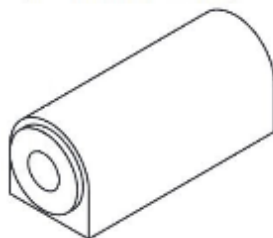
signálu procesorem DSP (digitální signálový procesor), což zajišťuje velmi přesné a rychlé měření. Díky tomu můžete pracovat s přesností 1% a využívat funkce Auto Zero, Min./Max./Peak Hold, Auto Range a Relative Mode. Série přístrojů 5170 a 5180 je vybavena aktivním LCD displejem, který zobrazuje všechny důležité parametry a hodnoty přehledně a to i za zhoršených světelných podmínek. Dostupné dva typy přístroje mají pak společné funkce jednotky Gauss/Tesla nebo Ampér/Metr. Model 5180 je navíc vybaven analogovým výstupem ($\pm 3V$ FS) a komunikačním USB portem.

[9]



Obr. 18. Gauss / Tesla meter [9]

Před každým měřením se musí Hallova sonda kalibrovat. Na měřícím přístroji Gauss / Tesla metru je tlačítko „ZERO“ (Obr. 18), které se stlačí po tom, co se sonda vloží do komory s nulovým tokem (Obr. 1). Tím je Hallova sonda „vynulována“ a může se zahájit další nové měření.



Obr. 1. Komora s nulovým tokem pro kalibraci Hallové sondy (nulovací měrka) [9]

4. VÝVOJ NOVÉ METODY

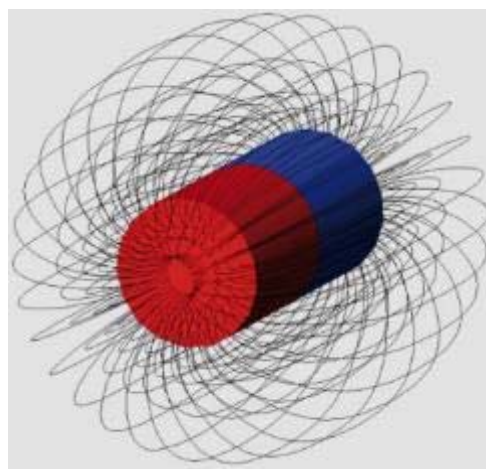
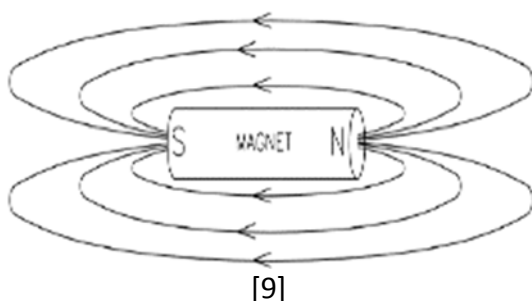
4.1. Nově získané poznatky ve studované oblasti

Samotné drátky jsou tvarově nepříznivou složkou směsi a velmi zhoršují zpracovatelnost drátkobetonové směsi. Současná kontrola homogenity probíhá dosud na čerstvé směsi, ale pokud drátkobeton ztverdne a je součástí konstrukce, nejsou v současnosti vyvinuty žádné známé spolehlivé metody, jak homogenitu drátkobetonu na konstrukci (např. drátkobetonové podlahové desky, nosníky) ověřit, aniž by došlo k jejímu znehodnocení.

Využívání drátkobetonu pro nosné konstrukce je podmíněné zárukou, že rozložení drátků v těchto konstrukcích je pravidelné a všesměrné, a že nevznikají místa se zvýšenou koncentrací (shluky), která pak způsobují, že části konstrukce jsou nedostatečně vyztuženy. Pro posouzení kvality rozložení drátků v drátkobetonových konstrukcích jsou vyvíjeny různé destruktivní i nedestruktivní metody, založené na specifických vlastnostech drátků a to především:

- a) na jejich vyšší měrné hmotnosti drátků ($\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$) oproti betonu ($\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$)
- b) na specifických magnetických vlastnostech měkké oceli (jiná permeabilita u oceli a betonu - permeabilita $\mu_r \gg 1$ u železa, $\mu_r \sim 1$ u betonu)

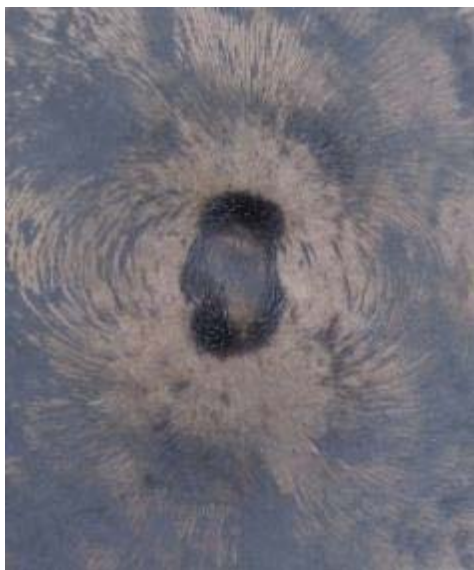
Na vyšší měrné hmotnosti drátků je založena rentgenografická metoda kontroly, resp. i počítačová tomografie, na různé permeabilitě jsou založeny magnetické a elektromagnetické metody. [75]



(Zdroj: Adama Benda, www.omforum.cz)

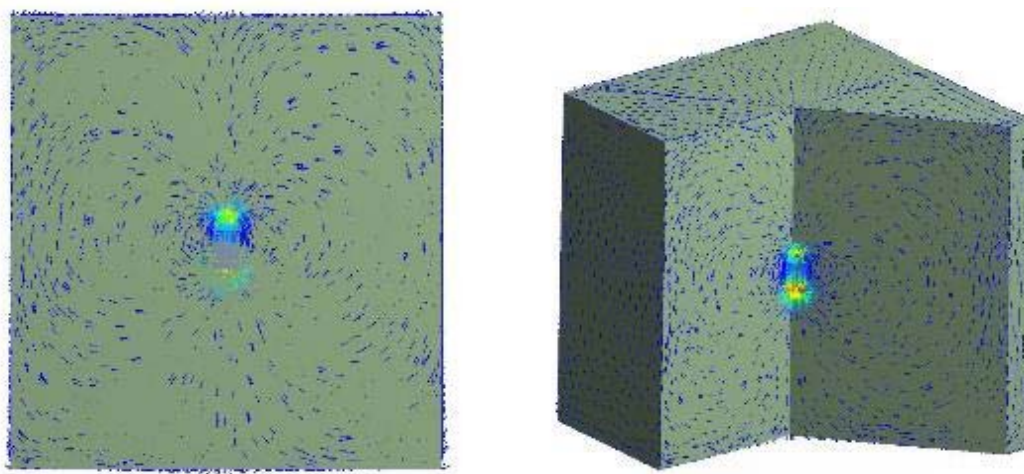
Obr. 2. Zobrazení stacionárního magnetického pole

V první fázi bylo pokusně sledováno chování magnetického pole v okolí permanentních magnetů, k čemuž byly využity ocelové piliny vysypané do okolí permanentních magnetů (Obr. 3).



Obr. 3. Zobrazení magnetického pole v okolí permanentního neodymového magnetu (průměr 20 mm a délka 40 mm) pomocí ocelových pilin[62]

Dalším metodou, jak zobrazit magnetické siločáry permanentního magnetu je za pomoci numerické simulace (Obr. 4). Pro tento účel byl vytvořen model s válcovým magnetem a zobrazeny magnetické siločáry pomocí řezu modelem, aby bylo možné sledovat rozložení magnetických siločar a jejich hustotu.

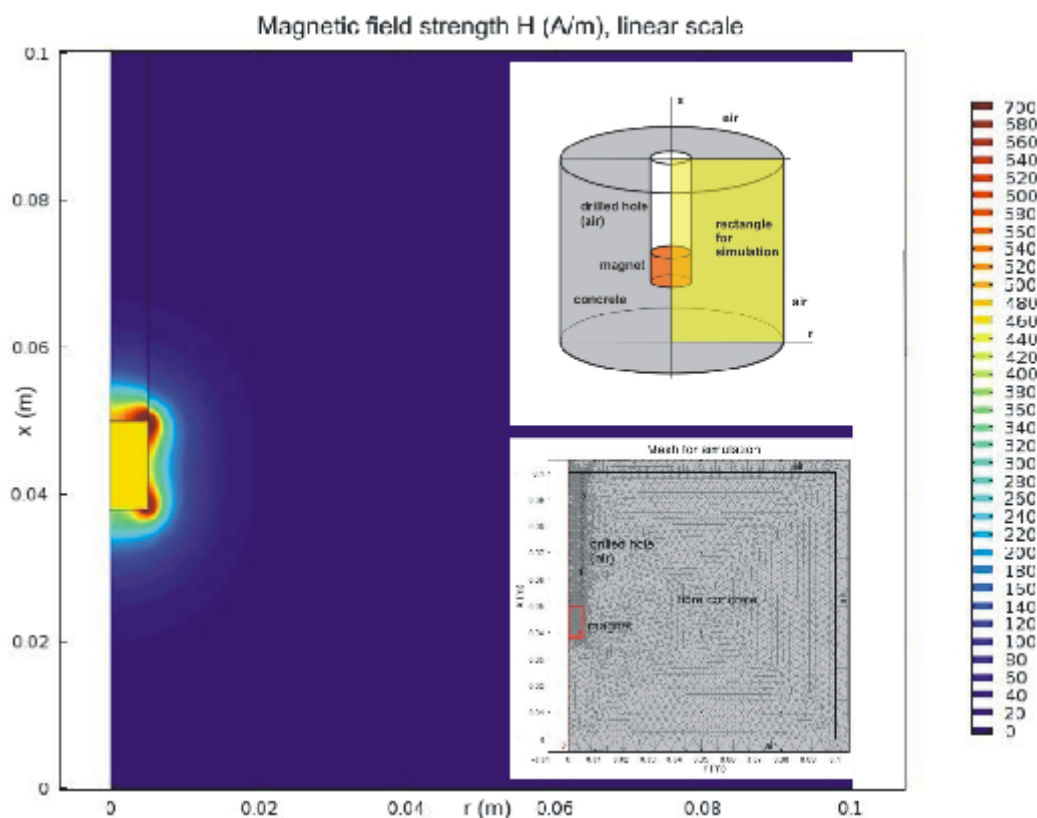


Obr. 4. Zobrazení magnetického pole v okolí permanentního magnetu pomocí software ANSYS

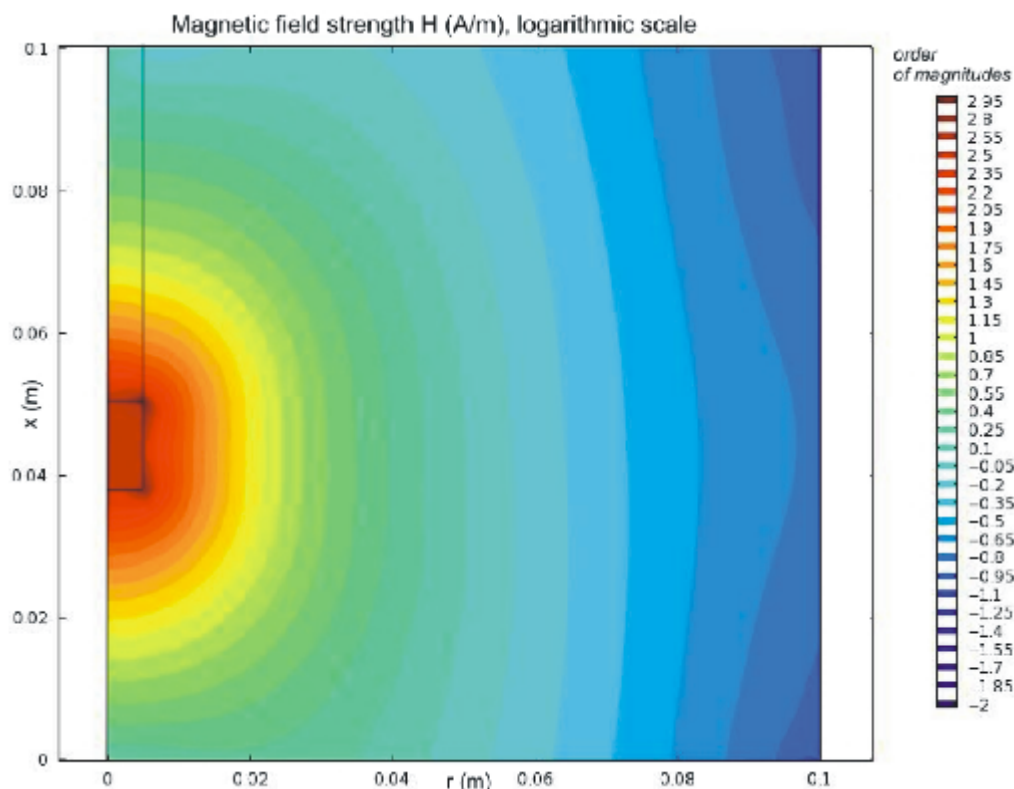
4.2. Vývoj hloubkové permanentní magnetické sondy (PeMaSo)

V praxi jsou požadovány kontroly, které zasahují do celého objemu konstrukce. Na základě získaných zkušeností s chováním permanentních magnetů bylo přikročeno k vývoji hloubkové magnetické sondy, kterou se měří koncentrace drátků v okolí do konstrukce předvrtaných otvorů malého průměru. Průměr vývrtů činí $\varnothing$ 25 mm.

Pro zjištění přibližného prostupu magnetického pole (permeability permanentních magnetů) v drátkobetonu byl vytvořen matematický model a spočten v programu MATLAB [63]. Z výsledků je patrné (Obr. 5 a Obr. 6), že intenzita magnetické pole je nejsilnější na povrchu permanentních magnetů a do 20 mm od středu magnetu, dále pak výrazně ubývá.



Obr. 5. Průběh magnetického pole v okolí permanentních magnetů Lineární stupnice [63]

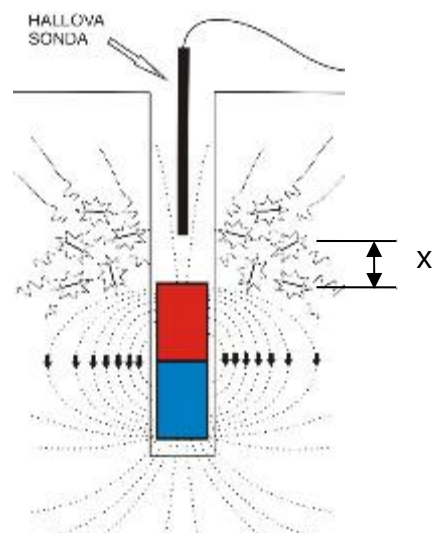


Obr. 6. Průběh magnetického pole v okolí permanentních magnetů Logaritmická stupnice [63]

Nová metoda je založena na vlastnostech permanentních magnetů, které kolem sebe vytváří magnetické pole, charakterizované magnetickými siločárami, které je měřitelné Hallovo sondou (Obr. 16 a Obr. 7). Je nepochybné, že pokud se permanentní magnet dostane do prostředí, ve kterém se nachází feromagnetický materiál (drátky), bude magnetické pole permanentních magnetů tvarově ovlivněno (Obr. 8).

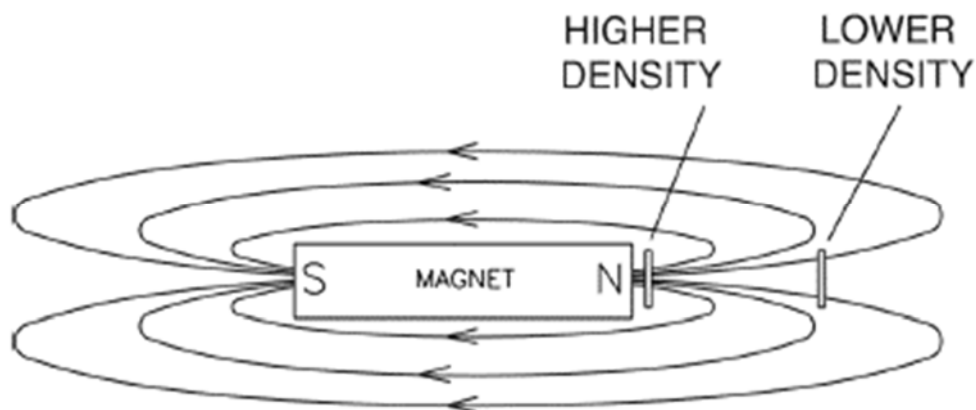


Obr. 7. Gauss-teslameter Bell 5180 [65]



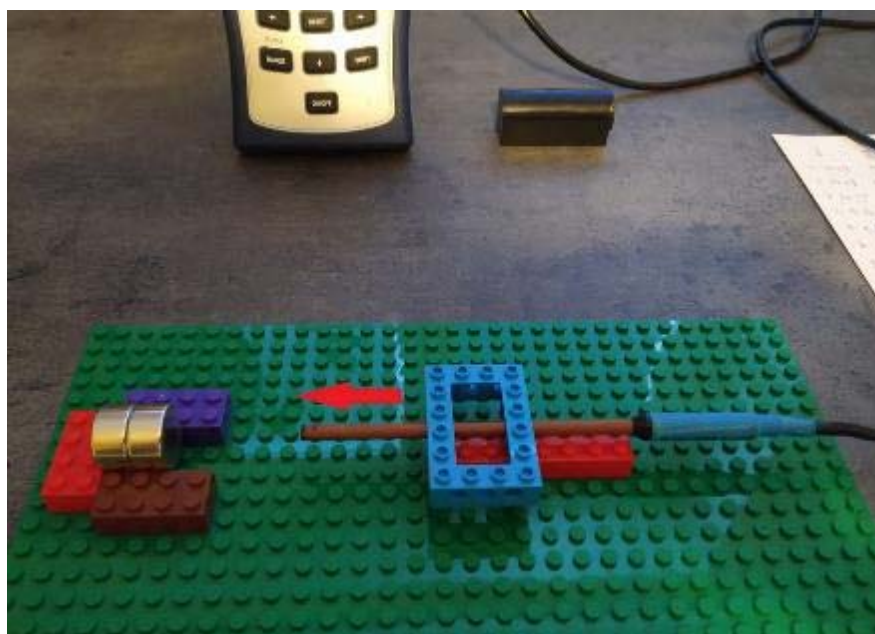
Obr. 8. Porušení magnetických siločar v drátkobetonu vlivem drátků [65]

Pokud bude změna tohoto pole vhodně změřena, může být nalezena korelace mezi nárůstem koncentrace drátků v drátkobetonu a změnou intenzity magnetického pole.



Obr. 9. Intenzita magnetického pole vůči poloze Hallovy sondy [9]

Jako vhodný přístroj pro měření intenzity magnetického pole byl zvolen Gauss-teslameter Bell 5180 s axiální Hallovou sondou. Cílem prvního měření bylo nalézt optimální velikost permanentního magnetů (počet magnetů) a optimální vzdálenost Hallovy sondy od povrchu magnetu.

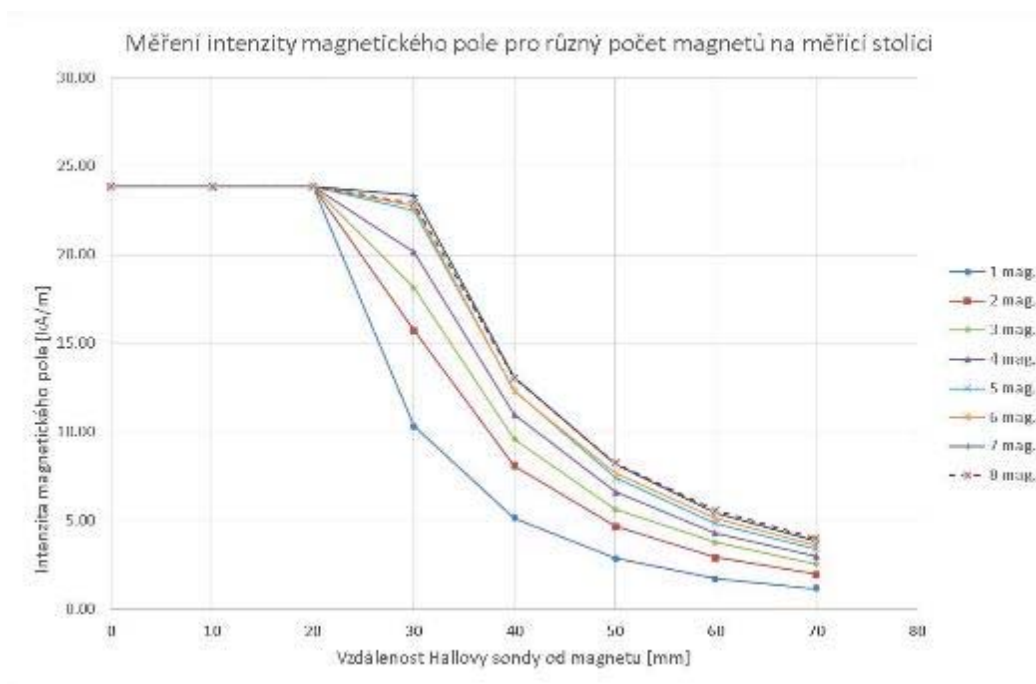


Obr. 10. Měřicí stolice pro stanovení optimálního počtu permanentních magnetů a vzdálenosti Hallovy sondy

Pro tento účel byla vytvořena měřicí stolice, kde bylo možné vkládat potřebný počet magnetů a v jejich podélné ose posouvat axiální Hallovu sondu (Obr. 10). Jako základní

prvek sestavy byl zvolen tvarově vhodný silný permanentní magnet, což je válec o průměru 20 mm s výškou 10 mm. Silným permanentním magnetem je neodymový magnet. Tvarově odpovídajícím dostupným neodymovým magnetem byl magnet s magnetizací N42, který je chráněn poniklovaným povrchem (Ni-Cu-Ni). N42 je označení pro kvalitu neodymového magnetu. Zjednodušeně se dá říci, že číslice 42 značí vnitřní magnetickou energii magnetu (magnetickou sílu), což odpovídá síle 108 N (přibližně 11 kg). Písmeno „N“, označuje maximální pracovní teplotu magnetu a v tomto případě je to 80 °C.

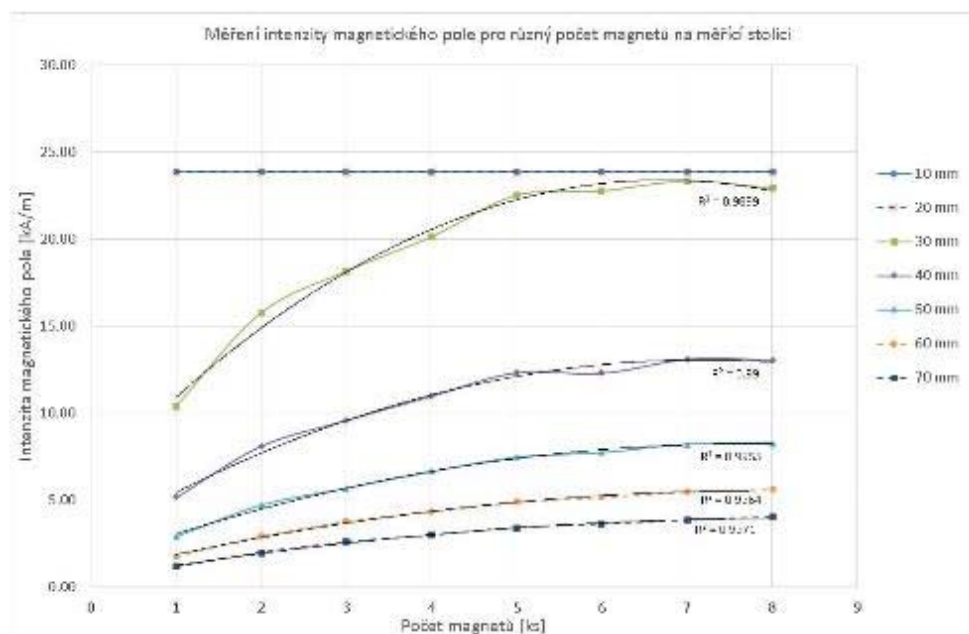
Z výsledků měření na stolici byly vytvořeny dva grafy. První graf zobrazuje pro různý počet magnetů závislost na vzdálenosti Hallovovy sondy (Graf 1). Z grafu je patrné, že do vzdálenosti 20 mm od povrchu magnetu je sonda zahlcena pro všechny magnety. Pro počet 5 ks nebo více magnetů, intenzita magnetického pole pro neovlivněné stacionární magnetické pole již nenarůstá, křivky splývají, proto se jako vhodný počet jeví 4 ks magnetů. Výsledný rozměr vhodného permanentního magnetu je o průměru 20 mm a s výškou 40 mm.



Graf 1. Měření intenzity magnetického pole pro různý počet magnetů
v závislosti na vzdálenosti Hallovovy sondy

Druhý graf zobrazuje různé vzdálenosti sondy od magnetů v závislosti na počtu magnetů (Graf 2). Do vzdálenosti 20 mm je sonda opět zahlcená a křivky splývají. Jako optimální

se jeví vzdálenost Hallovy sondy 40 až 60 mm od povrchu magnetů, kdy proložená parabolická křivka je plynulá a má ještě dobrou citlivost k intenzitě magnetického pole.



Graf 2. Měření intenzity magnetického pole pro různé vzdálenosti v závislosti na počtu magnetů

Při měření Hallovou sondou se prokázalo, že se vzrůstající vzdáleností Hallovy sondy od povrchu magnetů sice roste spolehlivost měření, výrazně však klesá intenzita magnetického pole měřená Gauss / Teslametrem.

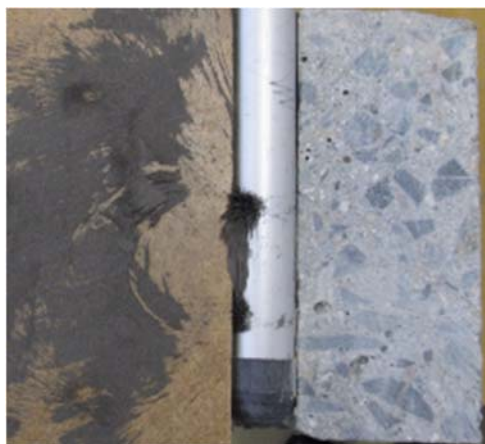
4.3. Vývojová sonda – permanentní magnetická sonda PeMaSo - 01

Pro ověření úvah byla sestrojena pokusná sonda (nazvaná PeMaSo, později PeMaSo - 01), která byla tvořena magneticky inertní hliníkovou trubkou vnějšího průměru 25 mm, do které mohly být umísťovány válcové permanentní magnety o průměru 20 mm (Obr. 11).



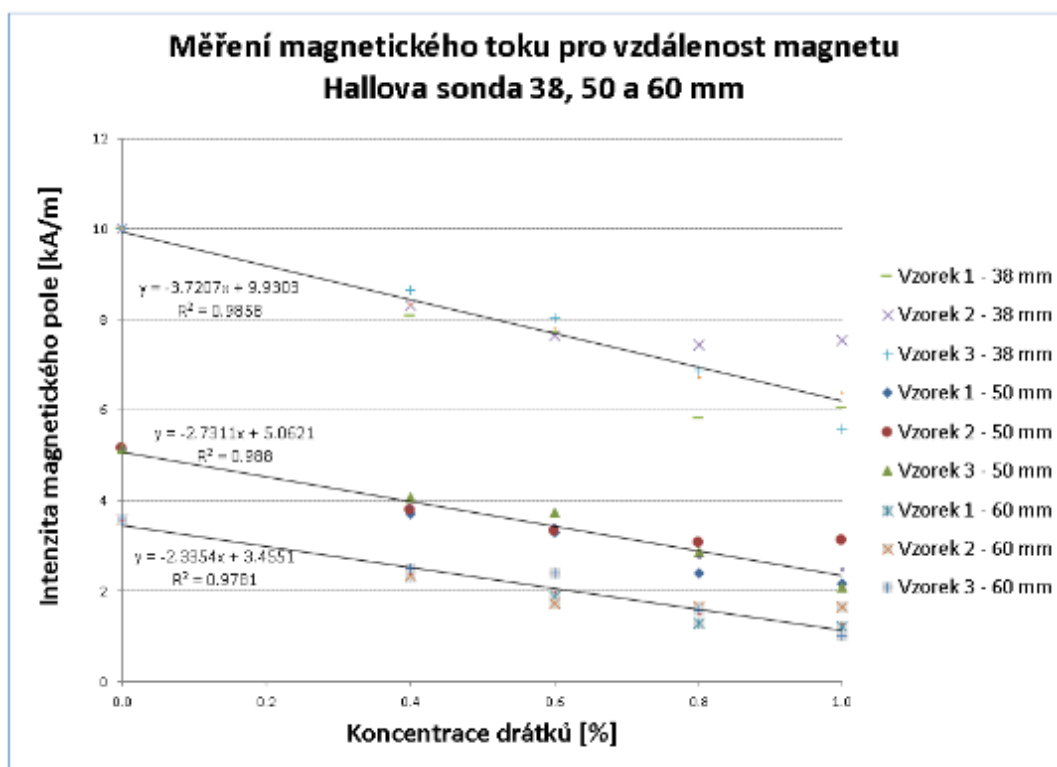
Obr. 11. Vývojová sonda PeMaSo-01 s měnitelnou vzdáleností Hallovy sondy od magnetu [64]

Ve volitelné vzdálenosti v podélné ose byla umístěna samotná Hallova sonda, měřící magnetické pole uvnitř sondy (hliníkové trubice). Vzdálenost Hallovy sondy od povrchu magnetů byla u vývojové sondy nastavitelná.



Obr. 12. Zobrazení magnetického pole v okolí permanentního neodymového magnetu v experimentální sondě pomocí ocelových pilin [62]

Jako nejvýhodnější se jevila vzdálenost v rozmezí 40 mm až 60 mm Hallovy sondy od povrchu magnetů. Kontrolní měření, provedená na 3 vzorcích (krychlích) s vyvrtaným otvorem, ukázala velmi dobrou korelaci (Graf 3) mezi úbytkem intenzity magnetického pole a rostoucí koncentrací drátků ve vzorcích.

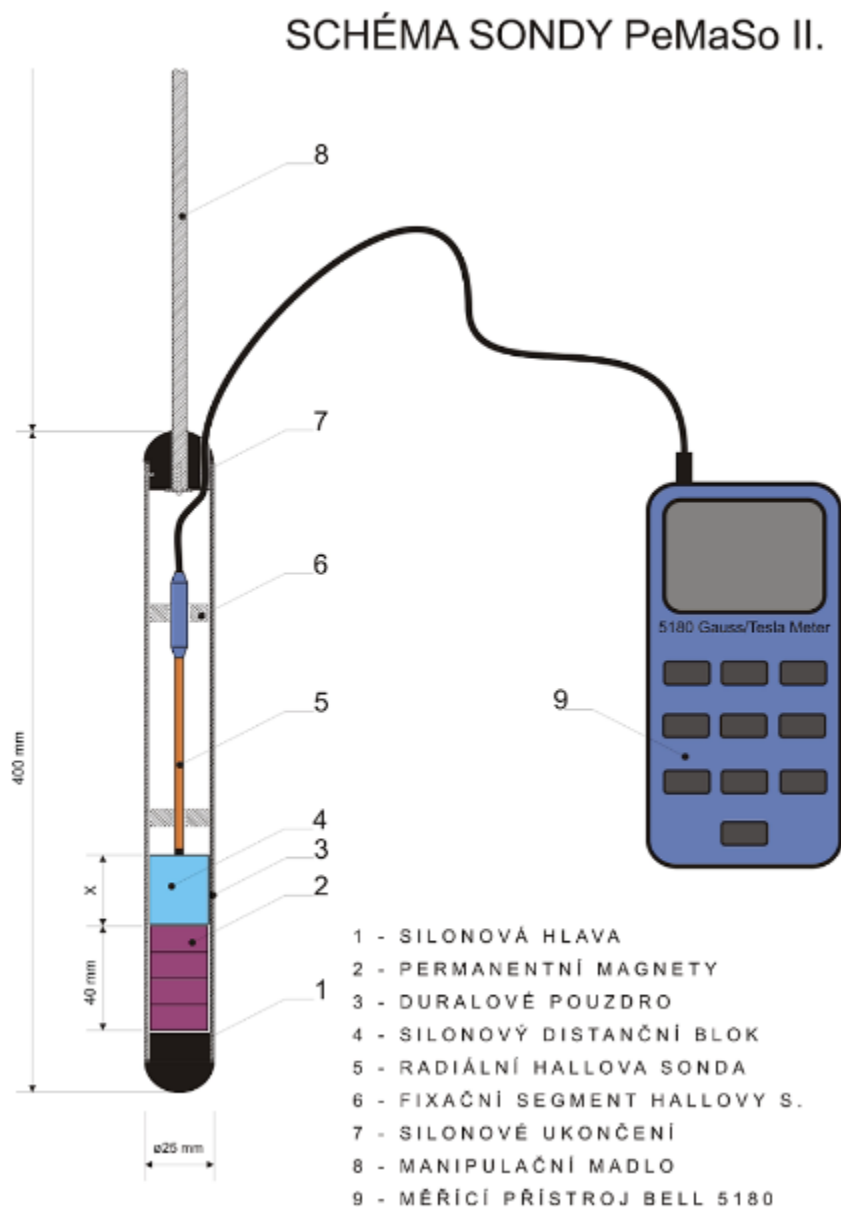


Graf 3. Korelace mezi úbytkem intenzity magnetického pole a rostoucí koncentrací drátků ve vzorcích

Nejmenší rozptyl měření na stejných vzorcích byl zjištěn při vzdálenosti 50 mm Hallový sondy od magnetů, a to při zachování dostatečné citlivosti k intenzitě magnetického pole, proto byla jako fixní hodnota zvolena právě vzdálenost 50 mm pro další etapu vývoje a vytvoření nového prototypu sondy.

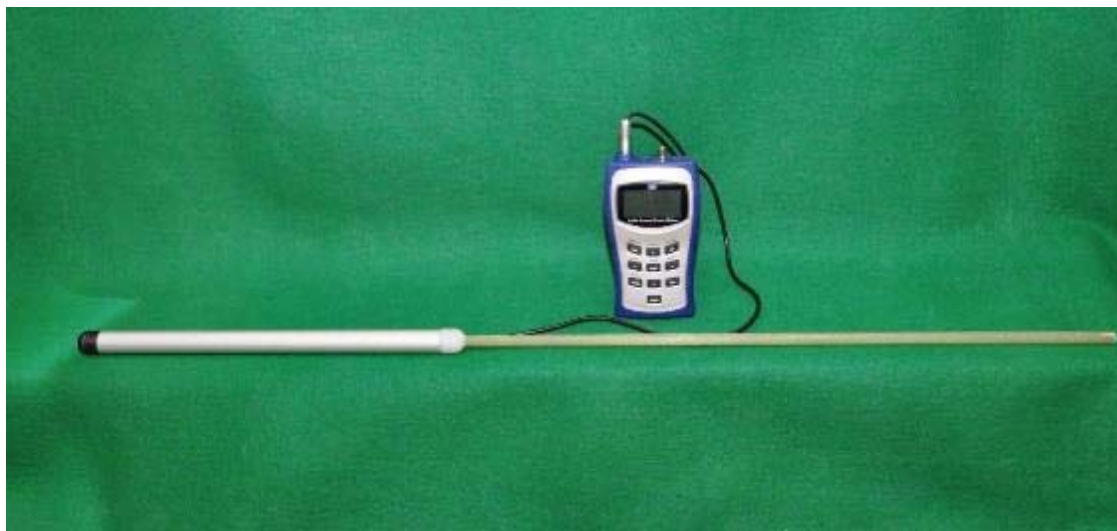
4.4. Prototyp sondy – permanentní magnetická sonda PeMaSo – 02

Sondou PeMaSo-01 nebylo možné měřit v hloubce drátkobetonové konstrukce, protože byla především uzpůsobena pro nastavitelnost parametrů sondy. Vývojová sonda PeMaSo-01 sloužila k ověření činnosti a ověření volby parametrů. Za tím účelem byl zhotoven prototyp sondy PeMaSo-02 (Obr. 13).



Obr. 13. Schéma s popisem magnetické sondy PeMaSo

Rozdíl mezi vývojovou sondou a prototypem sondy PeMaSo-02 (Obr. 13) je především v napevno nastavených parametrech, které byly stanovené pro měření jako optimální a sondou je uskutečnitelné měření do hloubky konstrukce (Obr. 14).

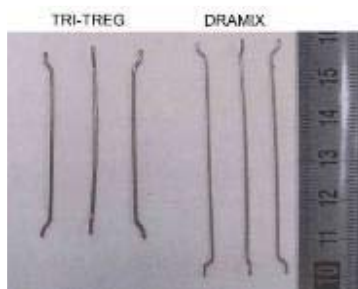


Obr. 14. Prototyp hloubkové sondy PeMaSo-02 s pevnou vzdáleností Hallovy sondy od magnetu [69]

4.5. Ověření magnetické metody na testovacích vzorcích

Pro ověření správnosti magnetické metody byly zhotoveny na Fakultě stavební ČVUT v Praze „testovací vzorky“, u kterých byla zaznamenána koncentrace drátků při výrobě, avšak tato hodnota pro jednotlivé vzorky nebyla sdělena před měřením pracovníkům VUT v Brně. Celkem bylo dodáno 12 krychlí drátkobetonu rozměrů 150 x 150 x 150 mm (Obr. 16). Pro zvýšení počtu hodnocení byly do každého vzorku vyvrtány vždy 2 otvory Ø 25 mm, vzdálené od sebe 40 mm za předpokladu, že se tyto paralelní otvory nebudou ovlivňovat při měření.

Měření probíhala sondou PeMaSo tak, že byla vyhodnocena měření uprostřed sondy po krocích 10 mm. Další měření by byla již částečně ovlivněna „okrajovým efektem“.



Obr. 15. Drátky TRI-TREG a DRAMIX [70]

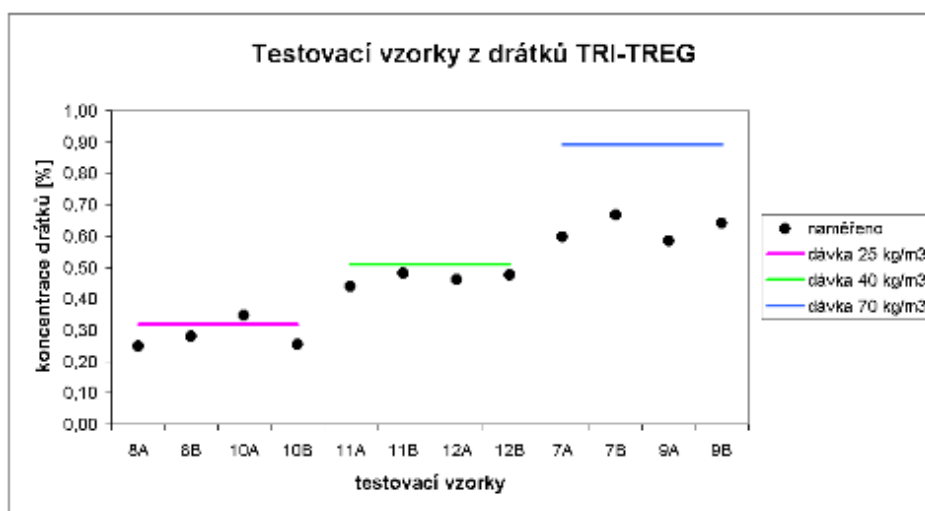
Výsledky srovnávacích měření

Naměřené výsledky z „testovacích vzorků“ byly vyhodnoceny z korelačního vztahů (Graf 3), získaných na „kalibračních vzorcích“. Po „odtajnění“ hodnot koncentrace drátků v drátkobetonu byly výsledky vyneseny do dvou grafů (Graf 4 a Graf 5). Graf 4 je vyneseny pro drátky Tri-treg (Obr. 15) o koncentraci 0,32 % (25 kg/m³), dále 0,51 % (40 kg/m³) a 0,89 % (70 kg/m³) a pro stejné koncentrace je vyneseny i Graf 5, kde ovšem výztuž tvoří drátky Dramix (Obr. 15).

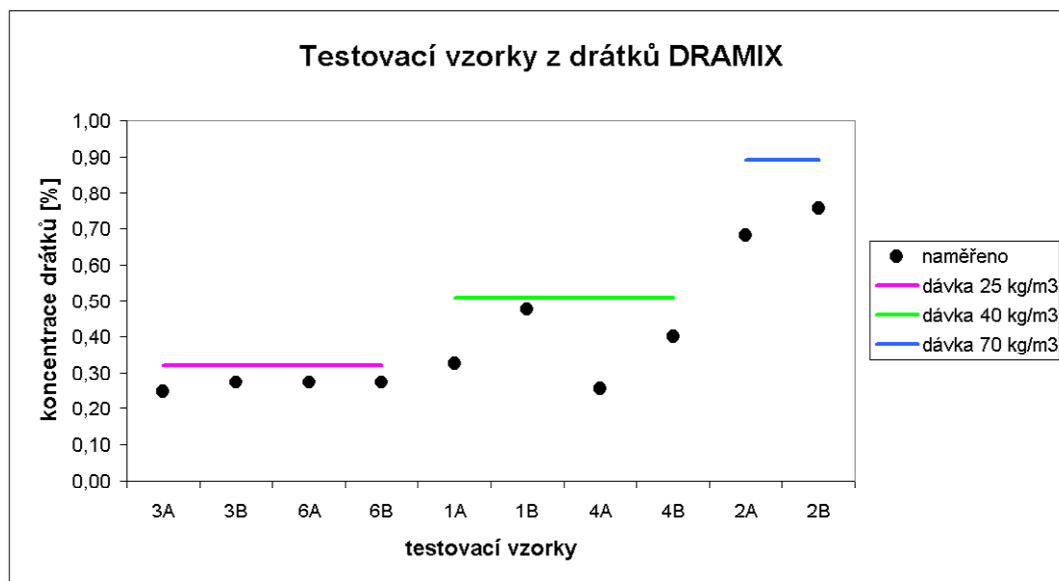


Obr. 16. Sada testovacích drátkobetonových vzorků [75]

Z grafů je zřejmé, že pro nízké koncentrace drátkobetonu výsledky měření velmi dobře odpovídají koncentraci drátků v testovacích vzorcích. U vyšších koncentrací drátkobetonu roste i rozptyl měření, přičemž naměřené hodnoty zůstávají „pod hodnotami“, které jsou uváděny na „testovacích vzorcích“. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že se zvyšující se koncentrací drátků roste i pravděpodobnost většího rozptylu, což bylo patrné i při vytváření korelační křivky. Liší se tedy (pravděpodobně) koncentrace drátků u kalibračních vzorků a testovacích vzorků při vyšší koncentraci drátků ve vzorcích.



Graf 4. Graf výsledků měření vzorků z drátků TRI-TREG [71]



Graf 5. Graf výsledků měření vzorků z drátků DRAMIX [71]

Závěr ověření magnetické metody

Zjištění z ověření magnetické metody do jisté míry korespondují s měřeními pro vytvoření korelačního vztahu, kdy právě vzorky pro vyšší koncentrace (0,8 % a 1,0 %) vykazovaly největší rozptyl měření, jak je patrné z grafu (Graf 3).

Z hlediska rychlého a operativního vyhodnocování koncentrace drátků v drátkobetonových konstrukcích se ukázala metoda, založená na měření deformace magnetického pole permanentních magnetů v „hloubkové sondě“, která se umísťuje do předvrtaných mikrovývrtů v drátkobetonové konstrukci (Obr. 17), jako perspektivní. Metoda při ověření prokázala pozitivní výsledky, a proto byl další výzkum zaměřen na detailnější ověření magnetické metody. Metoda je zatížena i určitými omezeními, vyplývajícími z fyzikální podstaty měření, kterým je např. dosah sondy, což bude také podrobněji analyzováno.



Obr. 17. Ukázka měření vzorku a vzorek opatřený vývrtů

4.6. Sada sklo-epoxidových vzorků

Drátkobetonové vzorky neumožňují sledovat vnitřní rozložení drátků (ve výjimečných případech se dají rentgenovat). Přitom při kalibraci je důležité zjištění, jaké je rozložení drátků těsně pod povrchem zkoušeného vzorku. U drátkobetonových těles relativně malých rozměrů je velká pravděpodobnost vytvoření nehomogenit v podobě výškového rozmísení drátků při hutnění vzorku a vzrůstá pravděpodobnost vzniku jednosměrné orientace drátků při okraji formy (okrajový efekt). Proto byly navrženy a realizovány kalibrační bloky, u kterých bylo kamenivo nahrazeno odpovídajícími frakcemi skleněné drti a cementové pojivo s vodou bylo nahrazeno epoxidovou pryskyřicí.

Vyvíjené metody jsou založeny převážně na elektromagnetické bázi, proto není změna materiálu žádný problém. Podstatné je zachování struktury a objemu materiálu.

Typy drátků byly použity obdobné, jako v předchozím případě, tedy TRI-TREG, DRAMIX a FIBREX, v hmotnostních koncentracích 0,5 %, 1,0 % a 1,5 %.

Formy byly použity rozměrů 300 x 300 x 150 mm, vnitřní povrch forem byl opatřen kovovou folií, která měla zaručit hladkost povrchu, což je patrné na obrázku (Obr. 18).



Obr. 18. Vytvořené 3 sady sklo-epoxidových vzorků

Při výrobě byla nejprve pečlivě namíchána suchá směs, která byla poté zalita pryskyřicí. Čerstvá směs byla zcela průhledná, a umožnila provést případné korekce polohy drátků. Vytvrzené vzorky jsou průsvitné a polohu drátků pod povrchem vzorku lze dobře sledovat. Na prvním obrázku (Obr. 19) je koncentrace drátků 0,5 %, na druhém obrázku (Obr. 20) koncentrace 1 % na třetím posledním obrázku (Obr. 21) koncentrace 1,5 % - vše pro drátky typu DRAMIX (na obrázcích jsou vzorky prosvíceny halogenovým reflektorem).



Obr. 19. Sklo-epoxy s drátky
DRAMIX - 0,5 % [69]



Obr. 20. Sklo-epoxy s drátky
DRAMIX - 1,0 % [69]



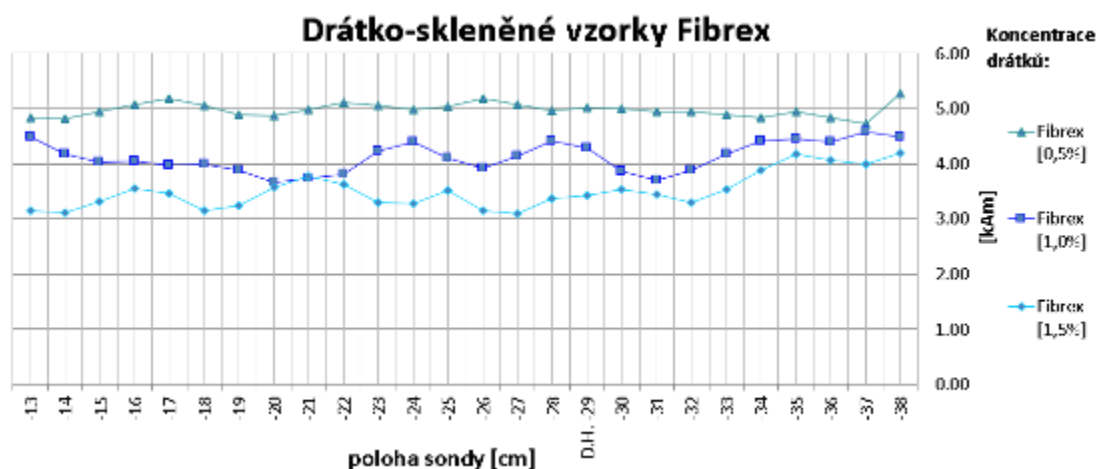
Obr. 21. Sklo-epoxy s drátky
DRAMIX - 1,5 % [69]

Při měření sondou v kalibračním vzorku o délce 300 mm bylo zjištěno jisté kolísání hodnot při krokovém měření po 10 mm.



Obr. 22. Měření sklo – epoxy vzorku sondou PeMaSo [69]

Toto kolísání svědčí o tom, že i při zachování konstantní koncentrace drátků v kalibračním vzorku, může být měření ovlivněno převažujícím směrem rozptýlených drátků. Výsledná měření koncentrace budou stanovována jako aritmetický průměr řady dílčích měření (Graf 6).



Graf 6. Průběh měření sondou PeMaSo-02 na 3 sklo-epoxidových vzorcích s drátky
Fibrex [69]

5. Problematika vzorků

Pro přesnou kalibraci vyvíjené hloubkové magnetické sondy (PeMaSo-2), založené na měření změny magnetického pole v okolí permanentních magnetů, která je vyvolána přítomností drátků, bylo zhotoveno a změřeno množství vzorků s různou koncentrací drátků.

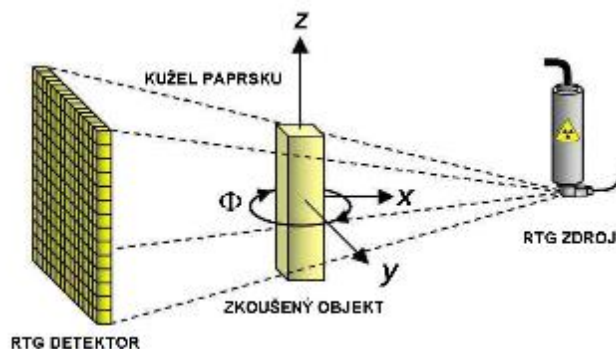


Obr. 23. Vzorky drátkobetonu pro tomografické vyšetřování

Některé vzorky vykazovaly při měření výchylky, které vedly k přesvědčení, že homogenita vzorku vykazuje anomálie, které nebylo možné jednoduše vysvětlit. Proto byly dva vzorky vykazující výrazné odchylky v měření podrobeny vyšetření počítačovou tomografií, které mělo prokázat, jak jsou kovová vlákna ve vzorku skutečně rozložena. Jedná se o válcový vývrt průměru 100 mm a výšce 150 mm, se středovým vývrtem $\varnothing 25$ mm pro umístění měřicí magnetické sondy a dále krychle 150 x 150 x 150 mm se dvěma rovnoběžnými vývrty průměru 25 mm (Obr. 23).

5.1. Tomografické vyšetření drátkobetonových vzorků

Výstupem této trojrozměrné zobrazovací metody při tomografickém vyšetřování je série 16bitových obrazů, které představují virtuální řezy vzorkem neboli tomografické řezy. Tomografické řezy jsou matematicky počítány (tomografická rekonstrukce) z rentgenových snímků objektu vytvořených během otáčení vzorku. Otáčení vzorku je typickým znakem pro průmyslové a vědecké laboratorní CT stanice (Obr. 24). Naopak u lékařských CT se otáčí zdroj s detektorem a to kvůli stabilizaci pacienta.



Obr. 24. Princip průmyslového tomografu [87]

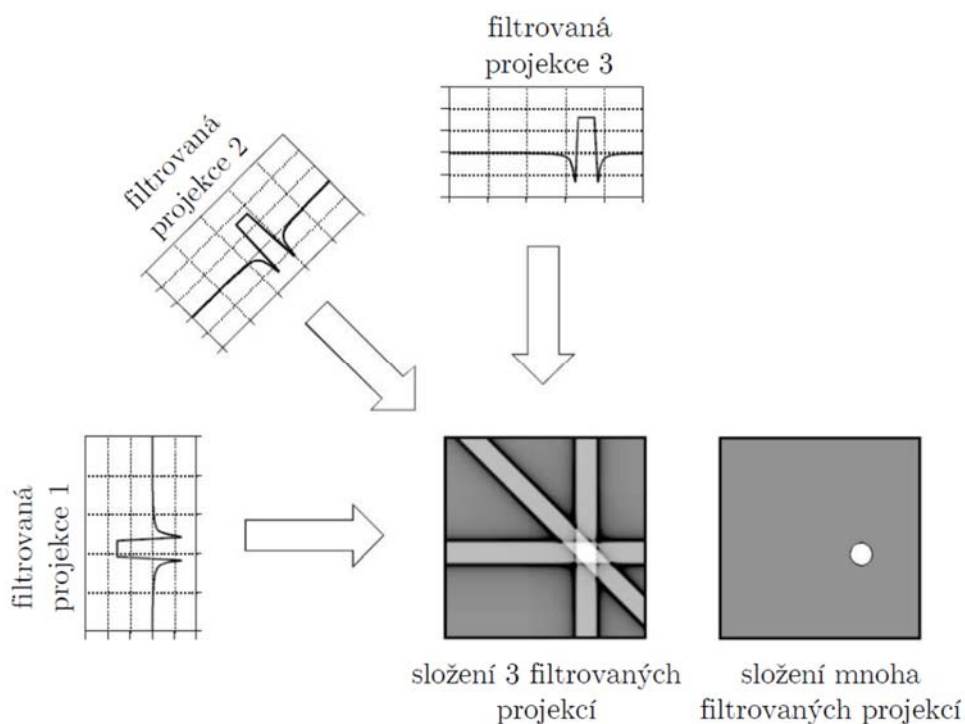
5.1.1. Principy tomografie a mikrotomografie

Industriální tomografy používají scintilační detektory, které přemění rentgenové záření na světlo. Sledovaný objekt je prozářen rentgenovým zářením, přičemž je zaznamenáván poměr prošlé a původní intenzity. Takovéto snímky jsou vytvořeny ze všech úhlů natočení předmětu.



Obr. 25. Schéma průmyslového tomografu [87]

Ze získaných projekcí pomocí matematických metod je rekonstruován řez. Prozářením předmětu z různých úhlů vznikne sada projekcí, ze kterých se provádí rekonstrukce obrazu (Obr. 26).



Obr. 26. Řez vzniklý filtrovanou zpětnou projekcí [43]

5.1.2. Tomografické artefakty

Při vzniku tomografického obrazu vznikají artefakty. Artefakty jsou části, které na obrazu jsou a ve skutečnosti neexistují. Uvedeny artefakty, které znesnadňují detekci povrchu a významně se projevují na vzorku drátkobetonu [43]:

1. Rozptyl

Záření se při průchodu předmětem pružně rozptyluje na elektronech ve vnějších slupkách atomů. Tento rozptyl se nazývá Comptonův jev. Foton narazí do elektronu, předá mu část své kinetické energie a udělí mu tím hybnost ve směru jiném, než se foton pohyboval. Ve výsledném obrazu potom vznikají různé stíny a nerovnoměrné rozložení intenzity.

2. Artefakt kuželového svazku

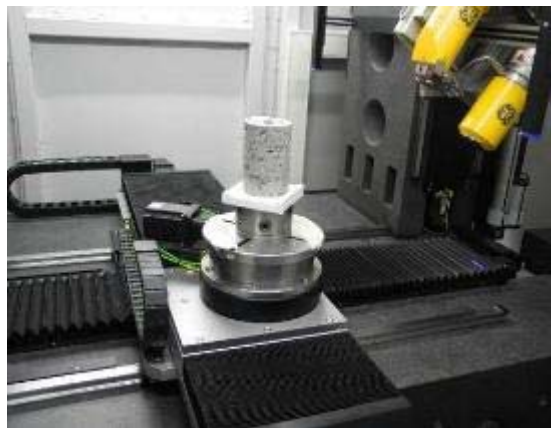
Použití geometrie s kuželovým svazkem a kruhovou trajektorií může vést k neúplnosti dat a vzniku artefaktu kuželového svazku. Projevuje se rozmazáním na okrajích předmětu. Čím větší je vrcholový úhel kuželu, tím více jsou okraje předmětu rozmazány. Vzniku artefaktu kuželového svazku se lze vyhnout vhodným nakloněním vzorku, aby rovné hrany nebyly orientovány vodorovně.

3. Tvrdnutí svazku

Při použití polychromatického rentgenového svazku je absorpční koeficient závislý také na energii záření. Většina materiálů absorbuje paprsky s nižšími energiemi lépe než paprsky s vyššími energiemi. Pro energie používané v průmyslové tomografii se tomu děje zejména kvůli fotoelektrickému jevu a Comptonovu rozptylu. Popsaný efekt způsobuje nehomogenity v intenzitě obrazu a označuje se jako tvrdnutí svazku.



Obr. 27. GE phoenix|tome|x L 240 [87]

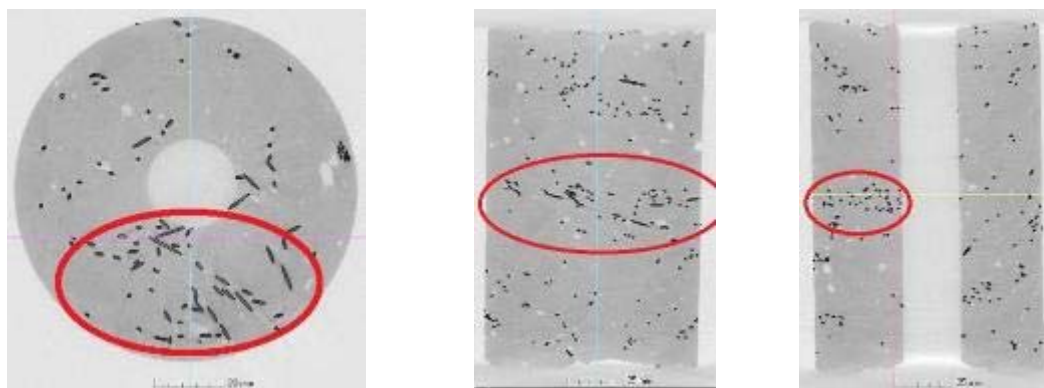


Obr. 28. Válcový vzorek upevněný v manipulátoru [87]

5.1.3. Válcový vzorek o průměru 100 mm

Nejdříve byl na CT odzkoušen menší válcový vzorek, který byl pevně umístěn do manipulátoru tomografu (Obr. 28) a po bezpečném uzavření stínících dveří přístroje (Obr. 27) došlo k postupnému prozařování vzorku.

Následným matematickým zpracováním jsou rekonstruovány virtuální řezy vzorku. Tato data byla získána s voxelovým rozlišením 100 μm . Vhodnými počítačovými softwary lze z těchto řezů vyseparovat drátky a vytvořit 3D model vzorku. Zpracování tomografických dat trvalo přibližně dvě hodiny.



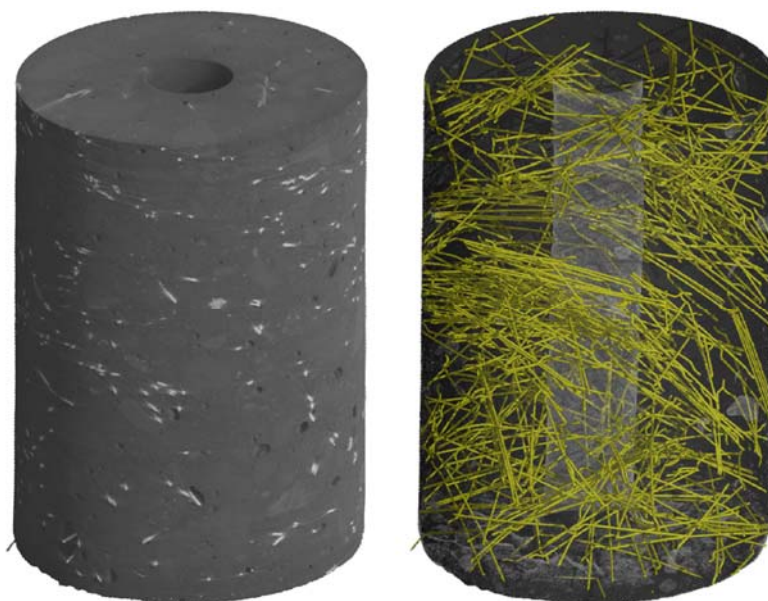
půdorys

čelní pohled

boční pohled

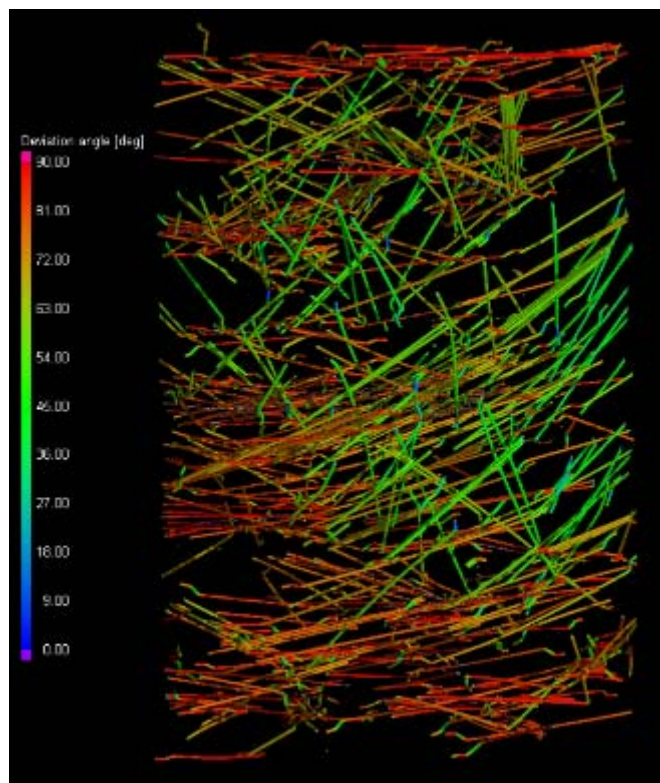
Obr. 29. Jednotlivé CT snímky vzorkem s vyobrazením shluků [87]

Výsledkem rekonstrukce obrazu je axonometrické zobrazení drátkobetonového válce s vyobrazením rozložení jednotlivých drátků. Toto axonometricky zobrazené těleso lze „řezat“ ve všech třech osách (x, y a z) a je možné v tomto tělese najít „anomálie“ (Obr. 29), které způsobují odchylné výsledky při kalibraci magnetické sondy (Obr. 30).



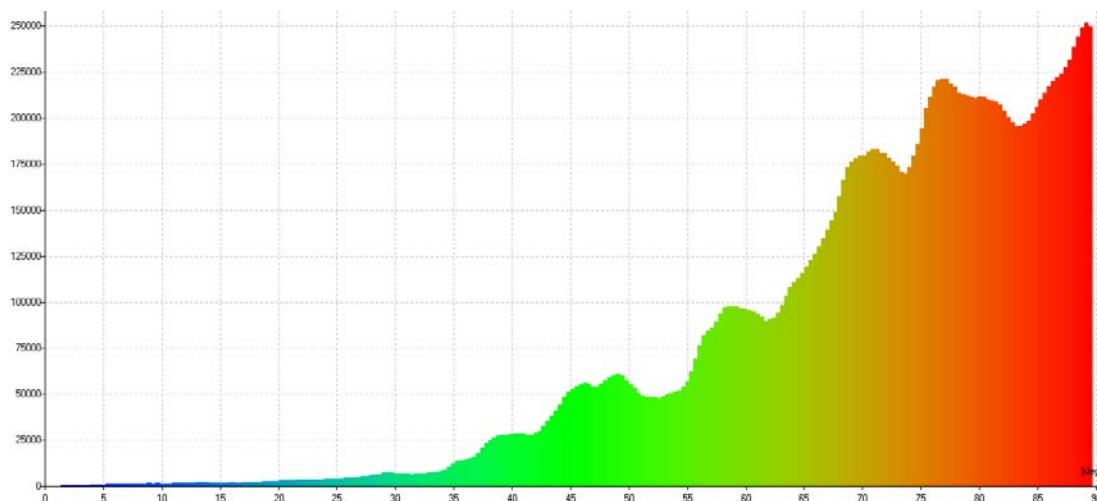
Obr. 30. Axonometrické zobrazení transparentního vzorku válce s drátky [87]

K další analýze tomografických dat se využívá speciální modul 3Dvizualizačního software Volume Graphics Studio Max 2.2 pro analýzu vláken kompozitního materiálu, který umožňuje kvantitativní posouzení rozložení drátků (Obr. 31 a Graf 7).



Obr. 31. Axonometrické zobrazení separovaných drátka ve válci se směrovou analýzou [87]

Pro provedenou směrovou analýzu vláken je pak možné zobrazit histogram a určit tak převládající směry orientace vláken (Obr. 31).



Graf 7. Histogram směrové analýzy – orientace vláken ve válci [87]

5.1.4. Drátkobetonová krychle o hraně 150 mm

Jako následující byla odzkoušena drátkobetonová krychle. Větší rozměry krychle však způsobily, že se snížila rozeznatelnost drátků uvnitř krychle a vnitřní prostor krychle proto nešel jednoznačně vyhodnotit.



Obr. 32. Zkušební krychle upevněná v manipulátoru

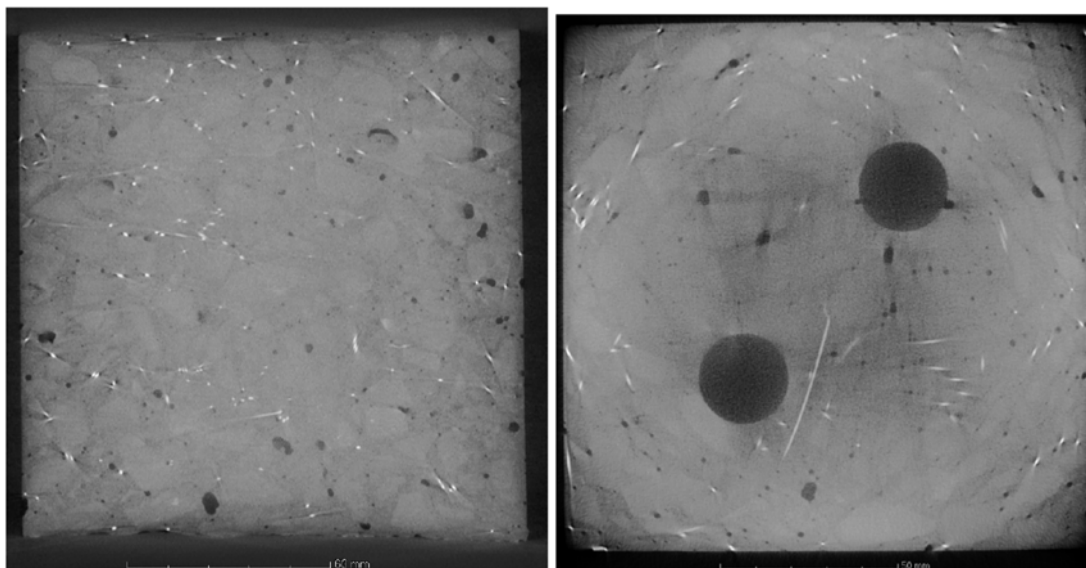
Proto bylo využito obdobného tomografu, avšak s vyšším výkonem. Při vyšším napětí je možné s úspěchem prozářit a počítačově zpracovat i celou zkušební krychli (Obr. 32). Vzorek byl naskenován na mikrotomografické stanici GE Phoenix v|tome|x s 300. Krychle byla postavena na polystyrenové podložce (pro záření s použitým urychlovacím napětím se nezobrazuje). Přesné nastavení tomografu je uvedeno v tabulce (Tab. 2). Výsledný obraz tvořilo 10 GB dat. Zpracování takového množství dat je značně časově náročné, proto byl soubor uložen v polovičním rozlišení 0,2 mm. Pozitivním vedlejším účinkem redukce velikosti CT dat bylo částečné odstranění šumu, který byl přítomný v původních datech. [43].

Tab. 2. Nastavení tomografu pro sken vzorku drátkobetonu [43].

Parametr	Nastavení
urychlovací napětí	280 kV
proud	500 mA
doba expozice	200 ms
počet snímků	2400
doba měření	8 min
filtr	0,5mm Sn
averaging – počet zprůměrovaných snímků	2
skip – počet přeskočených snímků	3
rozlišení	0,1mm

Na obrázku (Obr. 33) je v dolní a horní části znatelné rozmazání způsobené artefaktem kuželového svazku. Pro eliminaci artefaktu kuželového svazku by bylo vhodné krychli naklonit, ale v případě takto hustého materiálu je možné krychli prozářit pouze ve vodorovné poloze.

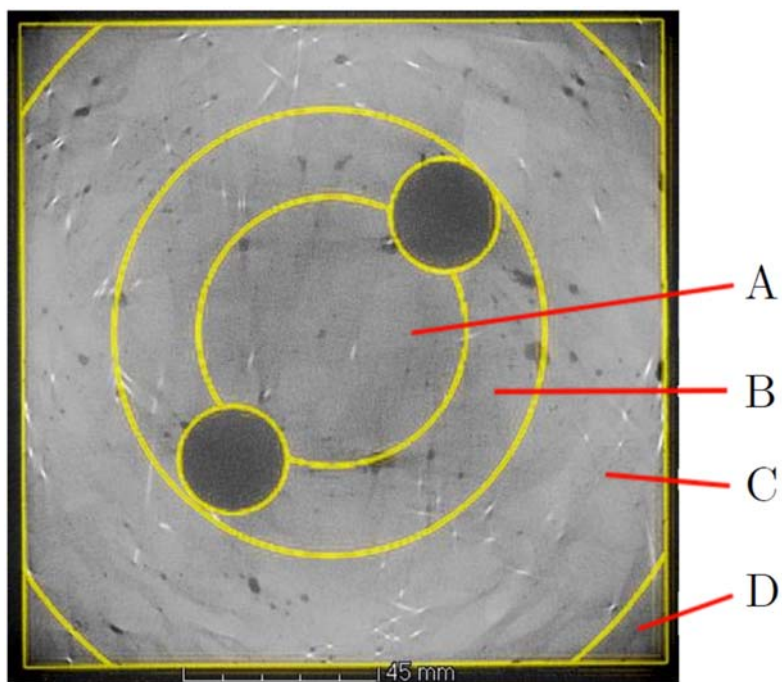
Pro částečné odstranění artefaktů vznikajících vlivem tvrdnutí svazku byl použit filtr 0,5 mm Sn (cín), který odfiltroval ze spektra nižší frekvence.



Obr. 33. Naskenovaný vzorek drátkobetonu – podrobnější pohledy ve dvou ortogonálních řezech [43]

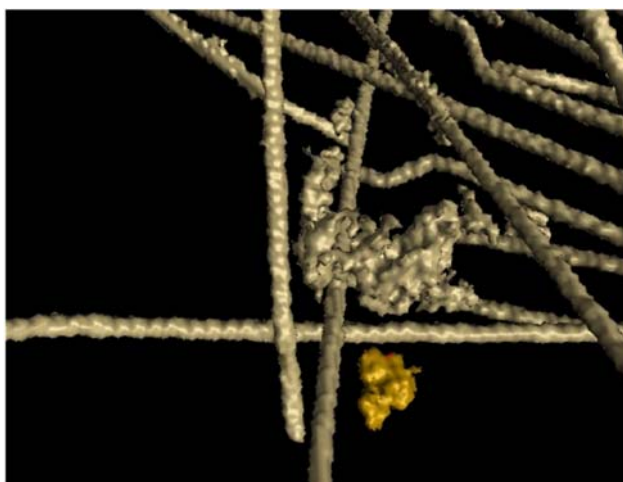
Pro nerovnoměrné rozložení intenzity obrazu nebylo možné určit povrch drátků pouze jedním nastavením. VG Studio umožňuje vytvoření povrchu nástrojem Surface determination, ovšem pouze jednou. Aby mohl být povrch uchován, lze jej uložit jako ROI (Region of Interest). Nástroj ROI definuje 3D oblasti základních geometrických tvarů (kvádr, válec atd.). S oblastmi lze provádět množinové operace (sčítání, průnik apod.) a dále s nimi pracovat.

Na vzorku byly definovány čtyři oblasti (Obr. 34). Pro každou ze čtyř definovaných oblastí A, B, C, D bylo optimalizováno určení povrchu drátků. Pro závěrečnou analýzu byl vytvořen povrch celého vzorku.



Obr. 34. Křehle rozdělená na čtyři oblasti zájmu podle tmavosti vzorku [43]

Vytvořený povrch stále obsahoval hodně částí, které mezi drátky nepatřily (Obr. 35). Pro další odstranění těchto částí byl využit nástroj programu VG Studio Defectdetection.



Obr. 35. Drátky s parazitními částmi zobrazené nástrojem Defectdetection [43]

5.1.5. Finální povrch

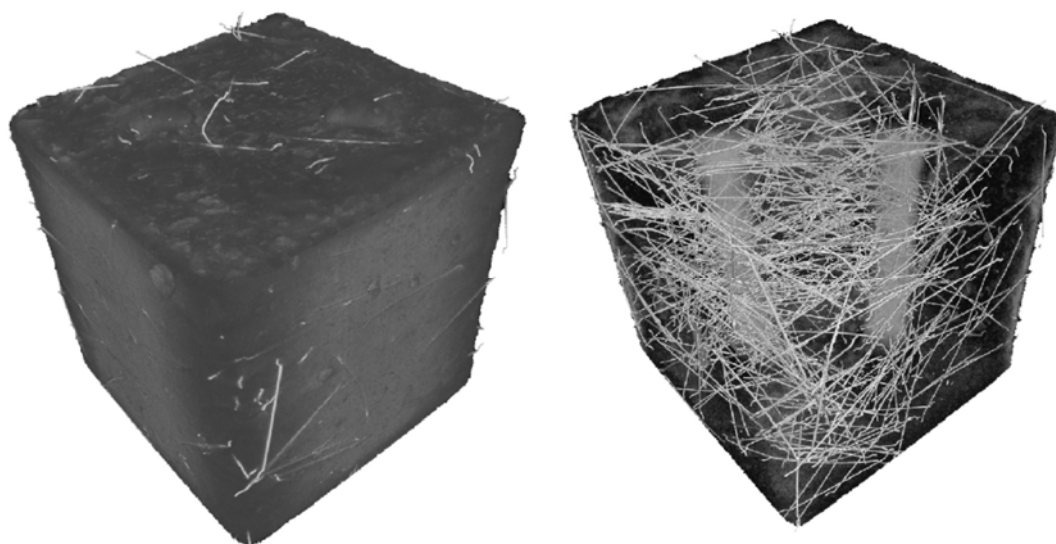
Výsledný povrch byl nastaven tak, aby přesně kopíroval vytvořenou ROI povrchu a následně byl vytvořen celkový 3D pohled na povrch drátků v transparentně zobrazené krychli. V těchto pohledech lze rozeznat nerovnoměrnou distribuci drátků.

Z vlastností ROI lze vyčíst údaje o objemu a spočítat, kolik procent objemu zabírají drátky. Výpočtem byla stanovena koncentrace 0,56 %. Tvůrce vzorku uvádí údaj 0,51 %. Hodnotu je možné považovat vzhledem ke způsobu výroby za přesnou. Hodnota určená zpracováním tomografického obrazu je o něco vyšší také kvůli nepřesnému určení povrchu a výskytu parazitních částí. [43]

5.1.6. Závěr mikrotomografie

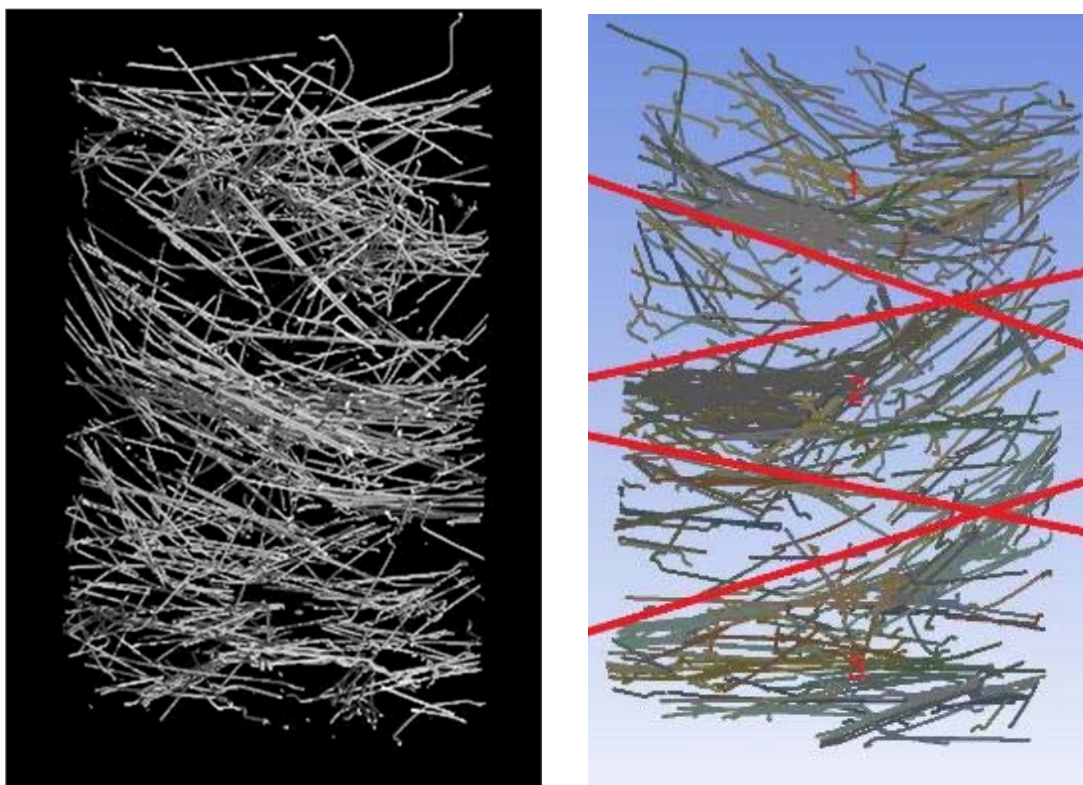
Byla popsána rentgenová mikrotomografie jako zobrazovací metoda a základní princip rekonstrukce obrazu (filtrovaná zpětná projekce) a uvedeny některé tomografické artefakty, které znesnadňují detekci povrchu. Obraz je vlivem tvrdnutí svazku nehomogenní, projevuje se stínění vyvrtaných otvorů a artefakt kuželového svazku. Beton je pórovitý materiál s dutinami různých velikostí. Drátky jsou vůči celé krychli malé a v některých místech málo kontrastní a blízko u sebe. I přes všechny nadstavby klasického určování povrchu bylo nutno využít dalších nástrojů VG Studio, zejména nástrojů Region of interest a Defect detection. Výsledný povrch přesto stále obsahuje defekty, protože drátky se nepodařilo oddělit úplně dokonale.

Pro provedení simulace magnetického pole v drátcích byl povrch exportován do 3D formátu STL.

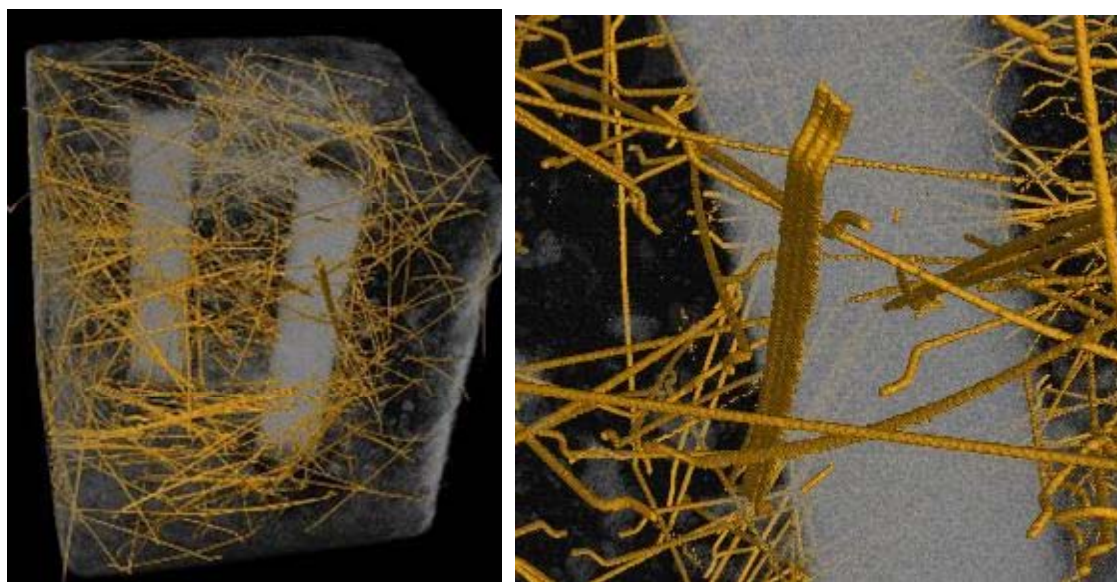


Obr. 36. Axonometrické zobrazení transparentního vzorku krychle s drátky [87]

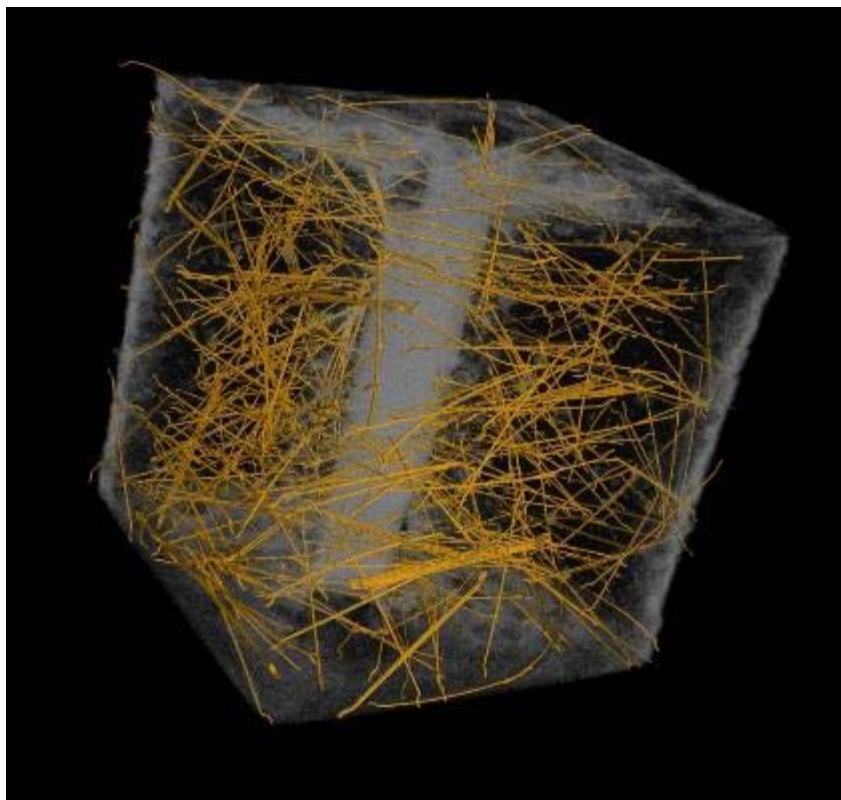
5.1.7. Zjištěné anomálie drátkobetonových vzorků



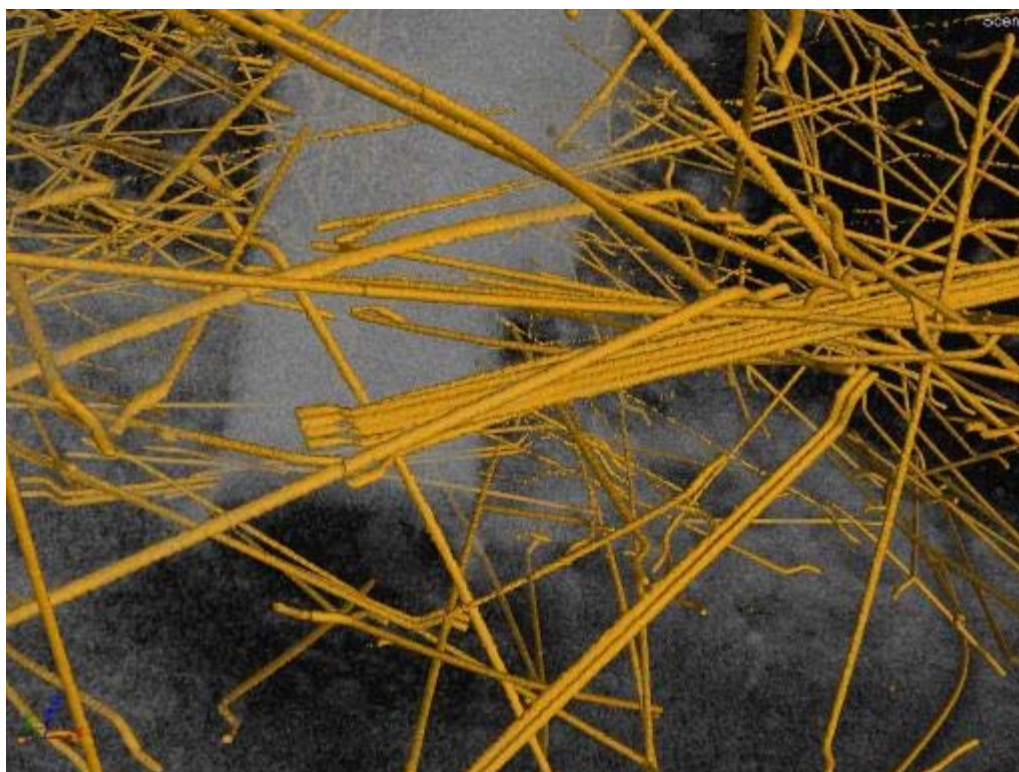
Obr. 37. U válcového vzorku jsou patrné tři vrstvy drátku a převládající horizontální směr



Obr. 38. U krychle se objevil zajímavý defekt nerozlepených drátků



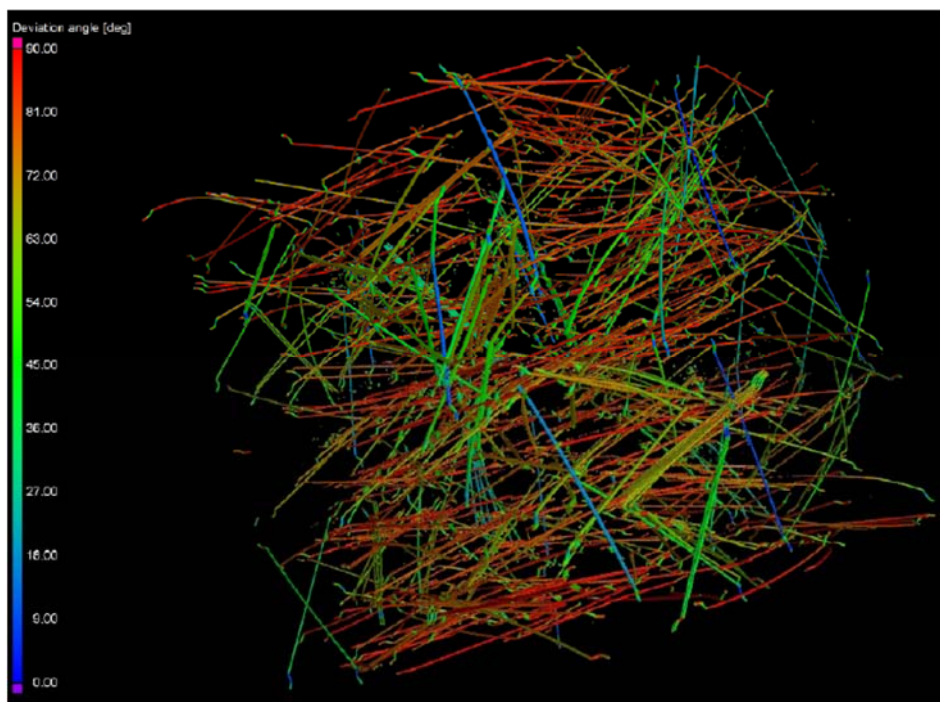
Obr. 39. Další shluk slepených drátků



Obr. 40. Detailní zobrazení slepených drátků

5.1.8. Závěr tomografické vyšetření drátkobetonových vzorků

Kontrola počítačovým tomografem potvrdila předpoklad, že v drátkobetonových vzorcích došlo k nepravidelnému rozmísení drátků (Obr. 36 a Obr. 41), které při kalibraci magnetické sondy vykazovalo anomálie ve výsledných údajích.



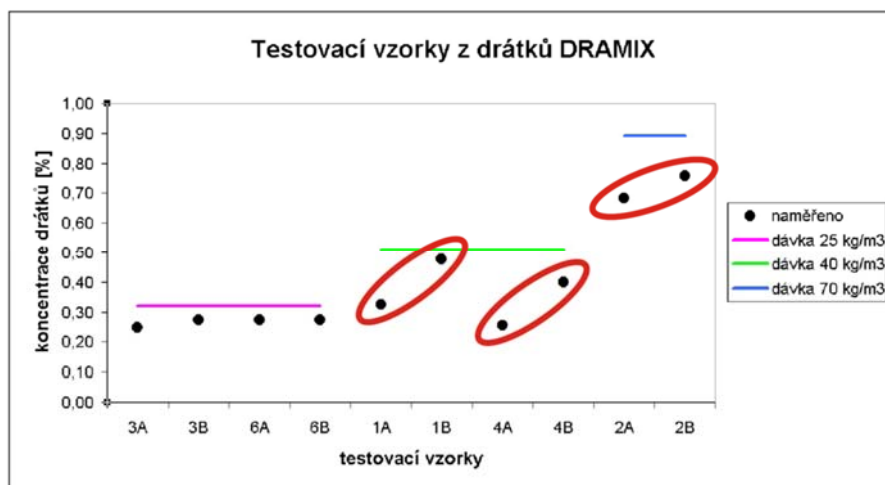
Obr. 41. Axonometrické zobrazení separovaných drátků v krychli se směrovou analýzou [87]

Počítačová tomografie prokázala, že v oblasti kontroly vnitřní struktury stavebních materiálů má velkou vypovídací schopnost. Řadí se k nejpřesnějším nedestruktivním metodám, používaným v technice. Jak však bylo dále ověřeno, má tato metoda i své omezení. I když drátkobetonový válec o průměru 100 mm nebyl pro počítačový tomograf problém, drátkobetonové kostky 150 x 150 x 150 mm jsou již nad možnosti tomografu s touto maximální energií rentgenu (240 kV) a bylo nutno využít tomografu s rentgenkou o napětí 300 kV.

Výhody metody spočívají v přesném zjištění rozložení drátků, stanovení jejich objemového množství a kvantifikace orientace vláken. Přesný STL model bude možné využít pro numerickou analýzu pomocí MKP.

5.2. Vliv okrajového efektu na homogenitu drátkobetonových vzorků

Z grafů je zřejmé, že pro nízké koncentrace drátkobetonu výsledky měření velmi dobře odpovídají koncentraci drátků v testovacích vzorcích. U vyšších koncentrací drátkobetonu roste i rozptyl měření, přičemž některé naměřené hodnoty zůstávají „pod hodnotami“, které jsou uváděny na „testovacích vzorcích“. Zvláště je patrný rozdíl mezi koncentrací vývrtu A a B na stejném vzorku (Graf 8).



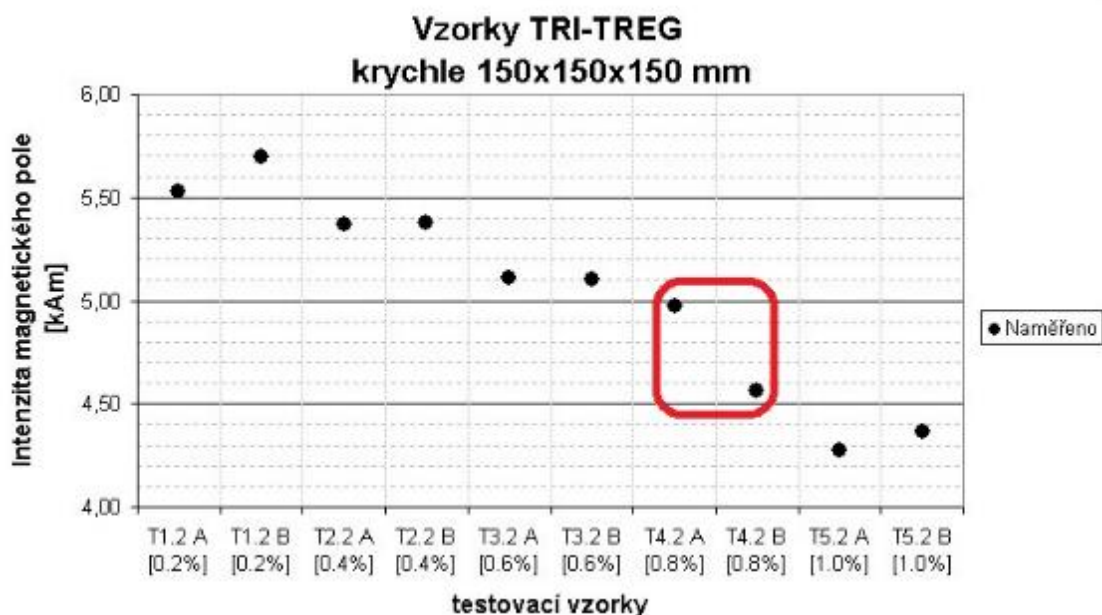
Graf 8. Graf výsledků měření vzorků z drátků DRAMIX [80]

Nové drátkobetonové vzorky s částečnou eliminací okrajového efektu. Na základě zkušenosti s krychlemi o rozměrech 150 x 150 x 150 mm byly vytvořeny nové atypické vzorky o rozměru 300 x 300 x 150 mm a to s pěti různými koncentracemi. Blok byl následně rozřezán diamantovým kotoučem na čtvrtiny (Obr. 42), u kterých je alespoň částečně okrajový efekt eliminován a bude možné sledovat vývrt zatížený okrajovým efektem (A) a nezatíženým (B).



Obr. 42. Blok drátkobetonu s drátky TRI-TREG s vyznačeným řezem [80]

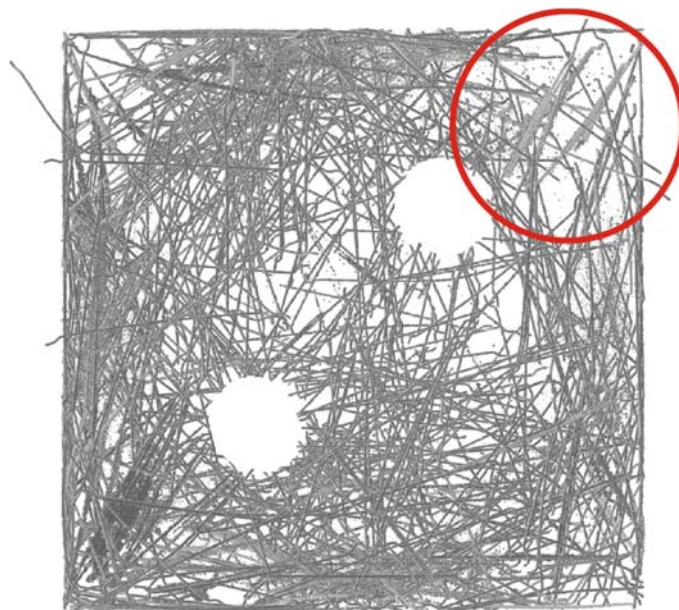
Z výsledků měření vychází velký rozptyl mezi naměřenými hodnotami na vzorku T4 o koncentraci 0,8 % a je tedy zřejmé, že problematika okrajového efektu pro vyšší koncentrace se dotýká i takto zhotovených vzorků (Graf 9).



Graf 9. Graf výsledků měření vzorků z drátků TRI-TREG [80]

Závěr vliv okrajového efektu

Potvrdilo se zjištění, že i při zaručeném množství drátků v kalibračních vzorcích může být bezprostřední odezva jednotlivých metod ovlivněna u malých vzorků okrajovým efektem. Problémem je zpracování drátkobetonu. Zvláště u vyšší koncentrace drátků. Během výrobního procesu jsou vlákna často nerovnoměrně rozložena (Obr. 43). U tradičních stavebních zkušebních vzorků (krychlí 150x150x150 mm) dochází ke vzniku okrajového efektu v rozložení drátků, který způsobuje rozptyl měření u stejného vzorku na různých vývrtech pro vyšší koncentrace drátků. Vliv okrajového efektu byl ověřen a prokázán za pomoci počítačové tomografie.



Obr. 43. *Půdorys axonometrického zobrazení separovaných drátků krychle [80]*

Následující snaha vývoje je vedena získáním kalibračních vzorků, které nebudou zatížený okrajovým efektem a bude je nutno vyřezávat z větších celků drátkobetonu. Pro kalibrační vzorky budou použity válcové formy, které lze opatřit delším vývrtem, než je tomu u klasických krychelných vzorků.

Další výzkum se zaměřil i na zjištění vlivu jednotlivých typů drátků na výsledek měření.

5.3. Užitný vzor permanentní magnetické sondy

Vyvinutá magnetická sonda PeMaSo-02 (Obr. 14) byla na základě pozitivních výsledků při měření v roce 2013 úspěšně zaregistrována jako „užitný vzor“ pod evidenčním číslem **CZ 025427 U1** (viz Příloha č. 1).

6. EXPERIMENTÁLNÍ VYŠETŘOVÁNÍ

6.1. Výroba nových kalibračních vzorků s drátky KH

Na základě předchozích zkušeností bylo přistoupeno k výrobě sady kalibračních vzorků pro zhotovení korelační křivky pro měření konstrukce s konkrétním typem a délkou drátku (Obr. 44). Pro vzorky byla zvolena válcová forma o průměru 150 mm a výšce 300 mm., která vyhovuje požadavku na zhotovení delšího vývrtu v kalibračním vzorku. Pro výrobu drátkobetonových kalibračních vzorků byly použity drátky Krampe Harex (KH) běžně užívané v konstrukcích o délce 60 mm a průměru 0,8 s označením DE 60/0,8. Vyrobeny byly vzorky o koncentraci 0,2 %, 0,4 %, 0,6 %, 0,8 % a 1,0 %.



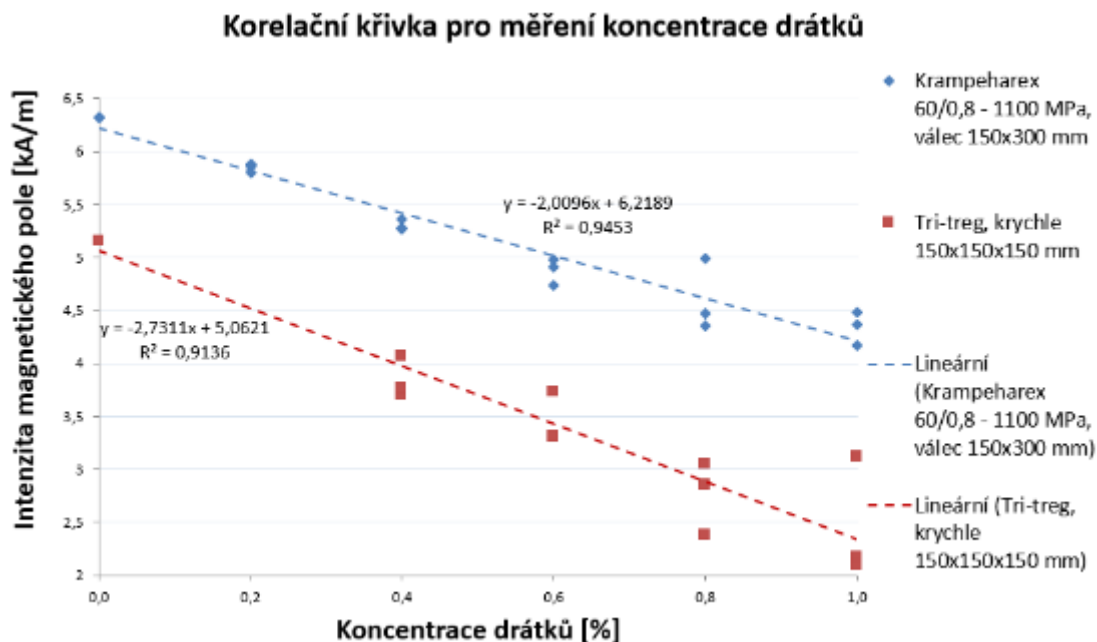
Obr. 44. Foto z výroby vzorků KH

Uprostřed vzorku byl vyvrtán po celé délce centrický jádrový vývrt o průměru 25 mm pro měření magnetickou hloubkovou sondou (Obr. 45).



Obr. 45. Sada kalibračních vzorků KH

Vzorky byly měřeny průběžně po délce s odstupem jednotlivých měření jeden centimetr. Hodnoty byly zprůměrovány, vyneseny do grafu (Graf 10) a proloženy přímkou.



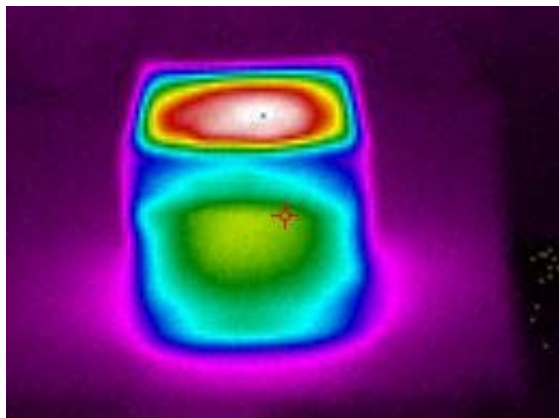
Graf 10. Korelační křivka pro měření drátků – vzorky Krampeharex

Z grafu (Graf 10) je patrný rozdíl mezi přímkou získanou od drátku Tri-treg a přímkou od drátků Krampe Harex, což potvrdilo předpoklad, že pro každý typ drátku bude muset být vytvořen vlastní korelační vztah. Rovněž se potvrdilo, že vzorky vykazují při vyšších koncentracích větší rozptyl pro stejnou koncentraci, což je patrné nejvíce u koncentrace 0,8%.

6.2. Výroba směrového vzorku

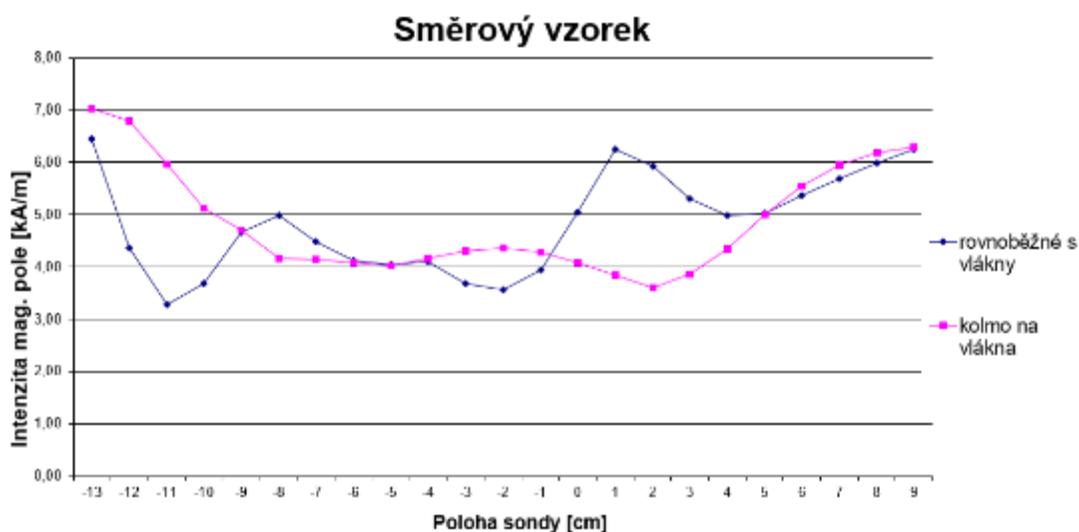
Pro experimentální zjištění byl vyroben jeden speciální sklo-epoxidový vzorek, u kterého byla snaha, aby drátky byly orientovaný pouze jedním směrem (Obr. 46).





Obr. 46. Výroba směrového vzorku (nahore vlevo) – před zalitím pryskyřicí (nahore vpravo), termovize (dole vlevo) a foto zalitého vzorku (dole vpravo) [69]

Vzorek byl po vytvrdnutí opatřen dvojicí vývrtů navzájem kolmých tak, aby měření v jednom vývrtu probíhalo rovnoběžně s vlákny a v druhém kolmo na vlákna. Křivky z měření jsou vidět na grafu (Graf 11). Kolmo na vlákna je křivka klesající a rovnoběžně s vlákny má dva vrcholy na začátku a na konci.



Graf 11. Měření směrového vzorku rovnoběžně s vlákny a kolmo na vlákna

6.3. Výsledky měření koncentrace drátků na vzorcích ostění

Vhodná praktická aplikace pro měření se naskytla při kontrole koncentrace drátků v lamelách ostění tunelu. Lamely tunelového ostění při tloušťkách 40 cm lze považovat za masivní drátkobetonový prvek. Vlastní měření probíhalo ve dvou fázích. V první fázi byly z lamely po destruktivní zkoušce odebrány jádrové vývrtky průměru 150 mm a délce 400 mm (celkem 10 vzorků). Do těchto vývrtů pak byly v laboratořích ÚSZK VUT FAST vyvrtány centrické otvory průměru 25 mm a vlastní měření probíhá už jen v laboratořích.

V další fázi měření je připravována kontrola přímo na zkoušené konstrukci, kde ve zvolených místech budou odvrtány otvory $\varnothing 25$ mm, ve kterých bude také měřena koncentrace drátků magnetickou sondou.

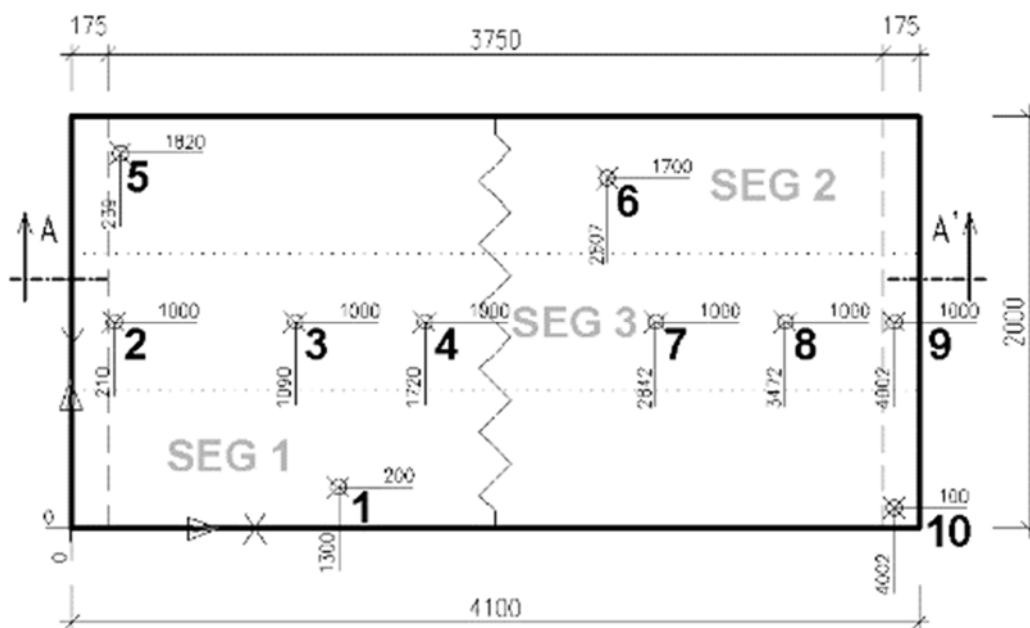


Obr. 47. Segmenty tunelového ostění



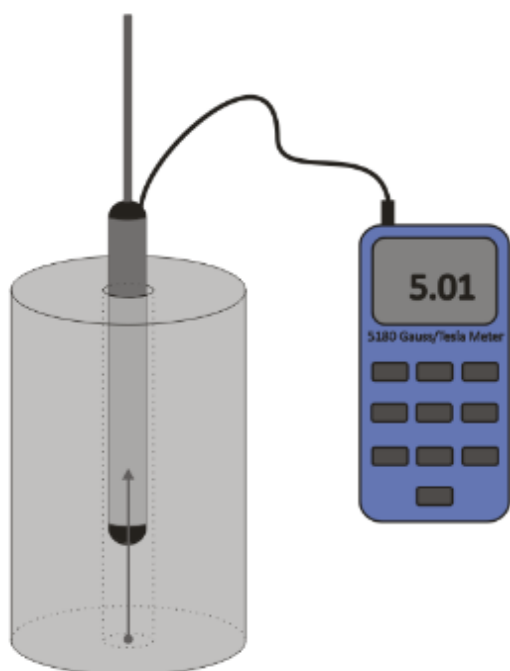
Obr. 48. Sestavené jedno pole z jednotlivých segmentů

Pro odběr válcových vzorků $\varnothing 150$ mm byla použita lamela ostění, odzkoušená na lámací dráze. Původní rozměr lamely byl 2 m x 4,2 m x 0,4 m. Pro osazení na lámací dráhu musela být lamela podélně rozříznuta na 3 přibližně stejné díly, které byly během zkoušky uprostřed rozlomeny. Vzniklo tak 6 dílů z jedné lamely (Obr. 49).



Obr. 49. Rozložení odběrných míst na dílci [83]

Odběry válcových vzorků se uskutečnily v jednotlivých dílech a přesné umístění odběrných míst je vyznačeno v obrázku (Obr. 49).



Obr. 50. Schéma měření sondou PeMaSo-2 [83]



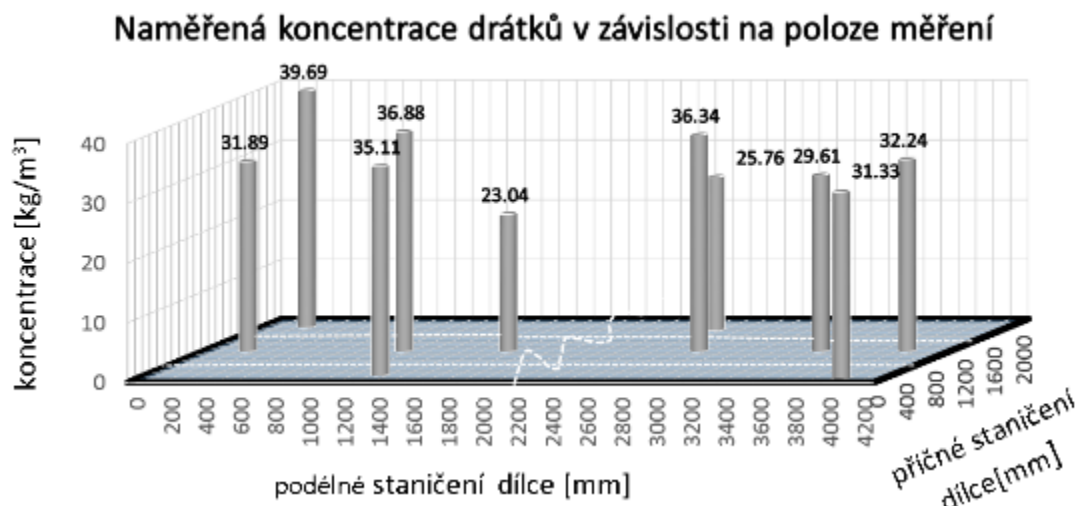
Obr. 51. Praktické měření

V laboratořích ÚSZK byly vyvrtány centricky otvory $\varnothing$ 25 mm a jednotlivé vzorky byly proměřeny tak, že magnetická sonda byla posunována po „kroku“ 10 mm po celé tloušťce lamely (Obr. 50).

Jednotlivá měření po délce vývrtu byla zprůměrována a výsledky byly vyneseny do tabulky (Tab. 3) a do grafu (Graf 12).

Tab. 3. Naměřené hodnoty koncentrací v jednotlivých vývrtech [83]

Vzorek	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6	č. 7	č. 8	č. 9	č. 10
Intenzita magnetického pole [kAm]	4.94	5.05	4.88	5.36	4.78	5.26	4.90	5.13	5.04	5.07
Koncentrace [%]	0.45	0.41	0.47	0.29	0.51	0.33	0.46	0.38	0.41	0.40
Objemové množství drátků [kg/m ³]	35.11	31.89	36.88	23.04	39.69	25.76	36.34	29.61	32.24	31.33



Graf 12. Graf naměřené koncentrace v závislosti na poloze měření na dílci [83]

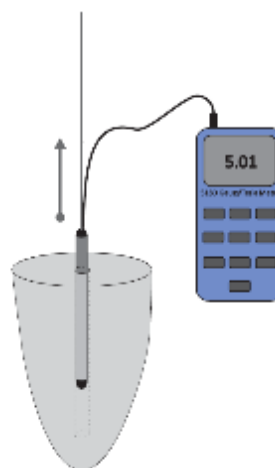
Z výsledků je patrné že nejnižší hodnotu dosahoval dílec ve vrcholu, což potvrdilo problematiku výroby drátkobetonu do zakřivené formy, kdy drátky měli tendenci segregovat do převislých konců formy.

6.4. Výsledky měření koncentrace drátků přímo na vzorcích ostění a v laboratoři

Pro měření a odběr válcových vzorků $\varnothing$ 100 mm byla použita nová lamela ostění, odzkoušená na lámací dráze. Původní rozměr lamely byl 2,0 m x cca 4,0 m x 0,4 m. Pro osazení na lámací dráhu musela být lamela podélně rozříznuta na 3 přibližně stejné díly, které byly během zkoušky uprostřed rozlomeny. Vzniklo tak 6 dílů z jedné lamely. Odběry válcových vzorků se uskutečnily na jednom z dílů.



Obr. 52. Provádění jádrového vývrtu malého průměru na části segmentu ostění [85]

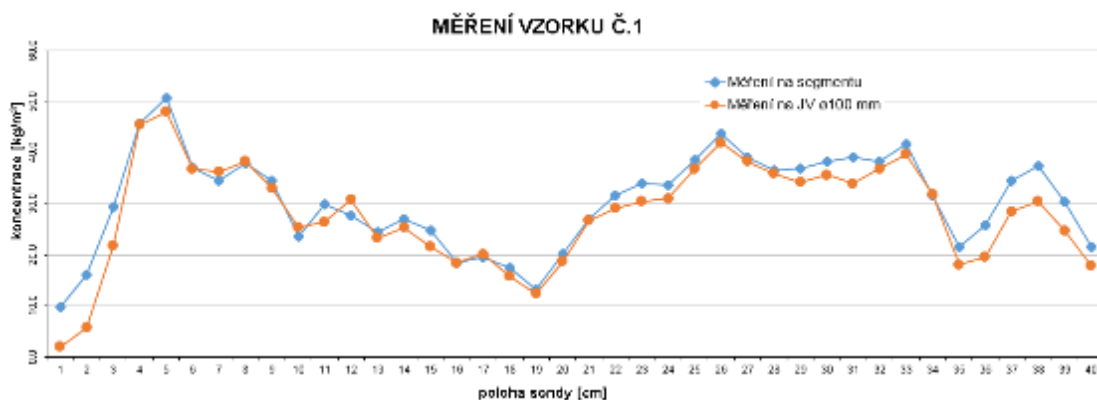


Obr. 53. Schéma sondy PeMaSo-2 při měření na dílci [85]

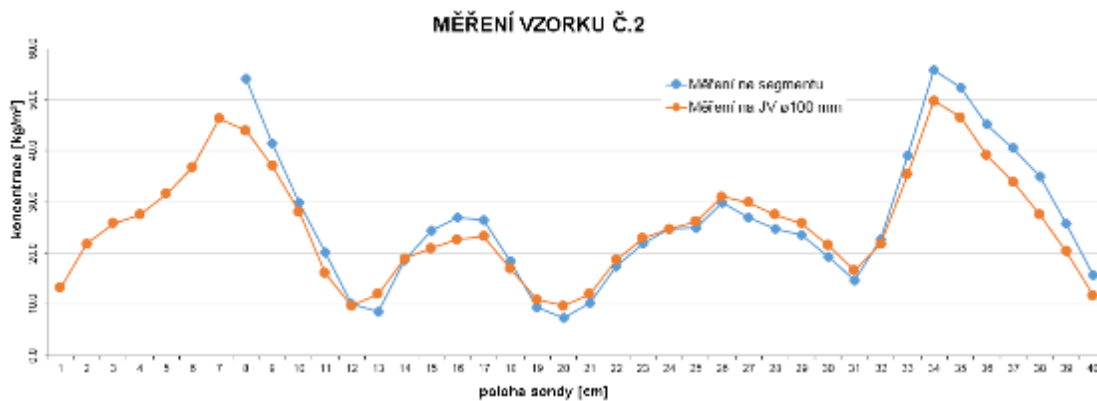


Obr. 54. Odebrané jádrové vývrtky ze segmentu ostění připravené k rozřezání [85]

Přímo na segmentu byly vyvrtány tři otvory $\varnothing 25$ mm a jednotlivé vzorky byly proměřeny tak, že magnetická sonda byla posunována po „kroku“ 10 mm po celé tloušťce lamely (Obr. 53).

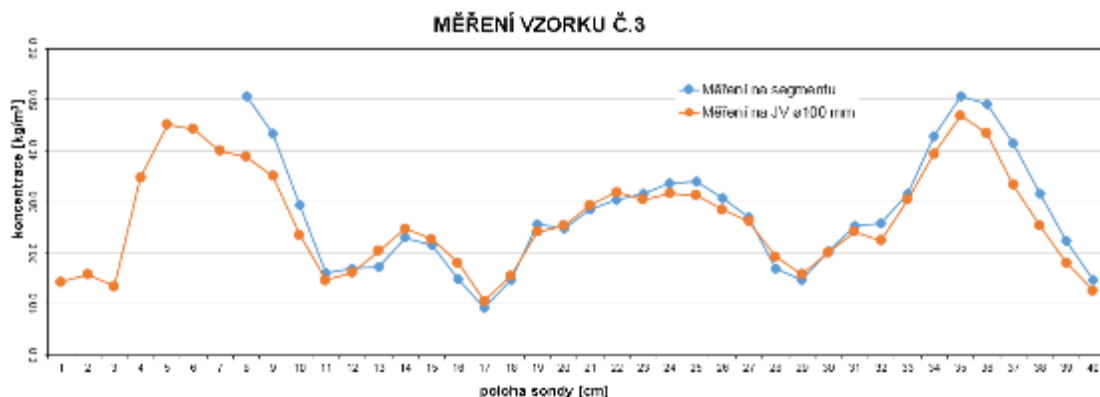


Graf 13. Výsledek měření koncentrace po výšce vzorku č. 1 [85]



Graf 14. Výsledek měření koncentrace po výšce vzorku č. 2 [85]

Po provedeném měření na segmentu byly odebrány centrické jádrové vývrty $\varnothing$ 100 mm a znovu změřeny v laboratoři ÚSZK. Jednotlivá měření po délce vývrty byla přepočítána na koncentraci v $[\text{kg}/\text{m}^3]$ a výsledky byly vyneseny do grafů (Graf 13 až Graf 15).



Graf 15. Výsledek měření koncentrace po výšce vzorku č. 3 [85]

Zhodnocení

Potvrdilo se, že odebrání velkého jádrového vzorku z konstrukce má jen nepatrný vliv na měření koncentrace drátků ve vývrty $\varnothing$ 25 mm (Graf 13 až Graf 15).

Výsledky měření ukazují na částečné nerovnoměrné rozložení drátků v objemu (Graf 13 až Graf 15). Je zřejmé, že na homogenitu drátkobetonu v konstrukci má vliv způsob technologie výroby konstrukce (tvar prvku, místo plnění formy, způsob a intenzita hutnění čerstvého betonu v bedněním prvku).

Podle publikace „*Ražba traťových tunelů pražského metra technologií TBM*“ bylo při zkoušení dílů tunelového zdokumentován poznatek, že nejvyšší a nejnižší únosnosti bylo dosaženo na vzorcích vyztužených drátkem s dávkou $50 \text{ kg}/\text{m}^3$, zatímco vzorky vyztužené $40 \text{ kg}/\text{m}^3$ vykazují podobnou únosnost. Hodnoty byly získány vždy jen na dvou vzorcích, nelze je proto považovat za statisticky průkazné. Přesto se nabízí vysvětlení, že beton s množstvím $50 \text{ kg}/\text{m}^3$ drátků je již obtížněji mísitelný a lze tedy obtížněji zajistit rovnoměrné rozptýlení drátků, proto dochází k většímu rozptylu v únosnosti při vyšší koncentraci drátků. V případě realizovaných zkoušek byl zřejmě testován jeden segment s velmi vhodným a druhý s velmi nevhodným rozptýlením drátků. Záměrně byl použit termín vhodný místo rovnoměrný. Vysoká únosnost může být dána soustředěním drátků při dolním povrchu prvku, tedy v tažené oblasti, což může být způsobeno např. intenzivní vibrací. Nejedná se o jev příznivý, neboť únosnost při opačném směru

namáhání (tah v horní části prvku) bude úměrně snížen. Přitom segmenty tunelového ostění mohou být namáhány oběma způsoby. [42]

Podle další publikace „Zkoušení a stanovení pevnosti v tahu u drátkobetonu“ bylo při testování série čtyř vzorků drátkobetonu s dávkováním drátků 25, 50, 75 kg/m³ postulováno, že s větším množstvím drátků roste rozptyl naměřených hodnot tahových pevností. Zejména to platí pro směs s drátky 75 kg/m³. [45]

7. NUMERICKÁ ČÁST

7.1. Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků je v současné době považována za nejuniversálnější metodu pro řešení variačně formulovaných problémů fyziky, souvisejících s problematikou teorie polí. Metoda konečných prvků je dobře použitelná v celé řadě oblastí fyziky, např. v magnetismu (teorie elektrického a magnetického pole).

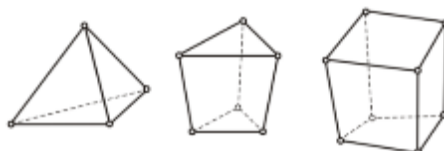
K velikým přednostem metody konečných prvků v oblasti mechaniky kontinua patří možnost řešení úlohy pro obecný geometrický tvar tělesa, obecné zatížení a uložení i pro komplikované konstitutivní vztahy materiálů. Rovněž snadné řešení materiálově nehomogenních problémů (ve srovnání s metodou hraničních prvků).

7.2. ANSYS

Software ANSYS patří ke špičkovým inženýrským systémům využívajících metodu konečných prvků. Jedná se o obecně nelineární program, který zahrnuje různé typy fyzikálních analýz. Všechny analýzy lze přitom, díky multifyzikálnímu pojetí programu, sloučit do jediné komplexní analýzy. Výpočtové modely jsou parametrické, což jednoduše umožňuje řešit i citlivostní a optimalizační analýzy.

Uživatel si musí být vědom, že výpočet je simulace. Správnost řešení se odvíjí jednak od schopnosti správně převést konkrétní problém ze skutečného světa do matematického modelu, tak i od správného nastavení podmínek pro vlastní matematické řešení, které je spojeno především s kvalitou sítě.

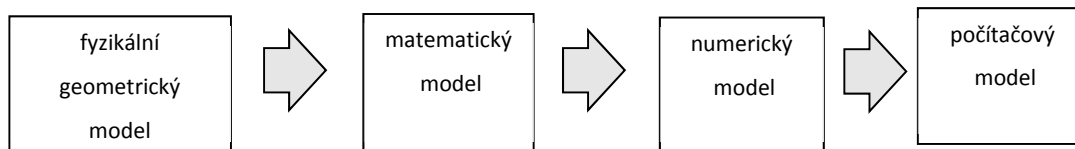
V pozadí modelu je při výpočtu sítě konečných prvků. Na rozdíl od jiných výpočtových softwarů známých ze stavební praxe, používá ANSYS množství různých druhů konečných prvků, které by měly co nejlépe postihnout skutečné chování modelovaných konstrukcí. U 3D objemových těles je síť tvořena objemovými prvky, kvadratickými tetraedry nebo hexaedry (Obr. 55).



Obr. 55. Uzly na síti konečných prvků a prostorové prvky

7.3. Numerický model

Numerický model zahrnuje síť konečných prvků vhodně zvolenou pro zadanou geometrii problému a soustavu rovnic pro hledanou veličinu v uzlech sítě, kterou je aproximováno přesné řešení.

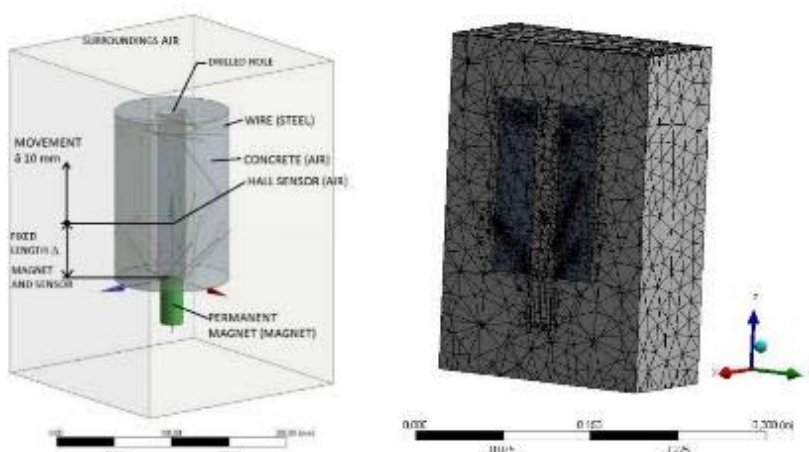


Model se skládá z částí, kterým se říká entity. Jedná se o geometrické body, křivky, plochy, objemy, konečné prvky a uzly konečných prvků.

7.4. Geometrický a fyzikální model

Geometrický model a jeho uspořádání je patrné z Obr. 56 (vlevo). Materiálové charakteristiky magnetu byly stanoveny pro neodymový permanentní magnet odpovídající magnetizaci N42. Pro stanovení přesných hodnot je možné magnety laboratorně změřit a testovat, např. „Akreditovaná laboratoř permanentních magnetů v Brně“.

Poloha magnetu a Hallova senzoru je v ose „Z“ parametrizována a hodnota parametru se mění v kroku po 10 mm s tím, že vzájemná poloha magnetu a Hallova senzoru je fixní. Na obrázku vlevo (Obr. 56) je magnet v poloze $\Delta = -40$ mm, kdy je jeho horní hrana zarovnána se spodní hranou vzorku. Pro každé posunutí se pro sestavu generuje nová síť konečných prvků a příklad je vždy nově spočten. Konečně prvková síť je patrná na obrázku vpravo (Obr. 56).

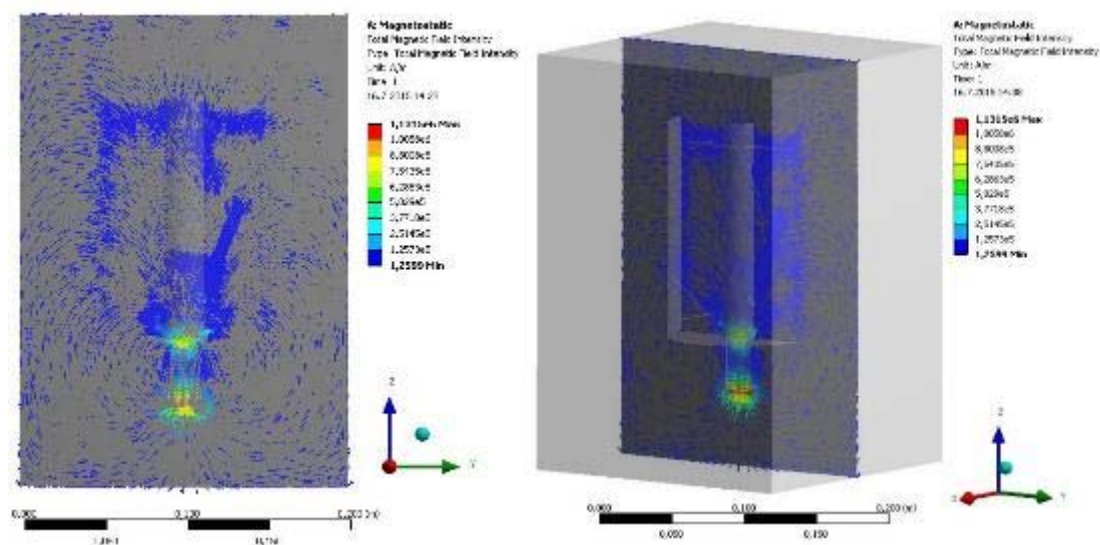


Obr. 56. Geometrický model (vlevo) a vygenerovaná síť konečných prvků (vpravo) [86]

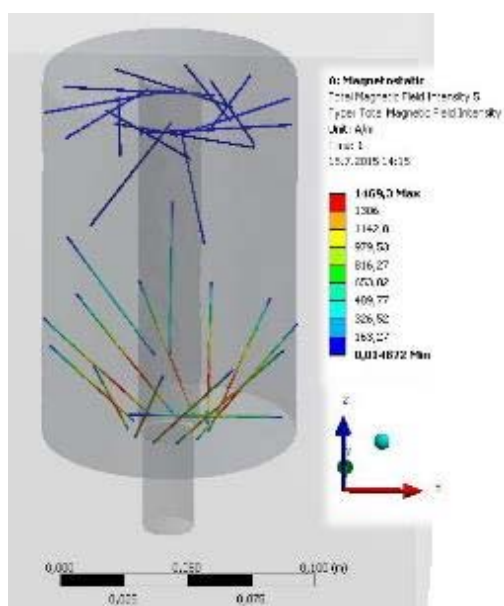
Pro simulaci Hallova senzoru byl vytvořen samostatný prvek o tvaru krychle s materiálovými vlastnostmi vzduch a hodnoty na tomto prvku jsou průměrovány, což umožňuje simulovat měření sondou v daném místě.

7.5. Výsledky

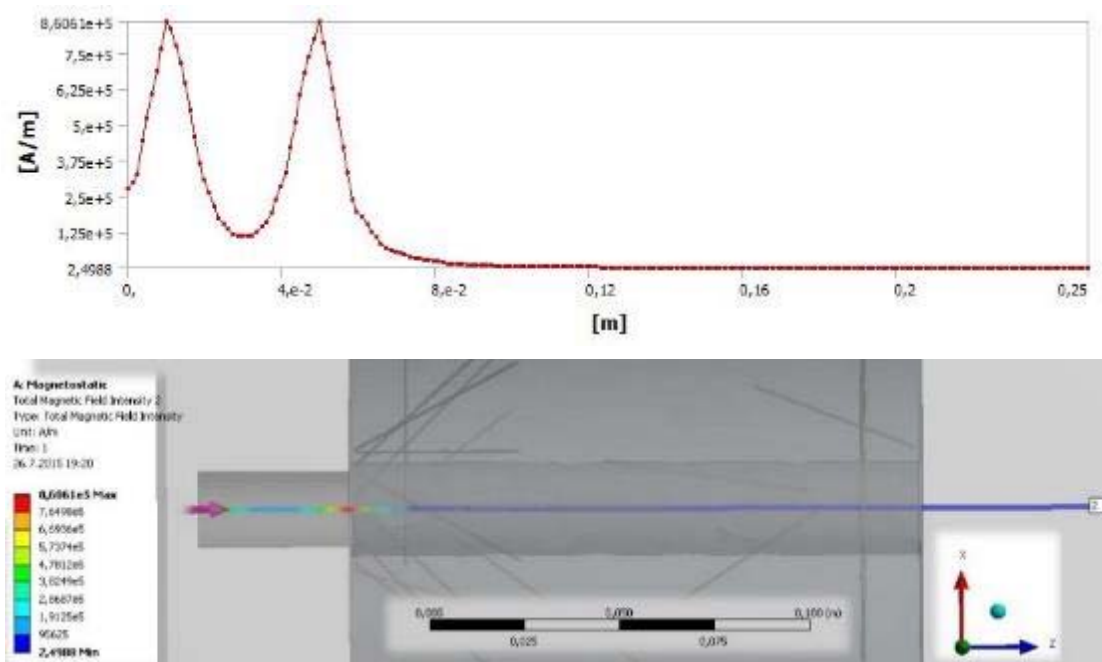
Následující obrázky (Obr. 57 až Obr. 59) ukazují možnosti vizualizace vypočtených výsledků pro jednotlivé kroky průchodu měřící soustavy drátkobetonovým vzorkem.



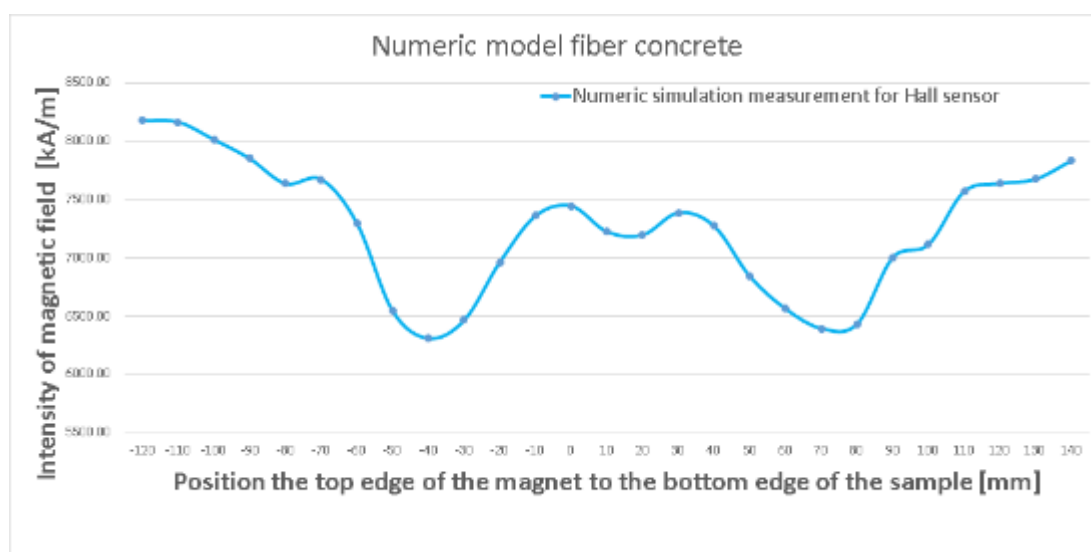
Obr. 57. Výsledky numerické simulace a zobrazení intenzity magnetického pole [86]



Obr. 58. Zobrazení intenzity magnetického pole na jednotlivých drátcích pro danou polohu magnetu [86]



Obr. 59. Zobrazení intenzity magnetického pole v ose Z pro danou polohu magnetu [86]



Graf 16. Závislosti intenzity magnetického pole na poloze měřicí soustavy vůči vzorku při průchodu soustavy vzorkem – výstup ANSYS [86]

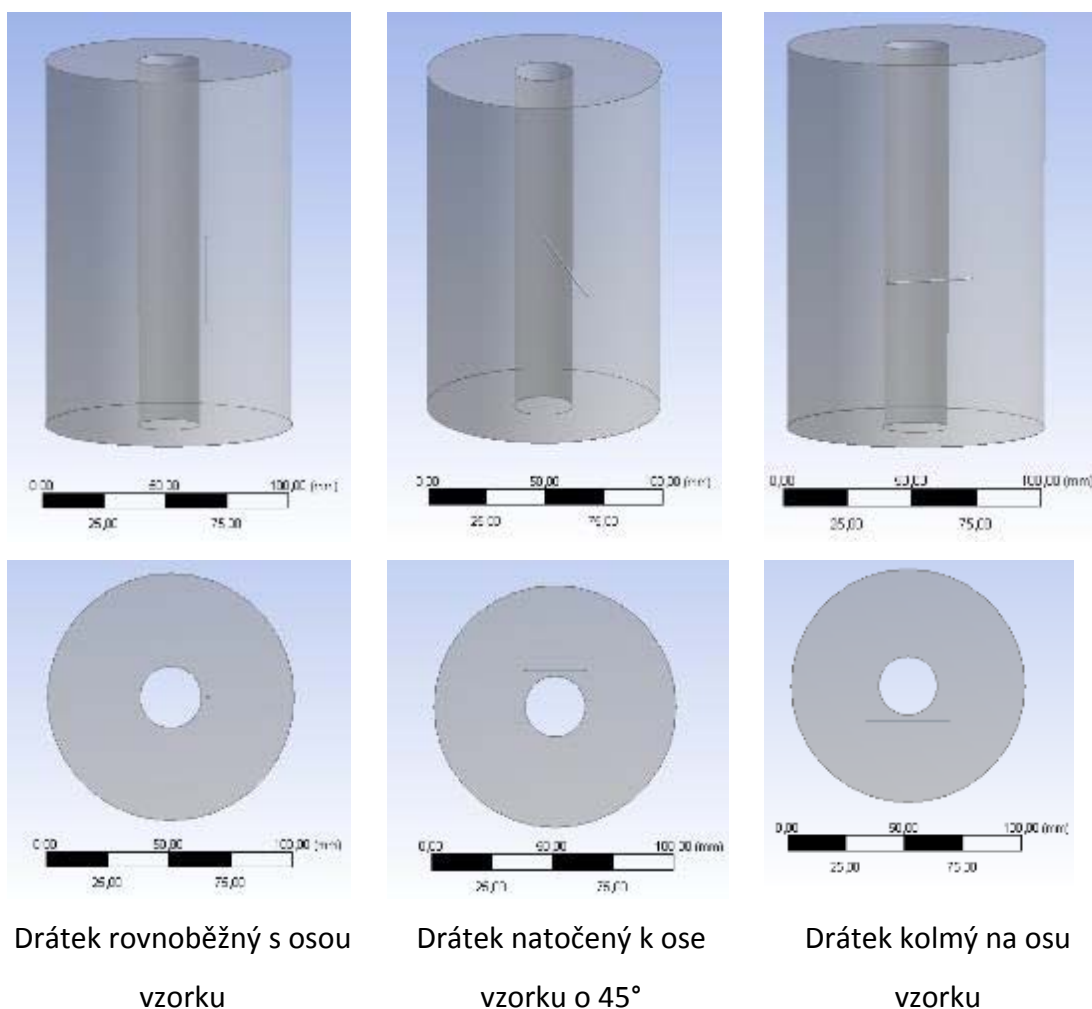
Z grafu (Graf 16) je patrná dobrá citlivost měřicí soustavy na přítomné drátky ve vzorku a tvar křivky získané pomocí numerické simulace nedestruktivního testování drátkobetonu je obdobný, jako byly tvary křivek získané experimentální metodou měření vzorků drátkobetonu.

7.6. Analýza citlivosti podle vzdálenosti a orientace drátku na měření

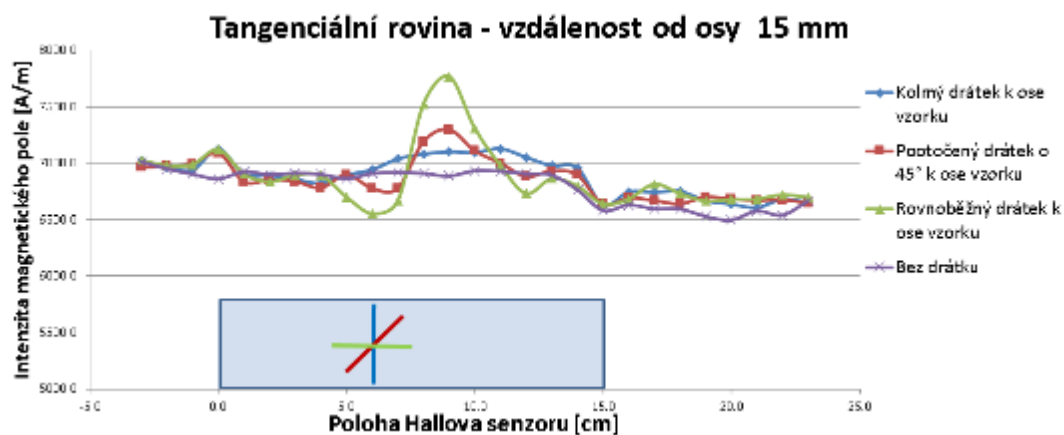
Po ověření funkčnosti modelu byly provedeny výpočty pro základní analýzy citlivosti. Parametry modelu jsou zachovány (válec o průměru 100 mm, výšce 150 mm, opatřený vývrtem průměru 25 mm). Měření je zahájeno s polohou Hallovovy sondy v pozici – 30 mm od spodního okraje válce, kdy soustava s fixovanou vzdáleností Hallovovy sondy a magnetu prochází po kroku 10 mm vzorkem směrem vzhůru až do hodnoty + 230 mm. Velikost drátku pro analýzu byla zvolena v délce 35 mm a průměru 1 mm. V analýzách se mění pozice, orientace a případně počet drátků.

První analýzou byl sledován vliv vzdálenosti a orientace drátku na měření. Orientace drátku se mění v tangenciální rovině vůči ose vzorku a drátek mění natočení (rovnoběžně 0° , šikmo 45° , kolmo 90°) ve svém těžišti (Obr. 60). Těžiště je ve výšce 60 mm od spodního okraje vzorku.

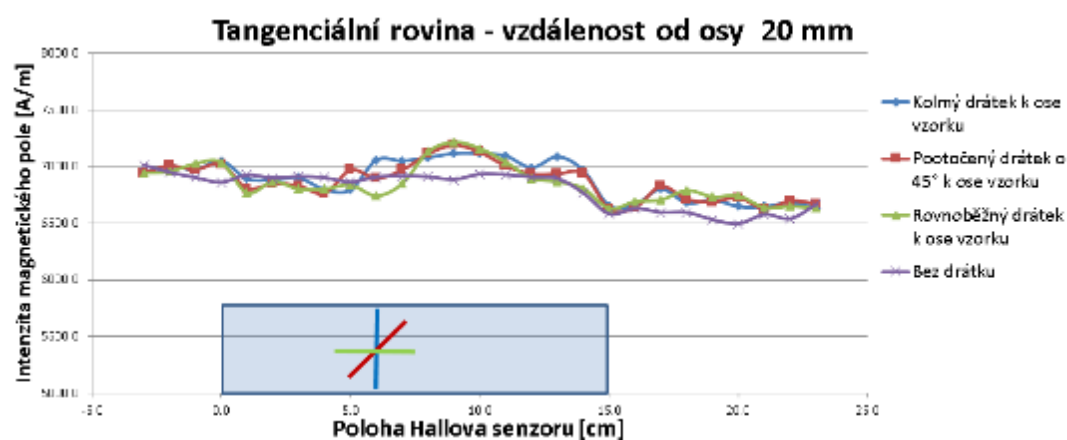
Tangenciální rovina se od osy vzorku vzdaluje a vzdálenost nabývá hodnot 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm a 40 mm (Graf 17 až Graf 21).



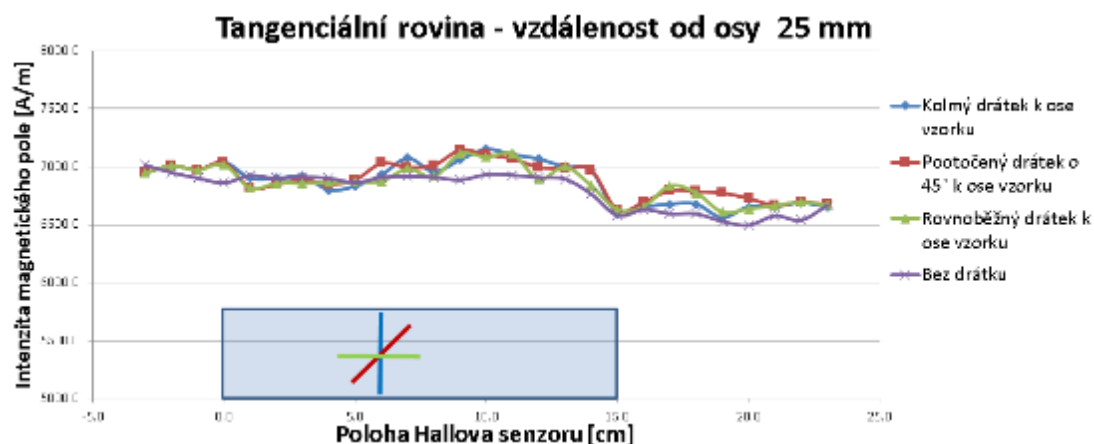
Obr. 60. Drátek s různou orientací v tangenciální rovině



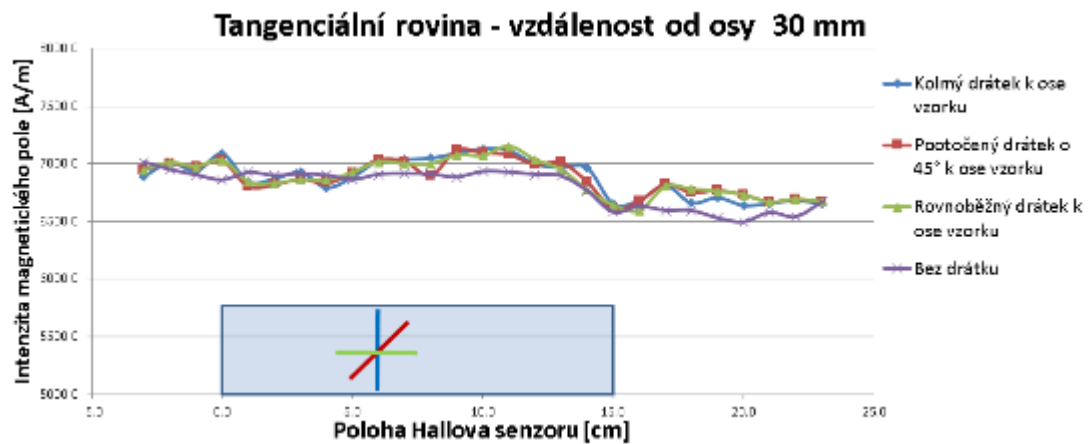
Graf 17. Tangenciální rovina ve vzdálenosti 15 mm od osy vzorku



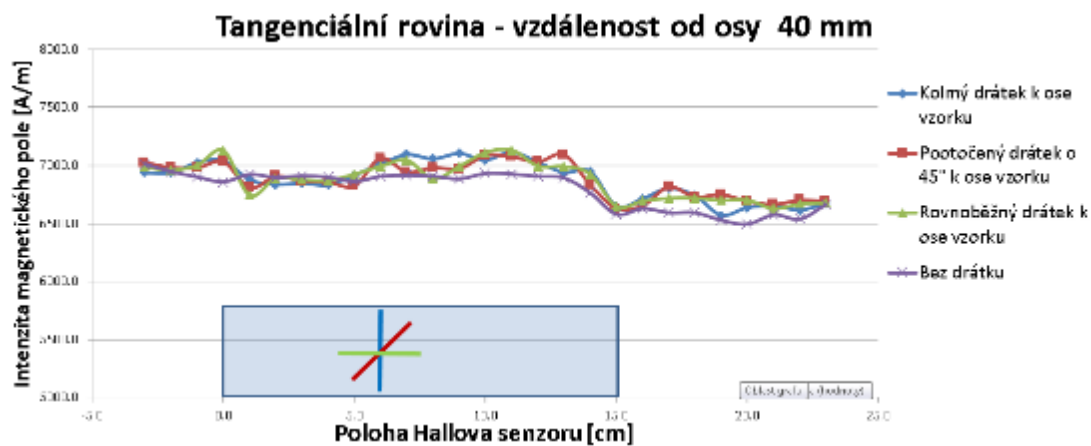
Graf 18. Tangenciální rovina ve vzdálenosti 20 mm od osy vzorku



Graf 19. Tangenciální rovina ve vzdálenosti 25 mm od osy vzorku

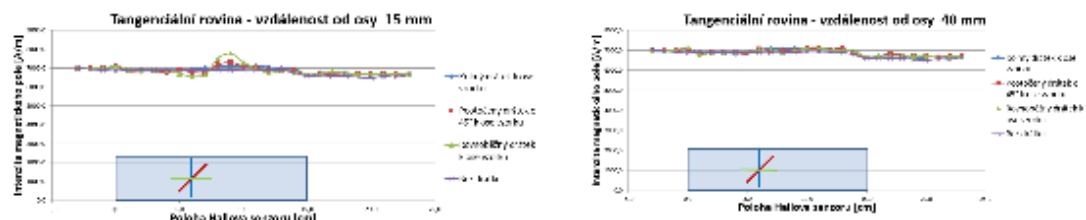


Graf 20. Tangenciální rovina ve vzdálenosti 30 mm od osy vzorku



Graf 21. Tangenciální rovina ve vzdálenosti 40 mm od osy vzorku

Z analýzy je patrné, že největší odezvu mají drátky ve vzdálenosti 15 mm a se vzrůstající vzdálenosti odezva klesá. Z hlediska orientace má největší odezvu drátek ve svislé poloze, menší odezvu má drátek šikmý a nejméně reaguje drátek vodorovný. Z výsledků je také patrné, že orientace drátku má nejpodstatnější vliv do vzdálenosti 25 mm.

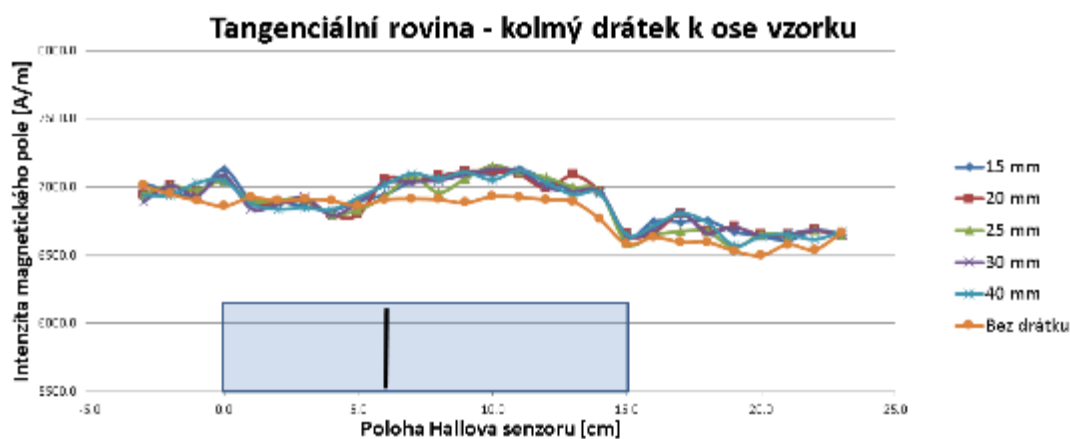


Graf 22. Porovnání odezvy drátků v tangenciální rovině ve vzdálenosti 15 mm a 40 mm

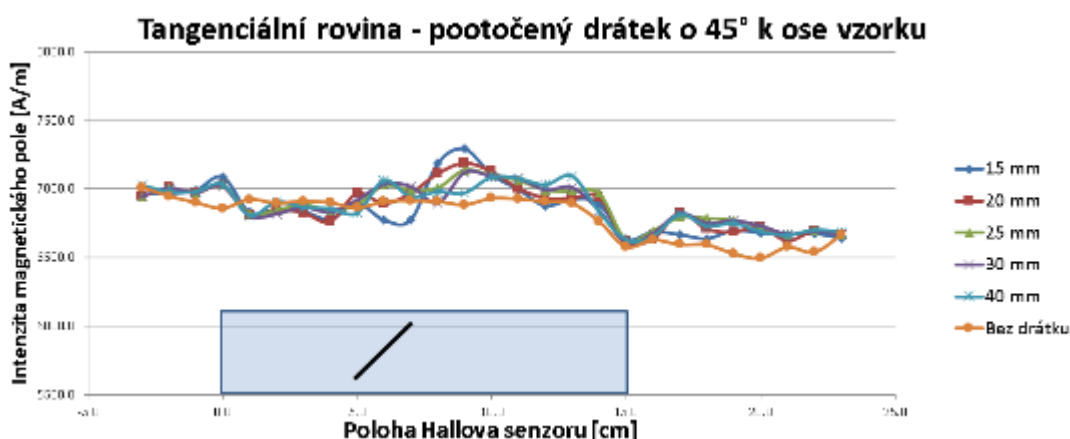
Pokud porovnáme křivky pro drátky ve vzdálenosti 15 mm a 40 mm, tak je patrné, že vliv drátku ve vzdálenosti 40 mm je už malý (Graf 22) a patrný jen při větším měřítku grafu (Graf 21).

7.7. Analýza vlivu vzdálenosti drátků na měření

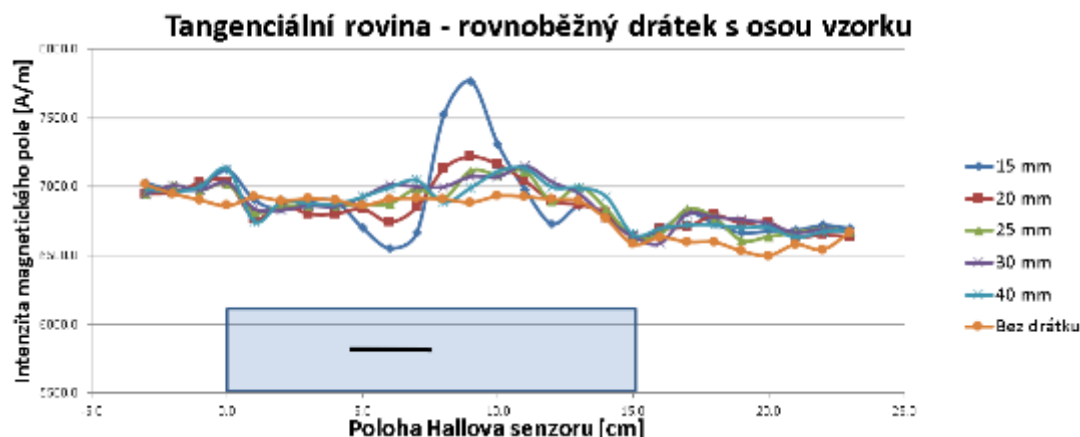
Pokud porovnáme stejně orientované drátky, pouze podle vzdálenosti tangenciální roviny od osy vzorku je patrné, že vzdálenost kolmého drátku má na odezvu minimální vliv až do vzdálenosti 40 mm. U rovnoběžného drátku je odezva výrazná ve vzdálenosti 15 mm a se vzrůstající vzdáleností klesá. Šikmý drátek má obdobnou odezvu jako rovnoběžný drátek, jen je tato odezva menší.



Graf 23. Porovnání vlivu vzdálenosti pro drátek v tangenciální rovině kolmý k ose vzorku

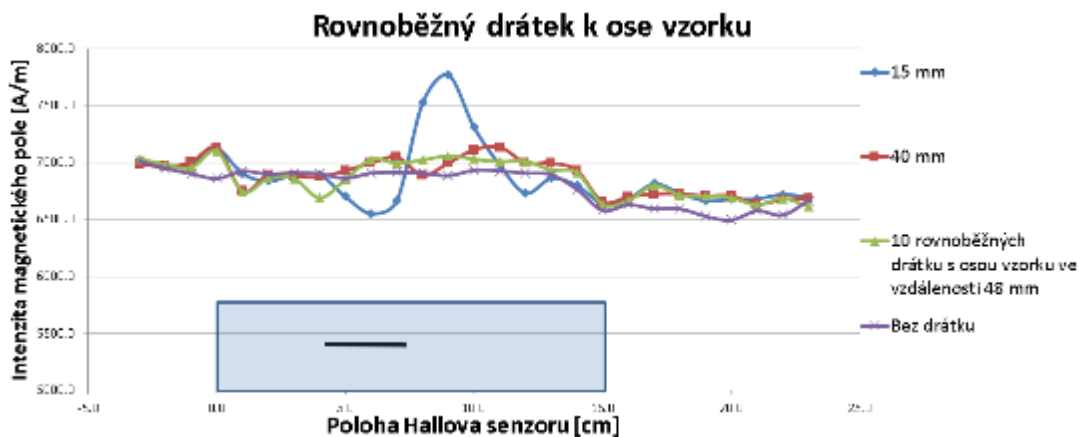


Graf 24. Porovnání vlivu vzdálenosti pro drátek v tangenciální rovině pootočený o 45° k ose vzorku

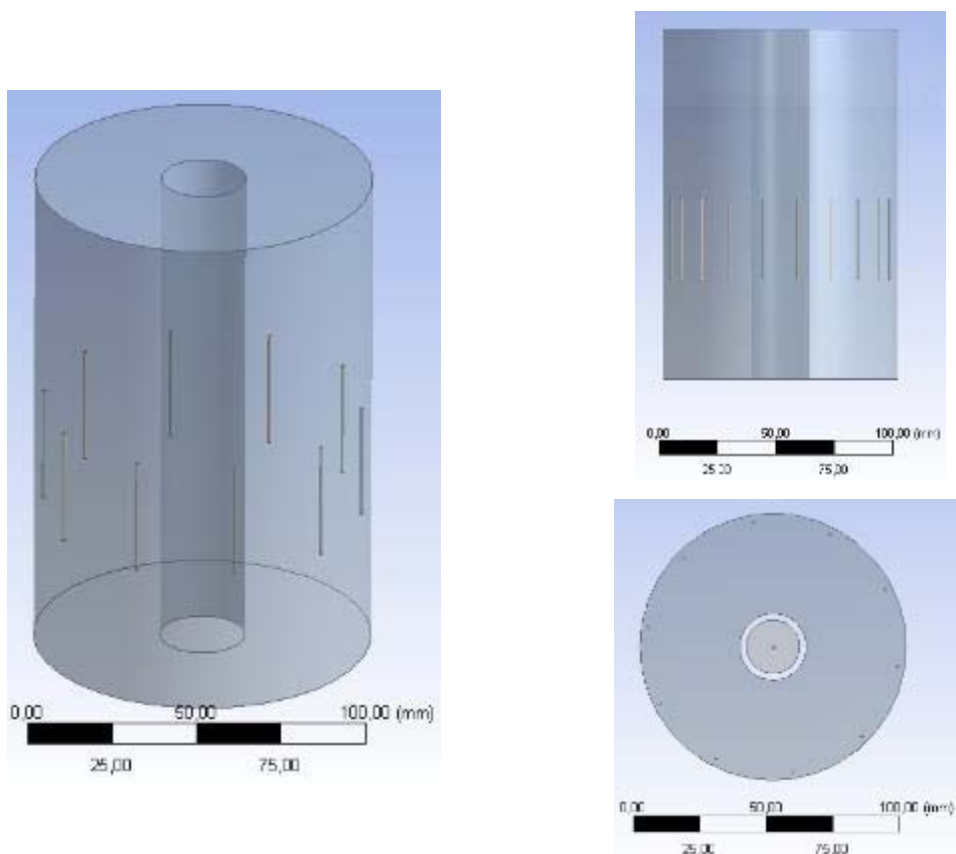


Graf 25. Porovnání vlivu vzdálenosti pro drátek v tangenciální rovině rovnoběžný s osou vzorku

Pro podpoření závěru vlivu vzdálenosti byla provedena doplňující simulace se skupinou 10 rovnoběžných drátků s osou vzorku ve vzdálenosti 48 mm od osy s těžištěm v kolmé rovině, kdy tato rovina je ve výšce 60 mm od spodní hrany vzorku. Z výsledku je patrné, že 10 drátků ve vzdálenosti 48 mm má menší odezvu než jeden drátek ve vzdálenosti 40 mm. Křivka pro 10 drátků je svým tvarem „roztáhlá“ s obdobnými charakteristikami, jaké mají křivky pro jednotlivé drátky.

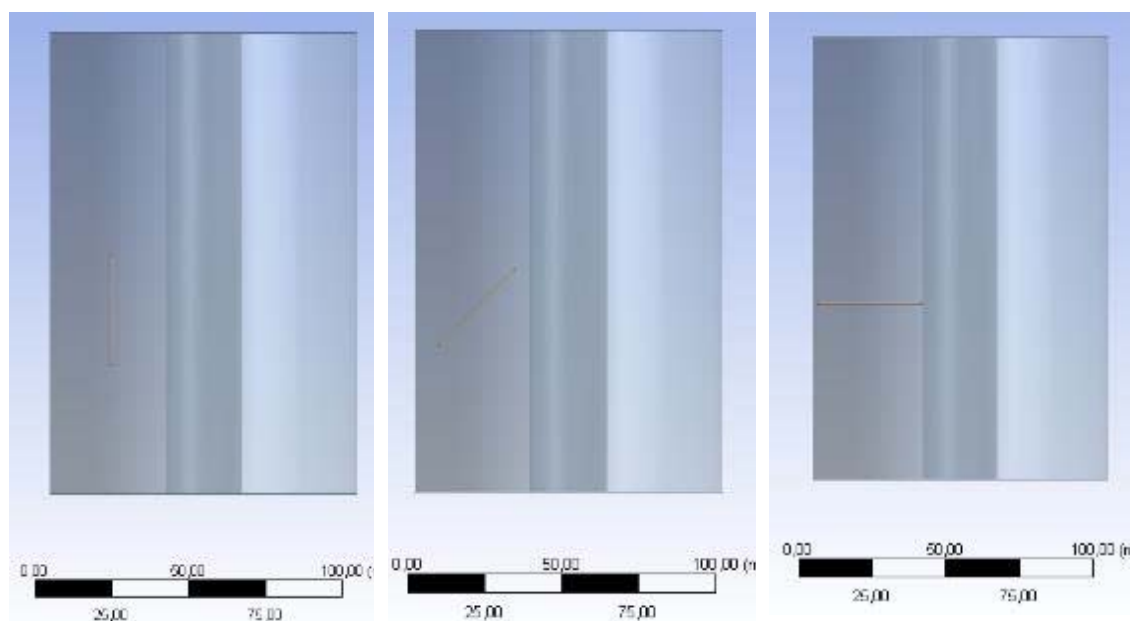


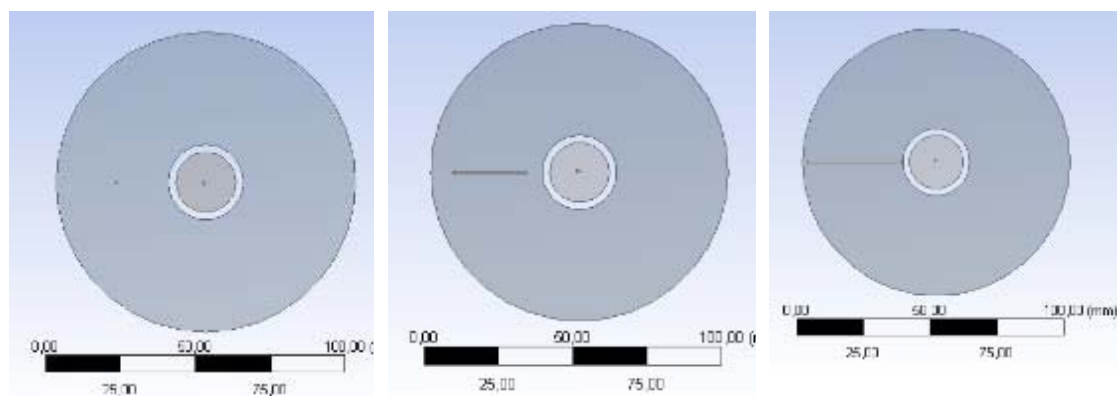
Graf 26. Skupina 10 drátků ve vzdálenosti 48 mm od osy vzorku vs. jednotlivé drátky



Obr. 61. Skupina 10 drtků ve vzdálenosti 48 mm od osy vzorku

Další analýzou bylo sledován vliv orientace drátku na odezvu v radiální rovině, tedy rovině směřující k ose vzorku. Drátek má těžiště ve vzdálenosti 30 mm od osy vzorku a 60 mm od spodní hrany vzorku. Natočení se mění v radiální rovině (rovnoběžně 0°, šikmo 45°, kolmo 90°) podle obrázku (Obr. 62).



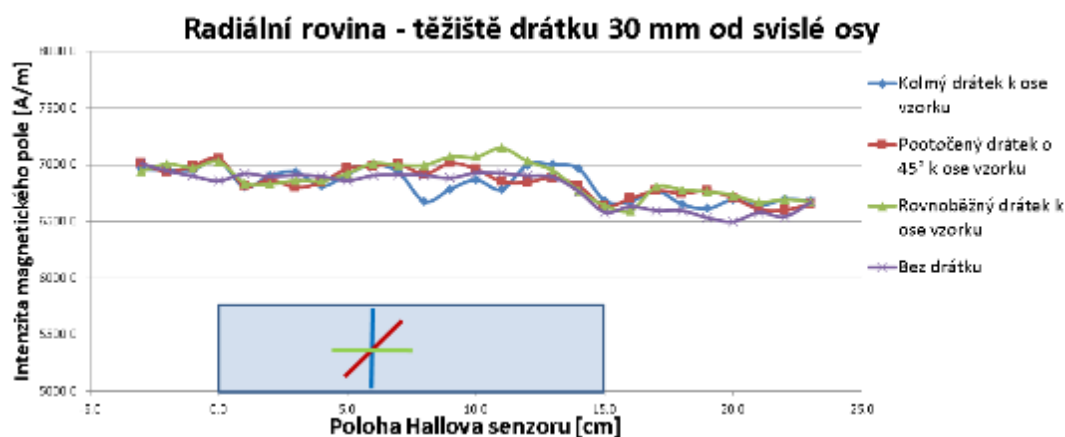


Drátek rovnoběžný s osou
vzorku

Drátek natočený k ose
vzorku o 45°

Drátek kolmý na osu
vzorku

Obr. 62. Drátek s různou orientací v radiální rovině

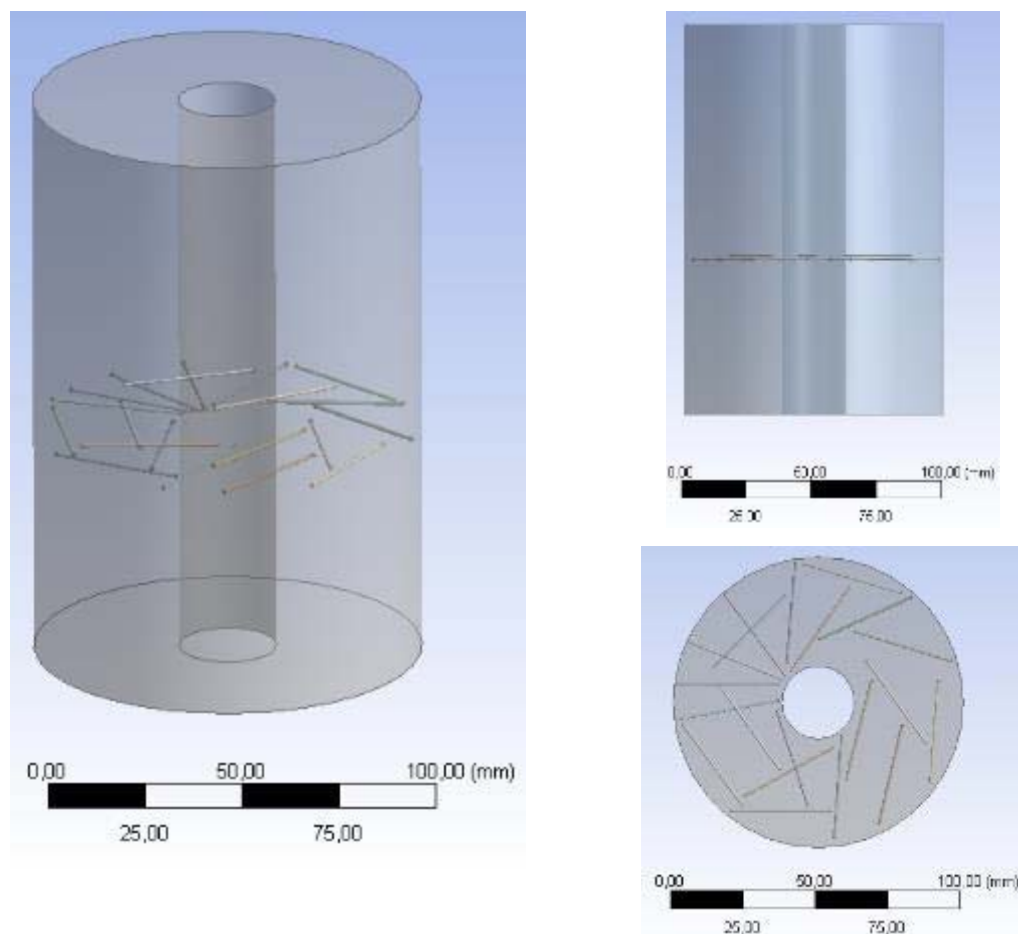


Graf 27. Radiální rovina s těžištěm drátku ve vzdálenosti 30 mm od osy vzorku

Z vynesení grafu (Graf 27) je patrné, že odezva v místě drátku je shodná bez ohledu na natočení, ovšem další odezva jde pro rovnoběžný drátek do kladných hodnot a pro kolmý do záporných hodnot vůči hodnotám bez drátku a pootočený drátek se nachází odezvou mezi těmito hodnotami.

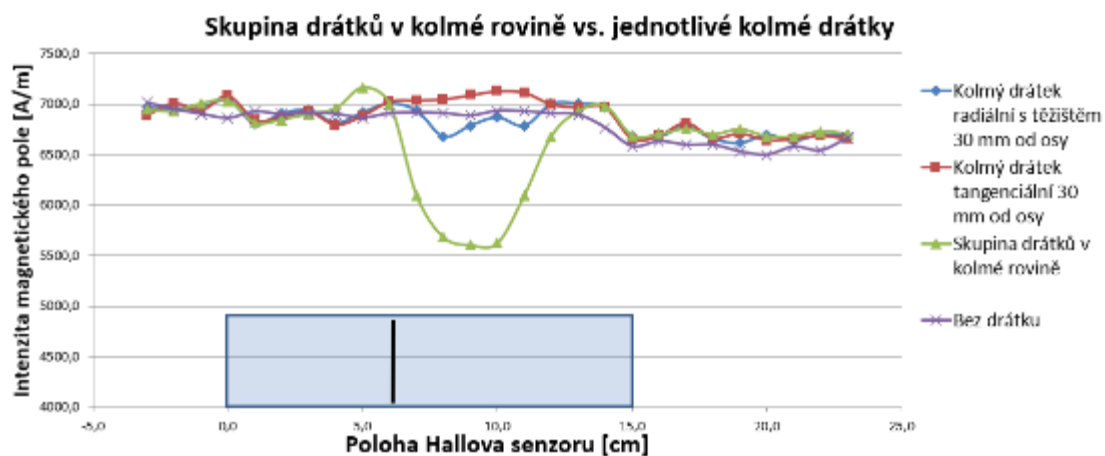
7.8. Analýza vlivu orientace skupiny drátků na měření

Následující analýza byla provedena pro skupinu 20 kolmých drátků v jedné rovině, drátky jsou v rovině nahodile rozmístěny (Obr. 63) a výsledek je porovnán s jednotlivými kolmými drátky v radiální i tangenciální rovině (Graf 28).



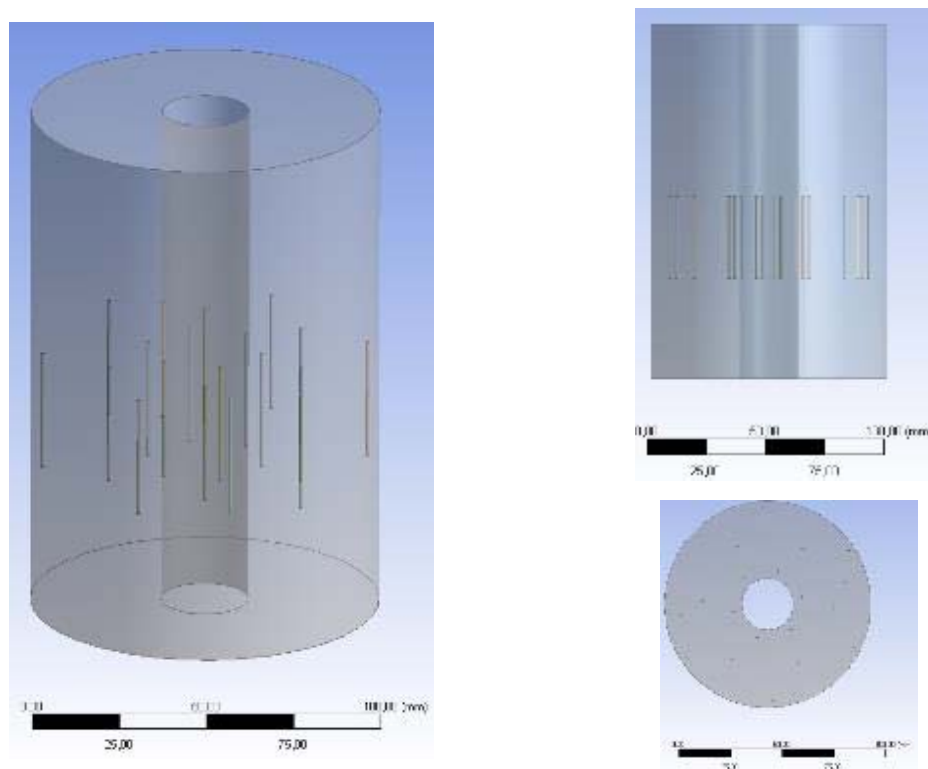
Obr. 63. Skupina náhodných drátků kolmých k ose vzorku

Podobnou odezvu jako skupina drátků má drátek radiální jen výrazně slabší, kdežto tangenciální drátek má odezvu opačnou, což by odpovídalo závěru, že skupina náhodně rozložených kolmých drátků má odezvu jako skupina radiálních drátků.

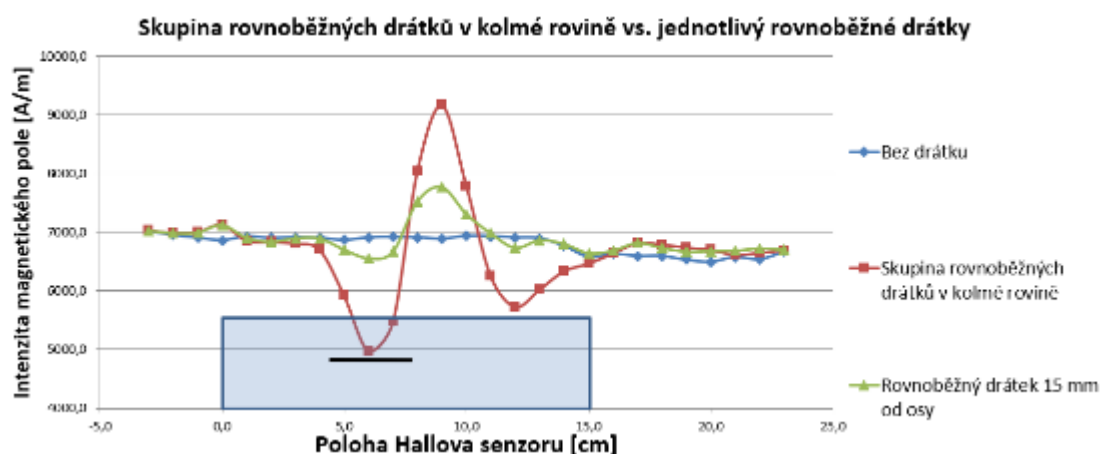


Graf 28. Porovnání skupiny drátků v jedné rovině kolmé k ose vzorku s jedním drátkem

Pro další analýzu bylo použita skupina 20 rovnoběžných drátků v jedné rovině, drátky jsou v rovině nahodile rozmístěny (Obr. 63) a výsledek je porovnán s jedním rovnoběžným drátkem (Graf 28).



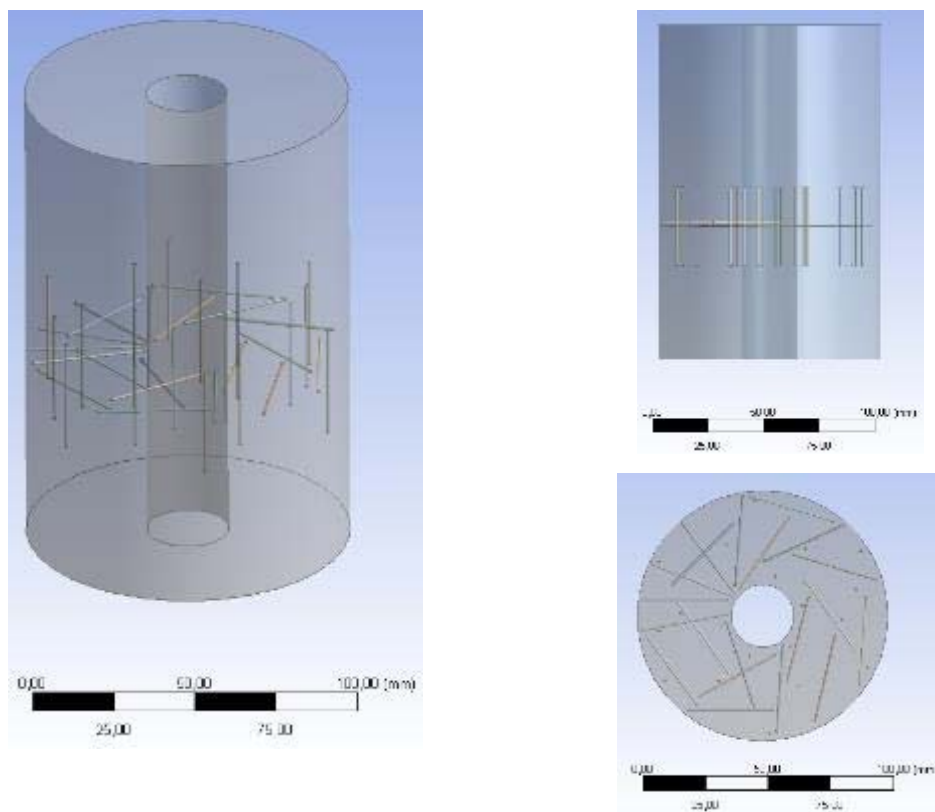
Obr. 64. Skupina drátů rovnoběžných s osou vzorku



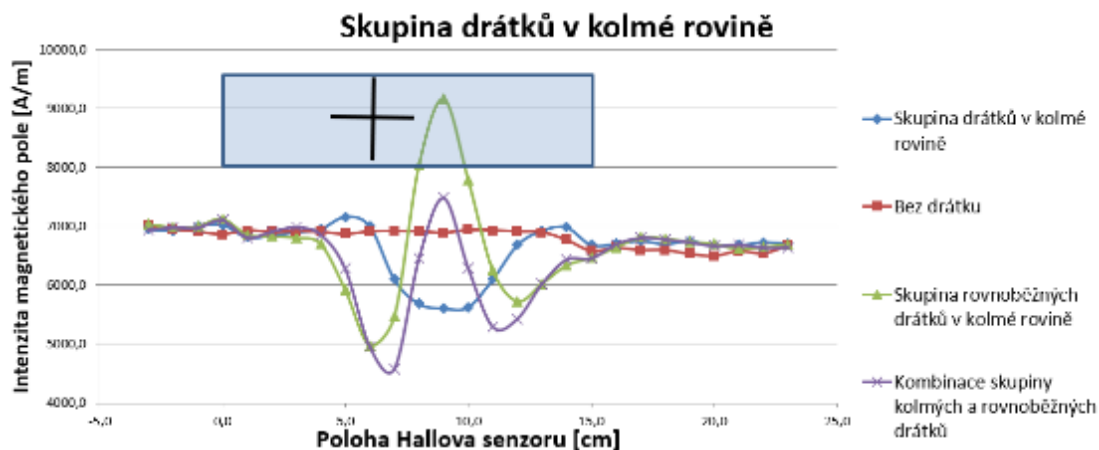
Graf 29. Porovnání skupiny rovnoběžných drátů s osou vzorku s jedním drátkem

Z výsledku analýzy skupiny rovnoběžných drátů je patrné, že mají stejnou odezvu jako jeden drátek s pouze výraznější amplitudou odezvy.

Poslední simulace byla provedena pro superpozici skupiny kolmých drátů k ose vzorku a skupiny rovnoběžných drátů k ose vzorku.



Obr. 65. Kombinace skupiny kolmých a skupiny rovnoběžných drátků s osou vzorku



Graf 30. Srovnání skupin kolmých a rovnoběžných drátku k ose vzorku s jejich vzájemnou kombinací

Porovnáním odezvy kombinace skupin s individuálními skupinami je zřejmý dominantní vliv rovnoběžných drátků na kombinovanou skupinu, kdy křivka odezvy má obdobný tvar jako pro skupinu rovnoběžných drátku jen s menší kladnou amplitudou, a naopak větší zápornou amplitudou. Závěrem této simulace je, že podle velikosti amplitudy a jejího tvaru by bylo možné z křivky získané měřením na vzorku, hodnotit na případný převládající směr orientace drátků ve vzorku.

7.9. Závěrečné zhodnocení numerických simulací

Numerické simulace měly za úkol ověřit potenciál numerického modelování, možnosti práce s výstupy a řádovou srovnatelnost s experimentálním měřením. Další výhodou numerického modelování je schopnost jednoduše kvantifikovat vliv vzdálenosti kontrolované oblasti na měřenou veličinu, což je pro tento typ úlohy při zachování vzorku experimentálně obtížně zjistitelné.

Zajímavý je poznatek, kdy podle tvaru křivky získané měřením na vzorku, by bylo možné usuzovat i na případný převládající směr orientace drátků ve vzorku. Tímto výsledkem bude nutné se ještě podrobněji zabývat a detailněji ho analyzovat.

Další jev, který bude možné pomoci numerických simulací podrobněji studovat, je případ, kdy se drátky při vyšších koncentracích vzájemně dotýkají. Drátky tím vytváří propojené struktury z hlediska možného ovlivnění magnetického pole.

7.10. Analýza STL modelu získaného z počítačové tomografie

Pro dosažení „odladěného“ numerického modelu (zvláště týkající se materiálových charakteristik oceli a permanentních magnetů), a pro získání vzájemně porovnatelných výsledků, bylo záměrem využít pro další výpočty trojrozměrný model vzorku z průmyslového tomografu. Drátky mají vysoký tvarový index, délka násobně přesahuje jeho průměr, čímž jejich popisem povrchu vznikají obsáhlé datové modely (stovky MB až GB), které mají stovky tisíc prvků (trojúhelníků) pro jeden naskenovaný vzorek z průmyslového tomografu. Vznikají extrémně náročné úlohy na výpočet, přitom se nejedná o náročnou úlohu. Nevýhodou u takto vytvořené úlohy je vysoká výpočetní náročnost, a vysoké požadavky na hardware, které jsou mimo současné možnosti běžného PC.

8. METODIKA MĚŘENÍ

Pro správný metodický postup je důležité nejprve určit typ ocelových drátků užitých ve vyšetřované konstrukci. Budou-li užity drátky běžně používané s vlastnostmi deklarovanými výrobcem, upotřebí se pro měření již vytvořená kalibrační křivka od vzorků s kontrolovanou homogenitou na průmyslovém tomografu. Pokud to budou drátky, pro které ještě kalibrační křivka není vytvořena, musí se kalibrační vzorky vytvořit, jejich homogenitu observačně ověřit pomocí průmyslového tomografu, a opatřit je vývrtem pro měření.

8.1. Kalibrační vzorky

Vytvoří se sada kalibračních vzorků o známých koncentracích s rovnoměrně rozptýlenými drátky. Sada bude vhodně zvoleným dávkováním odstupňována v koncentracích drátků (např.: 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, 1.0%), tak aby mohla být vytvořena kalibrační křivka.

Pro vytvoření kalibrační křivky jsou považovány jako minimum alespoň tři koncentrace pro daný typ drátku a z každé koncentrace mít alespoň 3 tělesa (tj. minimálně celkem 9 zkušebních vzorků). Vzorky jsou vhodné válcové odpovídající velikostí minimálně dva a půl násobku délky drátku. Opatří se uprostřed vývrtem pro měření pomocí hloubkové sondy a vzorky se proměří.

Pokud naměřené hodnoty jsou v dostatečné povolené toleranci pro splnění homogenity vzorku (např. nepřestoupí lokálně do jiné koncentrace), pak se naměřené hodnoty zprůměrují a sestaví se korelační křivka.

8.2. Korelační křivka

Měřením na vyrobených vzorcích a vynesení průměrné koncentrace od kalibračních vzorků vytvoříme novou korelační křivku pro konkrétní typ drátků. Průměrné hodnoty měření na kalibračních vzorcích se vynesou do grafu a proloží se lineární regresní přímkou $y = kx + q$, pro kterou se určí její funkce a vypočte se hodnota spolehlivosti R , která by měla nabývat hodnot větších než 0,9. Regresní koeficienty k a q vypočtené z dat výběrového souboru jsou pouze zhodnocením přesných koeficientů teoretické regresní funkce, která jednoznačně popisuje skutečnou závislost sledovaných veličin.

8.3. Metodika měření homogenity drátkobetonové konstrukce pro účely soudního inženýrství

Z hlediska metodiky měření drátkobetonu je možné k měření přistupovat dvěma přístupy, které na sebe vzájemně navazují. Prvním přístupem je zjištění homogenity drátkobetonové konstrukce, kdy se porovnávají změřená data z jednoho vývrtu s křivkou získanou na kalibračních vzorcích s ověřenou homogenitou. Pokud naměřené hodnoty jsou v dostatečné povolené toleranci pro splnění homogenity vzorku (např. nepřestoupí lokálně do jiné koncentrace), pak lze přikročit ke druhému přístupu, kterým je stanovení koncentrace drátků v drátkobetonové konstrukci.

8.4. Metodika měření koncentrace drátků v drátkobetonové konstrukci pro účely soudního inženýrství

Nejprve je tedy zjištěna homogenita drátkobetonové konstrukce a pokud je splněna homogenita vzorku, pak lze přikročit ke druhému přístupu, kterým je stanovení koncentrace pro dané měřené místo a to tak, že v daném místě se hodnoty zprůměrují a stanoví se zde koncentrace pomocí korelačního vztahu. Pro stanovení homogenity prvku nebo předmětné části konstrukce se provedou minimálně tři vývrtu, u kterých se takto stanoví koncentrace. Pokud jejich jednotlivé koncentrace drátku nepřestoupí do jiné skupiny, potom je průměrem koncentrací z jednotlivých vývrtů možné stanovit koncentraci prvku nebo předmětné části konstrukce a prohlásit jí za homogenní.

8.5. Náležitosti protokolu

Účelem protokolu je zaznamenat měřené hodnoty do připravené tabulky a vyhodnocení měření je už věcí posudku samotného.

Protokol musí obsahovat:

- kdo měření provedl, adresa
- kdo a kdy měření vyžádal a za jakým účelem
- naměřené hodnoty v tabulce s označením sondy
- přílohy (např. korelační křivka, zakreslení polohy provedených sond do výkresové dokumentace, certifikát pro způsobilost k NDT měření)
- počet listů
- fotodokumentace

- datum a místo vypracování

8.6. Náležitosti posudku

Náležitosti znaleckého posudku podávaného v souvislosti s právním úkonem jsou upraveny vyhláškou č. 37/1967 Sb. a je vyžadováno jejich striktní dodržování. Skladbu znaleckého posudku je vhodné použít i pro odborný posudek v rámci expertní činnosti pro hodnocení homogenity drátkobetonu. Pro experimentální hodnocení stavebního stavu drátkobetonové konstrukce se může použít následující schéma odborného posudku:

Titulní strana:

- kdo posudek vypracoval, adresa
- postavení vzhledem k zadání posudku
- kdo a kdy posudek vyžádal a za jakým účelem
- zvláštní požadavky objednatele
- počet listů, příloh, a počet vyhotovení posudku
- datum a místo vypracování

1. Úvod

- 1.1 Předmět hodnocení – specifikuje se název vyšetřované konstrukce v souladu s dokumentací, příp. v souladu s vyšetřovacím spisem,
- 1.2 Lokalizace objektu – specifikuje se poloha objektu ve vztahu k okolí, kde se konstrukce nachází,
- 1.3 Vymezení úkolu – zopakují se otázky, na které má zpracovatel odpovědět.

2. Nález

- 2.1 Podklady – přehledně se vyjmenují všechny podklady použité pro hodnocení a datum jejich vyhotovení,
- 2.2 Stručný popis konstrukce – konstrukce se technicky popíše, a to včetně detailů, které jsou předmětem hodnocení,
- 2.3 Skutečnosti zjištěné při místním šetření na objektu – všechny nalezené skutečnosti, které mají přímou souvislost s předmětem hodnocení a metodicky se popíše postup zkoušky,

2.4 Skutečnosti vyplývající z podkladů – analyzují se jednotlivé podklady, odcitují se rozhodující údaje pro hodnocení.

3. Posudek

3.1 Poškození, přetížení, degradace a přetvoření zjištěná prohlídkou – analýza všech zjištěných poruch, vad a poškození (stáří, vývoj, možné příčiny),

3.2 Vyhodnocení změn stavebního stavu konstrukce za sledované období – analyzují se všechny zjištěné změny stavebního stavu,

3.3 Vyhodnocení změn v konstrukci a ve způsobu užívání za sledované období – vliv poruch na stavební stav konstrukce,

3.4 Možné procesy degradace – popíše se předpokládaný průběh degradace, pokud nedojde ke stavebnímu zásahu (rekonstrukci).

4. Závěr

4.1 Zhodnocení stavebního stavu posuzované konstrukce – vyhodnotí se stavební stav konstrukce a uvede se výčet možných variant opatření,

4.2 Vyjádření k položeným otázkám – zpracovatel souhrnně stručně odpoví na položené otázky.

Přílohy:

- fotodokumentace
- výkresová dokumentace
- protokoly z měření

8.7. Kvalifikace personálu

Kvalifikace pracovníka způsobilého provádět hodnocení musí být podloženy teoretickými a praktickými znalostmi v činnostech, které má provádět. Požadované teoretické znalosti pracovník získává studiem na odborné škole a posléze neustálým sebevzděláváním, tj. na pravidelných školeních a seminářích. Praktické zkušenosti získá od zkušených kolegů, a především praxí v oboru. Při provádění vizuální kontroly, která je základem každého hodnocení, se postupuje v souladu s obecnými zásadami pro nedestruktivní zkoušení uvedenými v normě ČSN EN 13018 [59]. Pracovník, který

provádí kontrolu podle těchto zásad, musí prokázat, že je seznámen s příslušnými normami, směrnicemi, specifikacemi, přístroji a postupy (instrukcemi), použitými výrobními postupy a především, že má uspokojivou zrakovou schopnost v souladu s normou ČSN EN ISO 9712 [57].

Před zahájením měření na konstrukci by měl mít postup ověřeny měřením na kalibračních vzorcích, kdy výstup z měření by se měl rámcově shodovat s referenčním měřením na kalibračním vzorku. Z hlediska analýzy konstrukce by měla místa měření být vždy konzultována se statikem, který je schopen určit vhodné zájmové oblasti na konstrukci. V případě poruchy konstrukce je zájmové místo pro kontrolu homogenity koncentrace dané místem vzniklé poruchy (makroskopické trhliny).

Pro způsobilost k certifikaci musí uchazeč úspěšně složit odpovídající kvalifikační zkoušku, musí splňovat požadavky na školení, praxi v NDT, mít uspokojivé zrakové schopnosti a zdravotní způsobilost. Certifikační orgán garantuje, že certifikovaná osoba je způsobilá provádět danou specifickou činnost uvedenou v certifikátu, podle stanovených nebo uznaných postupů či prováděcích pokynů.

Kvalifikační zkouška

Kvalifikační zkouška se musí skládat z obecné a praktické části a obvykle zahrnuje zkoušenou činnost tak, jak se použije v praxi.

Platnost certifikace

Počátek doby platnosti certifikace je stanoven datem úspěšně složené kvalifikační zkoušky. Období platnosti certifikace musí být omezeno na dobu určitou, před jejímž uplynutím je nutno opětovně ověřit kvalifikační předpoklady personálu (recertifikace). Tento systém nutí personál neustále se vzdělávat, být v kontaktu s oborem a mít přístup k nejnovějším poznatkům z oboru.

Certifikovaný personál musí být schopen:

- a) rozumět pokynům a předpisům pro obsluhu použitých přístrojů a také pro samotnou zkoušku;
- b) nastavit a kalibrovat NDT přístroje a zařízení;
- c) provést předepsanou zkoušku;

- d) vyhodnotit zkoušku a stanovit výsledky zkoušky podle předepsaných pokynů nebo postupů;
- e) vypracovat protokol o provedené zkoušce.

Příkladem vhodného školení je vzdělávací kurz „Nedestruktivní metody zkoušení ve stavebnictví“ na VUT FAST při Ústavu stavebního zkušebnictví, kde osvědčení o absolvování kurzu je jednou z podmínek účasti na zkoušce pro získání personálního certifikátu „Technik NDT zkoušení ve stavebnictví“, která na tento kurz navazuje. Certifikát je akreditován ČIA, o.p.s. a zajišťuje splnění požadavků na kvalifikaci pracovníků na vizuální prohlídky a diagnostický průzkum betonových konstrukcí podle TKP MD 31. [60]

8.8. Přínos k rozvoji oboru soudní inženýrství

Podání znaleckého posudku ve věci posouzení homogenity drátkobetonové konstrukce není jednoduché. Výsledky, ke kterým znalec dospěl, musí také obhájit. Závěry učiněné pouze na základě předpokladů jsou snadno zpochybnitelné. Znalcovy výroky musí být podloženy především fakty, experimenty a praktickými příklady.

Soudní inženýři a rovněž odborná veřejnost potřebují mít metody ke kontrole homogenity drátkobetonu, jestliže jedním z nejdůležitějších faktorů pro zajištění spolehlivosti drátkobetonové konstrukce je homogenní struktura drátkobetonu. Pokud konstrukce není z homogenního drátkobetonu, dochází při zatížení k nadměrnému namáhání oslabených míst. Vznikají trhliny, které se rozvíjejí, zkracuje se životnost konstrukce, a to až do stavu poruchy či havárie.

Nižší spolehlivost konstrukce, způsobená nerovnoměrným rozptýlením drátků v objemu betonu, může znamenat nejen vážné škody na majetku, ale především ohrožení bezpečnosti a životů lidí. Tato metoda umožní účinnou kontrolu homogenity drátkobetonu pro masivní drátkobetonové konstrukce, kdy v současnosti žádná jiná podobná metoda pro masivní drátkobetonové konstrukce neexistuje. Permanentní magnetická sonda doplňuje současně vyvíjené povrchové elektromagnetické i jiné metody a pomůže při splnění podmínek v objasňování negativních technických jevů na zhotovené nosné konstrukci, jak z hledisek potřeb státních orgánů (justice, policie, orgánů státní správy apod.) tak i z hledisek privátního sektoru (podniků příp. občanů).

Navržený postup měření homogenity na hotové drátkobetonové konstrukci byl prakticky vyzkoušen a ukázal se jako užitečný v praxi. Výhoda měření spočívá v jeho opakovatelnosti a v jeho provádění in situ, kdy současné možnosti stanovení koncentrace masivních drátkobetonových konstrukcí spočívají pouze v odběru relativně velkých vzorků, které jsou vyšetřovány destruktivně a důkazní vzorky jsou nenávratně zničeny. Koncentraci lze stanovit pouze hmotnostním podílem na odebraném vzorku. Jisté možnosti se otevírají ve využití průmyslového tomografu, ovšem odběru relativně velkých vzorků, v porovnání s mikrovývrtem pro sondu, se tímto nelze vyhnout.

Odběr velkých vývrtů z nejvíce namáhaných částí konstrukce, zpravidla o průměru 100 mm, neumožní realizovat větší počet těchto vývrtů ve zvoleném místě odběru, protože by to snížilo únosnost průřezu, případně i spolehlivost celé drátkobetonové konstrukce.

Ovšem vyvinutá magnetická metoda má charakter zkoušek tzv. lokálního porušení, jádrovým vývrtem malého průměru (semidestruktivní metoda).

Na ČVUT v Praze se na stavební fakultě zabývali, jaký vliv mají vývrty malých průměrů na únosnost vláknobetonového prvku s betonářkou výztuží a publikovali na toto téma příspěvek. Únosnost trámu je vypočítána na základě oslabení tlačené oblasti průřezu trámu vývrty malých průměrů, nutných k provedení zkoušky (průměr 25 mm). Trám o délce 4 m byl oslaben uprostřed dvěma v pohledu diagonálně umístěnými vývrty, což se projevilo na snížení jeho ohybové únosnosti pouze o 2,6 - 2,7 %. [47]

Přínosem disertační práce po stránce rozvoje soudního inženýrství, jako vědního oboru, je metoda a metodika pro hodnocení homogenity drátkobetonu a koncentrace drátků na masivní drátkobetonové konstrukci prováděné in situ.

Po stránce pedagogické je potřeba zdůraznit, že personál provádějící hodnocení homogenity drátkobetonu a koncentrace drátků v konstrukci, bez ohledu na účel, musí být dostatečně vzdělán. Žádoucí bude organizovat školící semináře a motivovat soudní inženýry zabývající se NDT metodami, aby se jich účastnili. Každý seminář v rámci celoživotního vzdělávání je příležitostí pro získání nových poznatků v oblasti moderních diagnostických metod, v oblasti materiálového inženýrství a v oblasti chování konstrukce pod zatížením.

9. ZÁVĚR

9.1. Závěrečné shrnutí

V průběhu zpracování disertační práce byla shromážděna celá řada dokumentů, listinných, grafických i digitálních.

Dosavadní metody stanovení homogenity drátkobetonu jsou určeny pro testování homogenity povrchových vrstev drátkobetonu a jejich hloubkový dosah není velký. Výzkum této problematiky dosud neřešil oblast možnosti kontroly homogenity v celém objemu konstrukce na stavbách, která je v praxi důležitým hlediskem při posuzování kvality provedení konstrukce nebo při zjišťování příčin vad a poruch konstrukce. Využití magnetických vlastností drátků, obsažených v drátkobetonu se ukazuje jako perspektivní metoda. Pomocí počítačové tomografie bylo prokázáno, že je hloubková sonda schopná zjišťovat anomálie v rozložení drátků, odhalovat tak místa nehomogenit a stanovit pro měřenou oblast koncentraci drátků. Kombinace s dalšími povrchovými magnetickými metodami, zvláště pomocí elektromagnetických cívek, bude mít zpřesňující efekt na měření a bude umožněno měření rozměrných drátkobetonových konstrukcí.

Dílčí závěry lze shrnout takto:

Je zřejmé, že na homogenitu drátkobetonu v konstrukci má vliv způsob technologie výroby konstrukce (tvar prvku, místo plnění formy, způsob a intenzita hutnění čerstvého betonu v bednění prvku). Při vzniku poruchy jde zejména o potvrzení nebo vyloučení, zda za poruchou konstrukce je nehomogenní drátkobeton, přetěžovaná konstrukce nebo málo únosné podloží.

Z hlediska rychlého a operativního vyhodnocování koncentrace drátků v drátkobetonových konstrukcích se metoda, založená na měření deformace magnetického pole permanentních magnetů pomocí „hloubkové sondy“, která se umísťuje do předvrtaných mikrovývrtů v drátkobetonové konstrukci, osvědčila.

Podstatným je také zjištění, že i při zaručeném množství drátků v kalibračních vzorcích může být bezprostřední odezva jednotlivých metod ovlivněna u malých vzorků okrajovým efektem. Zvláště u vyšší koncentrace drátků.

Za stěžejní považuji jednoznačnou identifikaci nehomogenních testovacích vzorků magnetickou hloubkovou sondou a ověření výsledků pomocí přesné a průkazné průmyslové tomografie.

Potvrdil se zásadní předpoklad, že pro každý typ drátku bude muset být vytvořen vlastní korelační vztah.

Další zjištění z ověření magnetické metody do jisté míry korespondují s měřeními pro vytvoření korelačního vztahu, kdy právě vzorky pro vyšší koncentrace (0,8 % a 1,0 %) vykazovaly největší rozptyl měření.

Metoda je zatížena i určitými omezeními, vyplývajícími z fyzikální podstaty měření, kterým je např. dosah měření sondy, který nepřesahuje prokazatelně oblast o průměru 100 mm.

Závěrem numerických simulací je zajímavý poznatek, že podle velikosti amplitudy a jejího tvaru by bylo možné z křivky získané měřením na vzorku usuzovat i na případný převládající směr orientace drátků ve vzorku.

9.2. Dosažení cílů

Splnění stanovených cílů bylo nesnadné, protože bylo nutné uplatnit nové poznatky z mnoha oborů a vědních disciplín. Nové moderní materiály si vyžadují i nové přístupy pro ověřování spolehlivosti jejich vlastností, především u technologicky náročných materiálů na výrobu, jakým je drátkobeton.

Technologická nekázeň při zhotovení drátkobetonové konstrukce vede k dražším konstrukčním opatřením, jako je oprava, rekonstrukce nebo stavba nové konstrukce.

Všechny jednotlivé vytyčené body práce jsou podrobně rozebrány a dílčím závěrem je zhodnocen jejich výsledek. Na závěr práce jsou ještě dílčí závěry souhrnně analyzovány. Disertační práce splnila stanovený cíl a potvrdila, že vyvinutá metoda měření bude mít ve zjišťování homogenity a koncentrace masivních drátkobetonových konstrukcí praktické uplatnění a najde si své místo mezi nedestruktivními metodami.

9.3. Přínosy disertační práce

Předložená disertační práce přináší poznatky v těchto hlavních směrech:

Rozvíjí poznatky pro měření intenzity stacionárního magnetického pole Hallovou sondou v homogenní, respektive nehomogenní struktuře s ocelovými vlákny.

Doplňuje stávající i nové povrchové metody pro měření homogenity a koncentrace o prototyp osvědčené hloubkové sondy, určené pro měření masivních drátkobetonových konstrukcí. Současně určuje metodický postup pro určení

homogenity a koncentrace masivní drátkobetonové konstrukce, který byl ověřen v praxi na reálné konstrukci.

Pro ověření kalibračních vzorků byl realizován postup s využitím moderní počítačové tomografie, což je jedna z nejpřesnějších nedestruktivních metod současnosti, která umožnila potvrdit zjištěné nehomogenity u testovacích vzorků.

Podařilo se vyvinout numerický model pro vláknové struktury, využitelný pro nepřímé měření intenzity magnetického pole a kalibraci samotné sondy.

Výsledkem výzkumné činnosti v rámci disertační práce je vedle řady publikací, projektů i zaregistrovaný užitečný vzor pod číslem CZ 25427 U1 – Hloubková magnetická sonda na stanovení homogenity drátkobetonu.

9.4. Doporučení pro další výzkum

9.4.1. Efektivní převod obrazu z průmyslového tomografu do ANSYSU

Cílem bude převedení nasnímaného obrazu z počítačové tomografie do ANSYSU tak, aby byl možný rychlý výpočet, který umožní podrobnou analýzu měření pro sondu podle konkrétního vzorku s viditelným rozložením drátků a umožní případně vývoj dalších měřících zařízení. Nasnímaný povrch separovaných drátků z průmyslového tomografu byl jako výstup dostupný ve formátu STL.

STL soubor popisuje syrový, nestrukturovaný, triangulovaný povrch pomocí jednotkových normálových vektorů a vrcholů (uspořádaných podle pravidla pravé ruky) trojúhelníků ve trojrozměrné kartézské soustavě souřadnic.

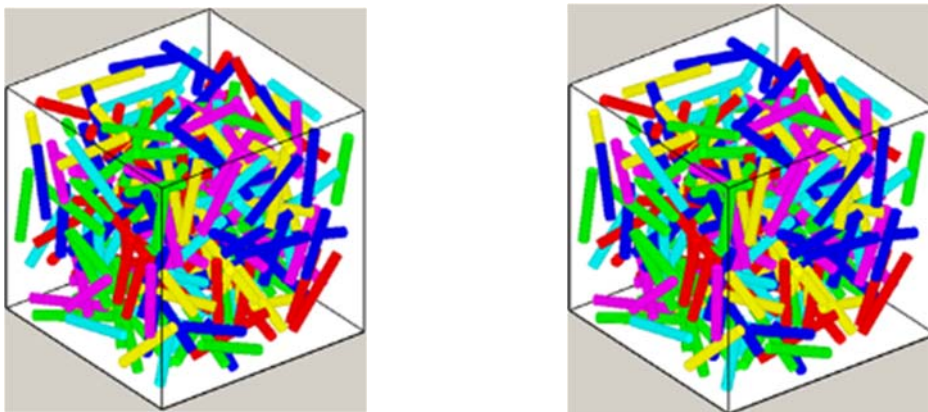
Drátky mají vysoký tvarový index, délka násobně přesahuje jeho průměr, čímž jejich popisem povrchu vznikají obsáhlé datové modely (stovky MB až GB), které mají stovky tisíc prvků (trojúhelníků) pro jeden naskenovaný vzorek z průmyslového tomografu. Vznikají extrémně náročné úlohy na výpočet, přitom se nejedná o náročnou úlohu. Proto další snahou bude vyvinout algoritmus, který nahradí nasnímaný povrch drátku úsečkou a tu potom jedním tělesem (válcem) o shodné délce a průměru jako je drátek, což výrazně zjednoduší model a pak by bylo možné provádět časově méně náročný výpočet. Jednalo by se o výpočty měřitelné svojí časovou náročností s již provedenými simulacemi, kdy série výpočtů pro parametrickou úlohu se 40 drátky proběhla v řádu jednoho dne.

9.4.2. Další optimalizace sondy

Následující snahou bude za pomoci numerického modelování dosáhnout další optimalizace parametrů sondy, které byly doposud stanoveny pouze experimentálně pro jeden typ soustavy (daný průměr magnetu, při změně jejich počtu a vzdálenosti od senzoru). Z tohoto důvodu v dalším kroku budou simulovány variace jiných velikostí magnetů (menších) a jejich vlivu na výsledky při různých vzdálenostech od senzoru při uvážení délky použitého drátku v konstrukci.

9.4.3. Generátor náhodných drátků pro MKP

Například rozšířený vědecký software MATLAB umožňuje generování nahodilých směrů vláken na základě teorie her a směrů vláken odpovídajících předem zadanému pravděpodobnostnímu rozdělení.



Obr. 66. Generování vláknových struktur [44]

Takovéto generované vláknové struktury jsou výhodné pro kalibraci při měření intenzity stacionárního magnetického pole Hallovo sondou nepřímou metodou numerické simulace. Další etapou vývoje bude využití generovaných struktur pro tvorbu knihovny kalibračních křivek pro různé typy drátků.

V Brně dne 27. 6. 2019

.....
Ing. et Ing. Petr BÍLEK

10. SEZNAM PUBLIKACÍ

10.1. Použitá související literatura

- [1] HOBST L., ADÁMEK J. a kol.: Diagnostika stavebních konstrukcí – Přednášky
- [2] KRÁTKÝ, J. - TRTÍK, K. - VODIČKA, J.: Drátkobetonové konstrukce. Praha: EBS, 1999.
- [3] COLLEOPARDI M.: Moderní beton. Praha, EBS, 2009.
- [4] KOPEC B.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Brno, CERM, 2008.
- [5] BRADÁČ A.: Soudní inženýrství. Brno, CERM, 1999.
- [6] OŠLEJŠEK J., BRADÁČ A.: Znalecká činnost ve stavebnictví. Brno, CERM, 1994.
- [7] MYSLÍK, J., *Elektromagnetické pole: základy teorie*. Praha : BEN, 1998. 160 s.
- [8] *Magnety a teorie - Permanentní magnety. Co je třeba vědět o magnetech.*, <http://www.sinomag.cz>, 2006, 44 s.
- [9] *Gauss / Tesla meter Model 5170 / 5180 – Instruction Manual*, www.fwbell.com, 59 s.
- [10] HORÁK, Z., KRUPKA, F., ŠINDELÁŘ, V. *Technická fyzika*. Praha: SNTL, 1961, 1 434 s.
- [11] DĚDKOVÁ, J., KŘÍŽ, T., *Modelování elektromagnetických polí.*, Brno, 2012, 98 s
- [12] LACKO, R., *Testovací pracoviště pro analýzu vlastností permanentních magnetů pro elektrické pohony*, Univerzita Pardubice, 2011, 56 s.
- [13] ALEMAN-FLOREZ, M., & ALVAREZ, L., 2011. *Segmentation of Computed Tomography 3D Images using Partial Differential Equations*. International Conference on Signal Image Technology & Internet-Based Systems in Singapore – Proceedings, pp. 345 – 349.
- [14] BARR, B., & SWAMY, R. N. (Eds.), 1990. *Fibre reinforced cement and concretes: recent developments*. London, Spon Press. 713 p.
- [15] CIORANESCU, D., & DONATO, P., 1999. *An Introduction to Homogenization*. Oxford University Press, Oxford.

- [16] DATTA, S., CHAN, C. T., HO, K. M., & SOUKOULIS, C. M., 1993. *Effective dielectric constant of periodic composite structures*. Physical Review, vol. B 48, pp. 14936 – 14943.
- [17] FAIFER, M., OTTOBONI, R., TOSCANI, S., FERRARA, L., & FELICETTI, R., 2009. *A multielectrode measurement system for steel fiber reinforced concrete materials monitoring*. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference in Singapore – Proceedings, pp. 719 – 723.
- [18] FAIFER, M., OTTOBONI, R., TOSCANI, S., & FERRARA, L., 2011. *Nondestructive testing of steel-fiber-reinforced concrete using a magnetic approach*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 60, pp. 1709 – 1717.
- [19] GIORDANO, S., 2008. *Effective permittivity of materials containing graded ellipsoidal inclusions*. European Physical Journal, vol. B 66, pp. 29 – 35.
- [20] HOBST, L., ANTON, O., VODIČKA, J., & ŠČUČKA, J., 2010. *Radiography of fibre-concrete structures*. In: *8th Workshop Non-Destructive Testing in Engineering Practice in Brno*, Brno University of Technology, pp. 81 – 86.
- [21] HOBST, L.; ANTON, O.; HEŘMÁNKOVÁ, V.; VODIČKA, J. *Verification of the homogeneity of the fibre-concrete calibration samples*. In: *6th International Conference Fibre Concrete in Prague*, Czech University of Technology., 2011. p. 83 - 84. ISBN 978-80-01-04836-8.
- [22] HOBST, L., ANTON, O., VALA, J., & VODIČKA, J., 2011b. *A Magnetic Method for Testing of Homogeneity of Fibre Concrete* In: *9th Workshop Non-Destructive Testing in Engineering Practice in Brno*, Brno University of Technology, in print.
- [23] HOBST, L., ANTON, O., VODIČKA, J., & ŠČUČKA, J., 2012. *Homogeneity detection of fibre-concrete structures by using radiographic technique*. In: *Nondestructive Testing of Materials and Structures*, RILEM Bookseries. Istanbul, Springer. 2012. p. 1 - 6. ISBN 978-94-007-0722-1.
- [24] KRISTENSSON, G., 2003. *Homogenization of spherical inclusions*. Progress In Electromagnetics Research, vol. 42, pp. 1 – 25.
- [25] LATASTE, J. F., BEHLOUL, M., & BREYSSE, D., 2008. *Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity*

- measurements*. NDT & E International (Independent Nondestructive Testing and Evaluation), vol. 41, pp. 638 – 647.
- [26] MARCHENKO, V. A., KHRUSLOV, E. YA., 2005. *Homogenization of Partial Differential Equations*. Birkhäuser, Basel.
- [27] NGUETSENG, G., SVANSTEDT, N., 2011. *Sigma-convergence*. Banach Journal of Mathematical Analysis, vol. 5, pp. 101-135.
- [28] OZYURT, N., WOO, L. Y., MASON, T. O., & SHAH, S. P., 2006. *Monitoring fiber dispersion in fiber reinforced cementitious materials: comparison of AC-impedance spectroscopy and image analysis*. ACI Materials Journal, vol. 103, pp. 340 – 347.
- [29] SIHVOLA, A. H., & LINDELL, I. V., 1992. *Effective permeability of mixtures*. Progress in Electromagnetics Research, vol. 6, pp. 153 – 180.
- [30] ŠMILAUER, V., & BITTNAR, Z., 2006. *Elastické vlastnosti betonu z víceúrovňové homogenizace*. Beton – technologie – konstrukce – sanace, vol. 4, pp. 58 – 62.
- [31] SOULIOTI, D. V., BARKOULA, N. M., PAPIETIS, A., MATIKAS, T. E., 2011. *Effects of fibre geometry and volume fraction on the flexural behaviour of steel-fibre reinforced concrete*. International Journal for Experimental Mechanics, vol. 47, pp. 535 – 541.
- [32] SVANSTEDT, N., 2008. *Multiscale stochastic homogenization of convection-diffusion equations*. Applications of Mathematics, vol. 53, pp. 143 – 155.
- [33] THIDÉ, B., 2009. *Electromagnetic Field Theory*. Uppsilon Books, Uppsala, 2009.
- [34] TUŇÁK, M., LINKA, A., 2007. *Analysis of planar anisotropy of fibre systems by using 2D Fourier transform*. Fibres & Textiles in Eastern Europe, vol. 15, pp. 86 – 90.
- [35] YILMAZ, U. S., SARITAS, I., KAMANLI, M., & KALTAKCI, M. Y., 2010. *An experimental study of steel fibre reinforced concrete columns under axial load and modeling by ANN*. Scientific Research and Essay, vol. 5, pp. 81 – 92.
- [36] VALA, J., & HORÁK, M., 2011. *Nondestructive identification of engineering properties of metal matrix composites*. International Conference of Numerical

- Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM), AIP Conference Proceedings vol. 1479, pp. 2008 – 2012.
- [37] VAN DAMME, S., FRANCHOIS, A., DE ZUTTER, D., & TAERWE, L., 2004. *Nondestructive determination of the steel fiber content in concrete slabs with an open-ended coaxial probe*. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, vol. 42, pp. 2511 – 2521.
- [38] VERMA, S. K., BHADARIA, S. S., & Akhtar, S., 2013. *Review of nondestructive testing methods for condition monitoring of concrete structures*. Journal of Construction Engineering, vol. 2013, #834572, 11 pp.
- [39] WICHMANN, H.-J., BUDELMANN, H., & HOLST, A., 2012. *Determination of steel fiber dosage and steel fiber orientation in concrete*. In: Nondestructive Testing of Materials and Structures (Proceedings of International Symposium NDTMS-2011: Büyükoztürk, O., Taşdemir, M. A., Güneş, O., & Akkaya, Y., eds.), RILEM Bookseries, vol. 6, Springer 2012, Berlin, in print.
- [40] WU, F., & WHITES, K. W., 2001. *Quasistatic effective permittivity of periodic composites containing complex shaped dielectric particles*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 49, 1174 – 1182.
- [41] PRIECHODSKÝ, V., *Stanovenie množstva oceľovej rozptýlenej výstuže v betóne*. In *Betonárske dni 2004: Zborník prednášok konferencie, Bratislava, 9.-10.9.2004*. Bratislava : STU v Bratislave SvF, 2004, s. 247--252.
- [42] VÍTEK, P., ŠEBESTA, B., HILAR, M., PUKL, R., *Ražba traťových tunelů pražského metra technologií TBM. BETON-technologie, konstrukce, sanace. 2012, 12(6), 34-42. ISSN 1213-3116. BETON technologie konstrukce sanace 6/2012*.
- [43] KALASOVÁ, Dominika. *Možnosti determinace povrchu objektů v tomografických datech*. Brno, 2014. 45 s.
- [44] HOBST, L.; VALA, J. K možnostem nedestruktivního vyšetřování materiálových vlastností drátkobetonu. *TZB- info, 2017, vol. 2017, no. 4, p. H1 (H5 p.)* ISSN: 1801-4399.
- [45] SUCHARDA, O., MATEČKOVÁ, P., ŽÍDEK, L., *Zkoušení a stanovení pevnosti v tahu u drátkobetonu, TZB-info. 2018. 2018(30.10.2018). p. 1 - 7. ISSN 1801-4399*.
- [46] 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. Ljubljana: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana, Lepi pot 11, 2015. s. 136-136. ISBN: 978-961-92518-8- 1.

- [47] ŠEPS, K.; VODIČKA, J. Únosnost vyztužených vláknobetonových prvků s vývrty malých průměrů. In 19. BETONÁŘSKÉ DNY 2012. Sborník ke konferenci. Hradec Králové, ČBS Servis, s. r. o. 2012. p. 475 - 478. ISBN 978-80-87158-32-6.
- [48] VODIČKA, J.; VESELÝ, V.; KRÁTKÝ, J., *Specifika z technologie vláknobetonu TBM. BETON-technologie, konstrukce, sanace. 2010, 12(2), 38-42. ISSN 1213-3116. BETON technologie konstrukce sanace 2/2010.*
- [49] VLASÁK, O. *Kontrola množství drátků v betonové směsi na stavbách průmyslových podlah z drátkobetonu.* Materiály pro stavbu, 2009, ISSN: 1213- 0311.

10.2. Normy a předpisy

- [50] ČSN P 732450: Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Předběžná česká technická norma. ÚNMZ, Praha, 2015.
- [51] ČSN P 732451: Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu. Předběžná česká technická norma. ÚNMZ, Praha, 2015.
- [52] ČSN P 732452: Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu. Předběžná česká technická norma. ÚNMZ, Praha, 2015
- [53] ČSN EN 206+A1: Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. ÚNMZ, Praha, 2018
- [54] ČSN EN 14889-1: Vlákná do betonu – Část 1: Ocelová vlákna – Definice, specifikace, shoda. ÚNMZ, Praha, 2007
- [55] ČSN EN 14721+A1: Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny – Měření vláken v čerstvém a ztvrdlém betonu. ÚNMZ, Praha, 2008
- [56] ČSN P CEN ISO/TS 25108: Nedestruktivní zkoušení – Organizace pro školení pracovníků NDT. ÚNMZ, Praha, 2019
- [57] ČSN EN ISO 9712: Nedestruktivní zkoušení – Kvalifikace a certifikace pracovníků NDT. ÚNMZ, Praha, 2013
- [58] ČSN EN ISO 1849: Nedestruktivní zkoušení – Ověření zrkové ostroty pracovníků NDT. ÚNMZ, Praha, 2015
- [59] ČSN EN 13018 (015037): Nedestruktivní zkoušení - Vizuální zkoušení - Obecné zásady. ÚNMZ, Praha, 2016
- [60] TKP MD 31: Opravy betonových konstrukcí. PRAGOPROJEKT, a. s., Praha, 2008.

10.3. Publikované práce autora vztahující se k disertaci

- [61] HOBST, L.; BÍLEK, P.; ANTON, O.; VODIČKA, J. Prvé zkušenosti s ověřováním homogenity ztvrdlého drátkobetonu vyvíjenou magnetickou metodou. In *Sanácia betónových konštrukcií*. Bratislava, Slovensko, Vydavateľstvo JAGA. 2011. p. 49 - 54. ISBN 978-80-8076-095-3.
- [62] BÍLEK, P. První měření a poznatky s ověřováním homogenity drátkobetonu v konstrukci vyvíjenou magnetickou metodou. In *Juniorstav 2012 - Sborník anotací*. Juniorstav. Brno, Česká republika, omegadesign. 2012. p. 235 - 239. ISBN 978-80-214-4393-8.
- [63] HOBST, L.; VALA, J.; VODIČKA, J.; ANTON, O.; BÍLEK, P. *Non-destructive Testing of the Homogeneity of Fibre – Concrete Structures*. Fortaleza, Brazil, Fabricadopor Wave Media. 2012. p. 1 - 18.
- [64] HOBST, L.; BÍLEK, P.; ANTON, O. Magnetická metoda kontroly homogenity drátkobetonu. In *Zborník príspevkov z XVIII. Medzinárodnej konferencie. CONSTRUMAT*. Bratislava, Slovensko, Žilinská univerzita v Žiline, Stavebná fakulta, 2012. p. 104 - 110. ISBN 978-80-8076-095-3.
- [65] BÍLEK, P.; HOBST, L. Ověřování homogenity drátkobetonu na kalibračních vzorcích vyvíjenou magnetickou metodou. *Sanace betonových konstrukcí*. 2012. 2012(1). p. 278 - 284. ISSN 1211-3700.
- [66] BÍLEK, P.; VALA, J.; VODIČKA, J.; HOBST, L. Nová srovnávací měření při kontrole homogenity drátkobetonu. In *Konference Zkoušení a jakost ve stavebnictví. Sborník recenzovaných příspěvků 2012*. Brno, Česká republika, knihovnicka.cz. 2012. p. 27 - 36. ISBN 978-80-214-4578-9.
- [67] HOBST, L.; BÍLEK, P.; ANTON, O.; VALA, J. Další vývoj magnetické metody pro testování homogenity drátkobetonové konstrukce. In *19. BETONÁŘSKÉ DNY 2012. Sborník ke konferenci*. Hradec Králové, ČBS Servis, s. r. o. 2012. p. 479 - 482. ISBN 978-80-87158-32-6.
- [68] BÍLEK, P.; HOBST, L.; ANTON, O.; VALA, J. VERIFICATION OF MAGNETIC METHODS CONTROL HOMOGENEITY OF FIBER – CONCRETE STRUCTURES THE COMPARATIVE SAMPLES Verification of magnetic methods kontrol homogenity

- of fiber – concrete structures the komparative samples. In *10th INTERNATIONAL CONFERENCE NDT 2012 NON-DESTRUCTIVE TESTING IN ENGINEERING PRACTICE*. Brno, Česká republika, CERM. 2012. p. 36 - 39. ISBN 978-80-7204-823-6.
- [69] BÍLEK, P.; HOBST, L. Vývoj magnetické metody pro testování homogenity drátkobetonové konstrukce a možnosti aplikace v soudním inženýrství. In *Sborník příspěvků ExFoS - ExpertForensic Science XXII. mezinárodní vědecká konference soudního inženýrství*. Brno, Česká republika, Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, Údolní 244/53, 602 00 Brno. 2013. p. 317 - 324. ISBN 978-80-214-4675-5.
- [70] 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. p. 242 - 247. ISBN 978-80-214-4669-4.
- [71] BÍLEK, P.; HOBST, L.; VALA, J.; VODIČKA, J. Nová srovnávací měření při kontrole homogenity drátkobetonu. *TZB-info*. 2013. 2013(03). p. 1 - 10. ISSN 1801-4399.
- [72] BÍLEK, P.; HOBST, L.; LÁNÍK, J. Vady a poruchy průmyslové podlahy v hale výrobního závodu. *Sanace betonových konstrukcí*. 2013. 2013(1). p. 84 - 91. ISSN 1211-3700.
- [73] BÍLEK, P.; HOBST, L.; LÁNÍK, J. Průmyslové podlahy v hale výrobního závodu – teorie a praxe. In *Constructionmaterials– Zborník recenzovaných vedeckých prác, Sanace betonových konstrukcí*. CONSTRUMAT. Nitra, Slovenská republika, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre. 2013. p. 96 - 103. ISBN 978-80-552-1031-5, ISSN 1211-3700.
- [74] HOBST, L.; BÍLEK, P. Various control methods developed for fibre-concrete structures. In *Recent advances in integrity-reliability-failure*. IRF. Funchal, Madeira, Portugal, INEGI. 2013. p. 721 - 730. ISBN 978-972-8826-27-7.
- [75] BÍLEK, P.; HOBST, L.; ANTON, O.; ZIKMUND, T. Stanovení přesné polohy drátků v kalibračních vzorcích drátkobetonu počítačovou tomografií. In *Konference Zkoušení a jakost ve stavebnictví. Sborník recenzovaných příspěvků 2013*. Knihovnička. Brno, ČR, Vysoké učení technické v Brně. 2013. p. 33 - 42. ISBN 978-80-214-4777-6.

- [76] HOBST, L.; BÍLEK, P.; ANTON, O.; ZIKMUND, T. Tomografické zjištění anomálního rozdělení drátků v kalibračních vzorcích drátkobetonu. In *20. BETONÁŘSKÉ DNY 2013. Sborník ke konferenci*. ČBS Servis, s.r.o., Hradec Králové, ČR, ČBS Servis, s. r. o. 2013. p. 464 - 468. ISBN 978-80-87158-34-0.
- [77] HOBST, L.; BÍLEK, P.; ANTON, O.; ZIKMUND, T. Využití počítačové tomografie pro stanovení nerovnoměrného rozložení drátků v kalibračních vzorcích drátkobetonu. In *Zborník príspevkov z 8. seminára Sanácia betónových konštrukcií*. Združenie pre sanáciu betónových konštrukcií pri SZSI v Bratislave. Bratislava, Slovensko, Vydavateľstvo JAGA. 2013. p. 91 - 96. ISBN 978-80-8076-095-3.
- [78] BÍLEK, P.; HOBST, L.; ZIKMUND, T. Využití počítačové tomografie pro kontrolu homogenity drátkobetonu. In *Sborník příspěvků ExFoS - Expert Forensic Science XXIII. mezinárodní vědecká konference soudního inženýrství*. ExFoS. Brno, Česká republika. 2014. p. 37 - 44. ISBN 978-80-214-4852-0.
- [79] BÍLEK, P.; ZIKMUND, T. Vyšetření drátkobetonových vzorků pomocí průmyslového tomografu. In *Sborník anotací konference Juniorstav 2014*. Juniorstav. Brno, Česká republika, Omega Design, s.r.o. 2014. p. 197 - 201. ISBN 978-80-214-4851-3.
- [80] BÍLEK, P. Vliv okrajového efektu na homogenitu drátkobetonových vzorků. In *Sborník anotací konference Juniorstav 2014*. Juniorstav. Brno, Česká republika, Omega Design, s.r.o. 2014. p. 402 - 406. ISBN 978-80-214-4851-3.
- [81] 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.
- [82] BÍLEK, P.; HOBST, L.; ANTON, O.; ZIKMUND, T. Sledování anomálního rozmístění drátků v kalibračních vzorcích drátkobetonu počítačovou tomografií (CT). *Sanace betonových konstrukcí*, 2014, roč. 2014, č. 1, s. 27-33. ISSN: 1211- 3700.
- [83] BÍLEK, P.; HOBST, L.; VALA, J.; VODIČKA, J. Předběžné měření koncentrace drátků v drátkobetonových segmentech ostění tunelu. In *Sborník recenzovaných příspěvků konference ZKOUŠENÍ A JAKOST VE STAVEBNICTVÍ 2014*. Zkoušení a

- jakost. Brno, Česká republika: VUT v Brně, 2014. s. 93-101. ISBN: 978-80-214-5032- 5.
- [84] HOBST, L.; BÍLEK, P.; VODIČKA, J.; VALA, J. Měření homogenity ztvrdlého drátkobetonu na hotové drátkobetonové konstrukci segmentového ostění. In 21. BETONÁŘSKÉ DNY 2014. Sborník ke konferenci. ČBS Servis,s.r.o. Hradec Králové, Česká republika: ČBS Servis,s.r.o., 2014. s. 1-6. ISBN: 978-80-903806-7- 7.
- [85] BÍLEK, P. Další měření homogenity ztvrdlého drátkobetonu na hotové drátkobetonové konstrukci segmentového ostění. In Sborník anotací konference Juniorstav 2015. Juniorstav. Brno, Česká republika: Vysoké učení technické v Brně, 2015. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-5091- 2.
- [86] BÍLEK, P.; KŘÍŽ, T. První poznatky s numerickou simulací nedestruktivního testování drátkobetonu. In Sborník anotací konference Juniorstav 2016. Juniorstav. Brno, Česká republika: Vysoké učení technické v Brně, 2016. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-5312- 8.
- [87] HOBST, L.; BÍLEK, P.; ANTON, O.; ZIKMUND, T. Sledování anomálního rozmístění drátků v kalibračních vzorcích drátkobetonu počítačovou tomografií. Beton TKS, 2014, roč. 2014, č. 3, s. 54-57. ISSN: 1213- 3116.
- [88] HOBST, L.; BÍLEK, P.; ANTON, O.; ZIKMUND, T. Sledování nepravidelného rozmístění drátků v kalibračních vzorcích drátkobetonu počítačovou tomografií (CT). Materiály pro stavbu, 2014, roč. 2014, č. 5, s. 63-65. ISSN: 1213- 0311.
- [89] HOBST, L.; BÍLEK, P.; VODIČKA, J.; VALA, J. Measurement of set fibre-concrete homogeneity in finished steel fibre-concrete structure of segmental tunnel lining. Advanced Materials Research, 2015, roč. 2015, č. 1106, s. 41-44. ISSN: 1022-6680.
- [90] HOBST, L.; BÍLEK, P. Non-destructive identification of material properties of fibre concrete: a time-harmonic electromagnetic field. In ICNAAM 2015. AIP conference proceedings. Melville (USA): American Institute of Physics, 2016. s. 380011-1 (380011-4 s.)ISBN: 978-0-7354-1392-4. ISSN: 0094-243X.
- [91] HOBST, L.; BÍLEK, P. Non-destructive identification of material properties of fibre concrete: a stationary magnetic field. In ICNAAM 2015 - Proceedings. AIP

conference proceedings.. Melville (USA): American Institute of Physics, 2016. s.
380010-1 (380010-4 s.) ISBN: 978-0-7354-1392-4. ISSN: 0094-243X.

11. SEZNAM ZKRATEK

N	jednotka Newton
kg	jednotka kilogram [10 N]
MPa	jednotka megapascal [N/mm ²]
kV	jednotka kilo Volt
A/m	jednotka Ampér na metr
kA/m	jednotka kilo Ampér na metr
k	konstanta (zahrnuje typ materiál a tloušťku destičky Hallovy sondy)
I	stejnosměrný proud
B	magnetická indukce způsobená magnetickým polem
$\varnothing_m$	magnetický skalární potenciál
μ	permeabilita
m_e	orbitální magnetický moment proudové smyčky
m_s	spinový magnetický moment
H	vektor magnetické intenzity
B ₀	magnetická indukce
B _i	příspěvku magnetické indukce
K _m	magnetická susceptibilita
μ_r	relativní permeabilita materiálu
μ_{rev}	reverzibilní permeabilita
μ_{rrev}	relativní hodnota reverzibilní permeability
CT	rentgenová počítačová tomografie (angl. computed tomography)

12. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.	<i>Drátky Dramix s koncovou úpravou.....</i>	<i>15</i>
Obr. 2.	<i>Pracovní diagram v tahu drátkobetonu (křivka F) a obdobného prostého betonu (křivka B) [2]</i>	<i>15</i>
Obr. 3.	<i>Vznik shluků drátků v důsledku nevhodného dávkování [48]</i>	<i>17</i>
Obr. 4.	<i>Čerstvě vyrobený vláknobeton – porovnání [48]</i>	<i>17</i>
Obr. 5.	<i>Zpracovaný vláknobeton – porovnání [48]</i>	<i>18</i>
Obr. 6.	<i>Vztah mezi ČSN P 73 2450 a normami pro navrhování a provádění betonových konstrukcí, normami pro složky betonu a normami pro zkoušení[50]</i>	<i>20</i>
Obr. 7.	<i>Přístroj na separaci drátků z čerstvé směsi [49]</i>	<i>22</i>
Obr. 8.	<i>Separace drátku magnetem z rozdrceného vzorku ztvrdlého drátkobetonu [61]</i>	<i>23</i>
Obr. 9.	<i>Metoda „BSM 100“ - elektromagnetická analýza rozložení drátků ve vzorku</i>	<i>24</i>
Obr. 10.	<i>Rentgenografický snímek drátkobetonu (nalevo). Spektrum získané algoritmem (uprostřed). Výsledné rozložení směrů drátků (napravo). [23].....</i>	<i>25</i>
Obr. 11.	<i>Elektromagnetický indikátor výztuže Profometr 3 a citlivost přístroje na polohu drátků [41].....</i>	<i>26</i>
Obr. 12.	<i>Nově vyvíjená metoda zkoušení drátkobetonu na principu elektromagnetické povrchové sondy pro měření impedance – Laboratorní vyhodnocení modulu a fáze impedance pro měřicí body vzorku [46]</i>	<i>26</i>
	<i>Magnetické pole</i>	<i>31</i>
	<i>Paramagnetická látka</i>	<i>31</i>
	<i>(dřevo, olovo).....</i>	<i>31</i>
	<i>Feromagnetická látka.....</i>	<i>31</i>
	<i>(železo, ocel)</i>	<i>31</i>
	<i>Diamagnetická látka.....</i>	<i>31</i>
	<i>(vizmut)</i>	<i>31</i>
Obr. 13.	<i>Magnetické pole v různých materiálech (Ladislav Smrz, 1956).....</i>	<i>31</i>
Obr. 14.	<i>Schéma vzniku Hallova jevu.....</i>	<i>39</i>
Obr. 15.	<i>Hallův článek [9].....</i>	<i>40</i>
Obr. 16.	<i>Konfigurace axiální Hallovy sondy [9].....</i>	<i>40</i>

Obr. 17.	<i>Konfigurace transversální (tangenciální) Hallovy sondy [9]</i>	40
Obr. 18.	<i>Gauss / Tesla meter [9]</i>	41
Obr. 1.	<i>Komora s nulovým tokem pro kalibraci Hallovy sondy (nulovací měrka) [9]</i> .	41
Obr. 2.	<i>Zobrazení stacionárního magnetického pole</i>	42
Obr. 3.	<i>Zobrazení magnetického pole v okolí permanentního neodymového magnetu (průměr 20 mm a délka 40 mm) pomocí ocelových pilin[62]</i>	43
Obr. 4.	<i>Zobrazení magnetického pole v okolí permanentního magnetu pomocí software ANSYS</i>	43
Obr. 5.	<i>Průběh magnetického pole v okolí permanentních magnetů Lineární stupnice [63]</i>	44
Obr. 6.	<i>Průběh magnetického pole v okolí permanentních magnetů Logaritmická stupnice [63]</i>	45
Obr. 7.	<i>Gauss-teslameter Bell 5180 [65]</i>	45
Obr. 8.	<i>Porušení magnetických siločar v drátkobetonu vlivem drátků [65]</i>	45
Obr. 9.	<i>Intenzita magnetického pole vůči poloze Hallovy sondy [9]</i>	46
Obr. 10.	<i>Měřicí stolice pro stanovení optimálního počtu permanentních magnetů a vzdálenosti Hallovy sondy</i>	46
Obr. 11.	<i>Vývojová sonda PeMaSo-01 s měnitelnou vzdáleností Hallovy sondy od magnetu [64]</i>	48
Obr. 12.	<i>Zobrazení magnetického pole v okolí permanentního neodymového magnetu v experimentální sondě pomocí ocelových pilin [62]</i>	49
Obr. 13.	<i>Schéma s popisem magnetické sondy PeMaSo</i>	50
Obr. 14.	<i>Prototyp hloubkové sondy PeMaSo-02 s pevnou vzdáleností Hallovy sondy od magnetu [69]</i>	51
Obr. 15.	<i>Drátky TRI-TREG a DRAMIX [70]</i>	51
Obr. 16.	<i>Sada testovacích drátkobetonových vzorků [75]</i>	52
Obr. 17.	<i>Ukázka měření vzorku a vzorek opatřený vývrty</i>	53
Obr. 18.	<i>Vytvořené 3 sady sklo-epoxidových vzorků</i>	54
Obr. 19.	<i>Sklo-epoxy s drátky DRAMIX - 0,5 % [69]</i>	55
Obr. 20.	<i>Sklo-epoxy s drátky DRAMIX - 1,0 % [69]</i>	55
Obr. 21.	<i>Sklo-epoxy s drátky DRAMIX - 1,5 % [69]</i>	55
Obr. 22.	<i>Měření sklo – epoxy vzorku sondou PeMaSo [69]</i>	55
Obr. 23.	<i>Vzorky drátkobetonu pro tomografické vyšetřování</i>	56

Obr. 24.	<i>Princip průmyslového tomografu [87]</i>	57
Obr. 25.	<i>Schéma průmyslového tomografu [87]</i>	57
Obr. 26.	<i>Řez vzniklý filtrovanou zpětnou projekcí [43]</i>	58
Obr. 27.	<i>GE phoenixv tome x L 240 [87]</i>	59
Obr. 28.	<i>Válcový vzorek upevněný v manipulátoru [87]</i>	59
Obr. 29.	<i>Jednotlivé CT snímky vzorkem s vyobrazením shluků [87]</i>	60
Obr. 30.	<i>Axonometrické zobrazení transparentního vzorku válce s drátky [87]</i>	60
Obr. 31.	<i>Axonometrické zobrazení separovaných drátku ve válci se směrovou analýzou [87]</i>	61
Obr. 32.	<i>Zkušební krychle upevněná v manipulátoru</i>	62
Obr. 33.	<i>Naskenovaný vzorek drátkobetonu – podrobnější pohledy ve dvou ortogonálních řezech [43]</i>	63
Obr. 34.	<i>Krychle rozdělená na čtyři oblasti zájmu podle tmavosti vzorku [43]</i>	64
Obr. 35.	<i>Drátky s parazitními částmi zobrazené nástrojem Defectdetection [43]</i>	64
Obr. 36.	<i>Axonometrické zobrazení transparentního vzorku krychle s drátky [87]</i>	65
Obr. 37.	<i>U válcového vzorku jsou patrné tři vrstvy drátku a převládající horizontální směr</i>	66
Obr. 38.	<i>U krychle se objevil zajímavý defekt nerozlepených drátků</i>	66
Obr. 39.	<i>Další shluk slepených drátků</i>	67
Obr. 40.	<i>Detailní zobrazení slepených drátků</i>	67
Obr. 41.	<i>Axonometrické zobrazení separovaných drátku v krychli se směrovou analýzou [87]</i>	68
Obr. 42.	<i>Blok drátkobetonu s drátky TRI-TREG s vyznačeným řezem [80]</i>	69
Obr. 43.	<i>Půdorys axonometrického zobrazení separovaných drátků krychle [80]</i>	71
Obr. 44.	<i>Foto z výroby vzorků KH</i>	72
Obr. 45.	<i>Sada kalibračních vzorků KH</i>	72
Obr. 46.	<i>Výroba směrového vzorku (nahore vlevo) – před zalitím pryskyřicí (nahore vpravo), termovize (dole vlevo) a foto zalitého vzorku (dole vpravo) [69]</i>	74
Obr. 47.	<i>Segmenty tunelového ostění</i>	75
Obr. 48.	<i>Sestavené jedno pole z jednotlivých segmentů</i>	75
Obr. 49.	<i>Rozložení odběrných míst na dílci [83]</i>	75
Obr. 50.	<i>Schéma měření sondou PeMaSo-2 [83]</i>	76
Obr. 51.	<i>Praktické měření</i>	76

Obr. 52.	<i>Provádění jádrového vývrtu malého průměru na části segmentu ostění [85]</i>	77
Obr. 53.	<i>Schéma sondy PeMaSo-2 při měření na dílci [85].....</i>	77
Obr. 54.	<i>Odebrané jádrové vývrty ze segmentu ostění připravené k rozřezání [85]</i>	78
Obr. 55.	<i>Uzly na síti konečných prvků a prostorové prvky.....</i>	81
Obr. 56.	<i>Geometrický model (vlevo) a vygenerovaná síť konečných prvků (vpravo) [86]</i>	82
Obr. 57.	<i>Výsledky numerické simulace a zobrazení intensity magnetického pole [86]</i>	83
Obr. 58.	<i>Zobrazení intensity magnetického pole na jednotlivých drátcích pro danou polohu magnetu [86].....</i>	83
Obr. 59.	<i>Zobrazení intenzity magnetického pole v ose Z pro danou polohu magnetu [86]</i>	84
Obr. 60.	<i>Drátek s různou orientací v tangenciální rovině</i>	85
Obr. 61.	<i>Skupina 10 drtků ve vzdálenosti 48 mm od osy vzorku</i>	90
Obr. 62.	<i>Drátek s různou orientací v radiální rovině.....</i>	91
Obr. 63.	<i>Skupina náhodných drátků kolmých k ose vzorku</i>	92
Obr. 64.	<i>Skupina drátku rovnoběžných s osou vzorku</i>	93
Obr. 65.	<i>Kombinace skupiny kolmých a skupiny rovnoběžných drátků s osou vzorku .</i>	94
Obr. 66.	<i>Generování vláknových struktur [44].....</i>	106

13. SEZNAM TABULEK

Tab. 1.	<i>Dávkování drátků pro některé typy konstrukcí (Podlahy 2008).....</i>	16
Tab. 2.	<i>Nastavení tomografu pro sken vzorku drátkobetonu [43].</i>	62
Tab. 3.	<i>Naměřené hodnoty koncentrací v jednotlivých vývrtech [83]</i>	76

14. SEZNAM GRAFŮ

Graf 1.	<i>Měření intenzity magnetického pole pro různý počet magnetů v závislosti na vzdálenosti Hallovy sondy.....</i>	<i>47</i>
Graf 2.	<i>Měření intenzity magnetického pole pro různé vzdálenosti v závislosti na počtu magnetů</i>	<i>48</i>
Graf 3.	<i>Korelace mezi úbytkem intenzity magnetického pole a rostoucí koncentrací drátků ve vzorcích.....</i>	<i>49</i>
Graf 4.	<i>Graf výsledků měření vzorků z drátků TRI-TREG [71]</i>	<i>52</i>
Graf 5.	<i>Graf výsledků měření vzorků z drátků DRAMIX [71].....</i>	<i>53</i>
Graf 6.	<i>Průběh měření sondou PeMaSo-02 na 3 sklo-epoxidových vzorcích s drátky Fibrex [69].....</i>	<i>55</i>
Graf 7.	<i>Histogram směrové analýzy – orientace vláken ve válci [87]</i>	<i>61</i>
Graf 8.	<i>Graf výsledků měření vzorků z drátků DRAMIX [80].....</i>	<i>69</i>
Graf 9.	<i>Graf výsledků měření vzorků z drátků TRI-TREG [80]</i>	<i>70</i>
Graf 10.	<i>Korelační křivka pro měření drátků – vzorky Krampeharex.....</i>	<i>73</i>
Graf 11.	<i>Měření směrového vzorku rovnoběžně s vlákny a komo na vlákna</i>	<i>74</i>
Graf 12.	<i>Graf naměřené koncentrace v závislosti na poloze měření na dílci [83]</i>	<i>77</i>
Graf 13.	<i>Výsledek měření koncentrace po výšce vzorku č. 1 [85]</i>	<i>78</i>
Graf 14.	<i>Výsledek měření koncentrace po výšce vzorku č. 2 [85]</i>	<i>78</i>
Graf 15.	<i>Výsledek měření koncentrace po výšce vzorku č. 3 [85]</i>	<i>79</i>
Graf 16.	<i>Závislosti intensity magnetického pole na poloze měřící soustavy vůči vzorku při průchodu soustavy vzorkem – výstup ANSYS [86].....</i>	<i>84</i>
Graf 17.	<i>Tangenciální rovina ve vzdálenosti 15 mm od osy vzorku</i>	<i>86</i>
Graf 18.	<i>Tangenciální rovina ve vzdálenosti 20 mm od osy vzorku</i>	<i>86</i>
Graf 19.	<i>Tangenciální rovina ve vzdálenosti 25 mm od osy vzorku</i>	<i>86</i>
Graf 20.	<i>Tangenciální rovina ve vzdálenosti 30 mm od osy vzorku</i>	<i>87</i>
Graf 21.	<i>Tangenciální rovina ve vzdálenosti 40 mm od osy vzorku</i>	<i>87</i>
Graf 22.	<i>Porovnání odezvy drátků v tangenciální rovině ve vzdálenosti 15 mm a 40 mm</i>	<i>87</i>
Graf 23.	<i>Porovnání vlivu vzdálenosti pro drátek v tangenciální rovině kolmý k ose vzorku</i>	<i>88</i>

Graf 24. Porovnání vlivu vzdálenosti pro drátek v tangenciální rovině pootočený o 45° k ose vzorku	88
Graf 25. Porovnání vlivu vzdálenosti pro drátek v tangenciální rovině rovnoběžný s osou vzorku	89
Graf 26. Skupina 10 drtků ve vzdálenosti 48 mm od osy vzorku vs. jednotlivé drátky	89
Graf 27. Radiální rovina s těžištěm drátku ve vzdálenosti 30 mm od osy vzorku	91
Graf 28. Porovnání skupiny drátků v jedné rovině kolmé k ose vzorku s jedním drátkem	92
Graf 29. Porovnání skupiny rovnoběžných drátků s osou vzorku s jedním drátkem	93
Graf 30. Srovnání skupin kolmých a rovnoběžných drátku k ose vzorku s jejich vzájemnou kombinací	94

15. SEZNAM PŘÍLOH

15.1.	Užitný vzor CZ 25427 U1	6 str.
15.2.	Rozhodnutí o uplatnění práva na předmět práv prům. vlastnictví	1 str
15.3.	Postery	3 str.
15.4.	DVD – video separovaných drátků z průmyslového tomografu	
15.4.1	Separované drátky z válcového vzorku	
15.4.2	Směrová analýza drátků válcového vzorku	
15.4.3	Separované drátky z krychle	