



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

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

SUMMARY OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. et Ing. Petr Bílek

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.

BRNO 2019

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.

Klíčová slova

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

Bibliografická citace

BÍLEK, Petr. *Rozvoj a využití nedestruktivních zkušebních metod z hlediska soudního inženýrství*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/107457>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, Ústav soudního inženýrství. Vedoucí práce prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.

Místo uložení disertační práce

Ústav soudního inženýrství VUT v Brně

Obsah

KEYWORDS.....	2
KLÍČOVÁ SLOVA.....	2
OBSAH.....	3
1. ÚVOD.....	5
1.1. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	5
1.2. MATRICE	5
1.3. BETON	5
1.4. OCELOVÁ VLÁKNA – DRÁTKY	5
1.5. DRÁTKOBETONY	6
1.6. PROBLEMATIKA VÝROBY DRÁTKOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	6
1.7. NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ	6
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	7
2.1. VYMEZENÍ ŘEŠENÉ OBLASTI DISERTAČNÍ PRÁCE	7
2.2. JMENOVITÉ CÍLE PRÁCE.....	8
3. MAGNETISMUS.....	8
3.1. MAGNETICKÉ MATERIÁLY	8
3.1.1. <i>Diamagnetické materiály</i>	9
3.1.2. <i>Paramagnetické materiály</i>	9
3.1.3. <i>Feromagnetické materiály</i>	9
3.2. MAGNETICKÉ PRVKY	9
3.3. MAGNETICKÉ POLE STACIONÁRNÍ	10
3.4. PRINCIP HALLOVA ČLÁNKU	11
4. VÝVOJ NOVÉ METODY	12
4.1. NOVĚ ZÍSKANÉ POZNATKY VE STUDOVANÉ OBLASTI	12
4.2. VÝVOJOVÁ SONDA – PERMANENTNÍ MAGNETICKÁ SONDA PeMaSo - 01	14
4.3. PROTOTYP SONDY – PERMANENTNÍ MAGNETICKÁ SONDA PeMaSo – 02	15
4.4. OVĚŘENÍ MAGNETICKÉ METODY NA TESTOVACÍCH VZORCÍCH.....	16

5.	PROBLEMATIKA VZORKŮ	17
5.1.	TOMOGRAFICKÉ VYŠETŘENÍ DRÁTKOBETONOVÝCH VZORKŮ.....	18
5.1.1.	<i>Principy tomografie a mikrotomografie</i>	<i>18</i>
5.1.2.	<i>Válcový vzorek o průměru 100 mm</i>	<i>19</i>
5.1.3.	<i>Drátkobetonová krychle o hraně 150 mm.....</i>	<i>21</i>
5.1.4.	<i>Zjištěné anomálie drátkobetonových vzorků.....</i>	<i>22</i>
5.1.5.	<i>Závěr tomografické vyšetření drátkobetonových vzorků</i>	<i>22</i>
5.2.	VLIV OKRAJOVÉHO EFEKTU NA HOMOGENITU DRÁTKOBETONOVÝCH VZORKŮ	23
5.3.	UŽITNÝ VZOR PERMANENTNÍ MAGNETICKÉ SONDY	25
6.	EXPERIMENTÁLNÍ VYŠETŘOVÁNÍ	26
6.1.	VÝROBA NOVÝCH KALIBRAČNÍCH VZORKŮ S DRÁTKY KH.....	26
6.2.	VÝSLEDKY MĚŘENÍ KONCENTRACE DRÁTKŮ NA VZORCÍCH OSTĚNÍ	27
7.	NUMERICKÁ ČÁST	29
7.1.	ANALÝZA VLIVU ORIENTACE SKUPINY DRÁTKŮ NA MĚŘENÍ	29
7.2.	ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ NUMERICKÝCH SIMULACÍ	32
7.3.	ANALÝZA STL MODELU ZÍSKANÉHO Z POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE	32
8.	METODIKA MĚŘENÍ.....	32
9.	ZÁVĚR	34
9.1.	ZÁVĚREČNÉ SHRUTÍ	34
9.2.	DOSAŽENÍ CÍLŮ	34
9.3.	PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE	34
10.	SEZNAM POUŽITÝCH PUBLIKACÍ.....	36
11.	ŽIVOTOPIS.....	38
12.	ABSTRAKT	39

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.

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 jsou přímá nebo tvarovaná. Vyrábí se ze zastudena taženého ocelového drátu, stříháním z plechu, oddělováním z taveniny nebo z ocelového bloku frézováním.

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 výztuž.

Drátkobetony jsou vláknobetony, kde byla při výrobě použita ocelová vlákna. V posledních letech se díky dobrým fyzikálně mechanickým vlastnostem drátkobetonu 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.

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).

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).

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 drátkem 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 použitelnost 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 Hallovy sondy a nakalibrování celé soupravy na zhotovených kalibračních vzorcích bude stěžejní částí disertační práce.

2.2. Jmenovité cíle práce

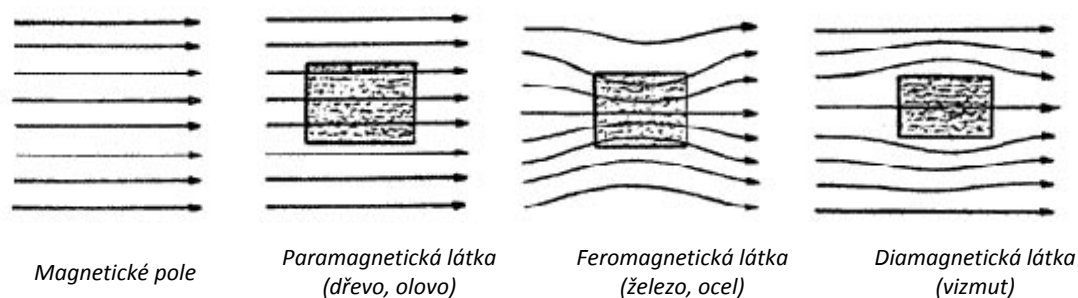
Pro dosažení cílů disertační práce byla zformulována tato konkrétní témata:

- 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 Hallovy 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.

3. MAGNETISMUS

3.1. Magnetické materiály

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



Obr. 1. 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.

3.1.2. Paramagnetické materiály

Poměrná permeabilita paramagnetických materiálů je o něco větší než jedna. Po vložení do magnetického pole ho nepatrně zesilují. Poměrnou permeabilitu diamagnetických a paramagnetických materiálů můžeme v běžné praxi považovat za rovnu jedné. [4]

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.

3.2. Magnetické prvky

Magnetický prvek je objekt, který díky jeho magnetickému poli přitahuje magnetickou složku k sobě.

Permanentní magnety jsou nejčastěji používaným magnetickým prvkem. Jejich výhodou je jednoduchá údržba, spolehlivost, nulová spotřeba, malé nároky na údržbu i na samotnou aplikaci.

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 směsicí 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

3.3. 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:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1)$$

nebo

$$\mathbf{H} = \nu \mathbf{B} \quad (2)$$

V poli permanentních magnetů (magnetostatické pole), platí:

$$\text{rot } \mathbf{H} = 0 \quad (3)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

a proto můžeme zavést skalární magnetický potenciál ϕ_m vztahem:

$$\mathbf{H} = -\text{grad } \phi_m \quad (5)$$

, potom 3D stacionární magnetické pole permanentních magnetů:

$$\text{div}(\mu \text{grad } \phi_m) = 0. \quad (6)$$

, kde ϕ_m je magnetický skalární potenciál a μ permeabilita.

V lineárním prostředí vyhovuje potenciál ϕ_m Laplaceově rovnici:

$$\text{div grad } \phi_m = \Delta \phi_m = 0. \quad (7)$$

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

$$\phi_{m1} = \phi_{m2} \quad (8)$$

$$\mu_1 \frac{\partial \phi_{m1}}{\partial n} = \mu_2 \frac{\partial \phi_{m2}}{\partial n} \quad (9)$$

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

$$\phi_m = \phi_{m0} \quad (10)$$

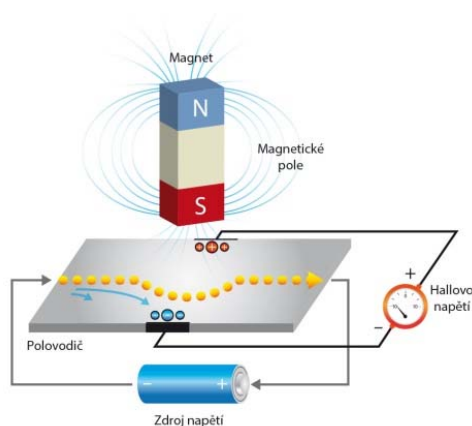
nebo je hranice totožná se siločarou pole (vektoru $\mathbf{H}$ nebo $\mathbf{B}$), kde platí:

$$\frac{\partial \phi_m}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

[7]

3.4. 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. 2).



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

Obr. 2. Schéma vzniku Hallova jevu

Tak na Hallově článku vzniká napětí. Hallovo napětí se dá vypočítat pomocí vzorce (12):

$$U_h = k * I * B \quad (12)$$

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

I je stejnosměrný proud,

B je magnetická indukce způsobená magnetickým polem.

Konstrukce samotné sondy může mít různě orientovanou Hallovu sondu, a to buď transverzálně nebo axiálně (Obr. 3).



Obr. 3. Konfigurace axiální Hallovy sondy [5]

Pro měření změn intezity magnetického pole byl zvolen měřič magnetického pole Bell, 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.

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

4. VÝVOJ NOVÉ METODY

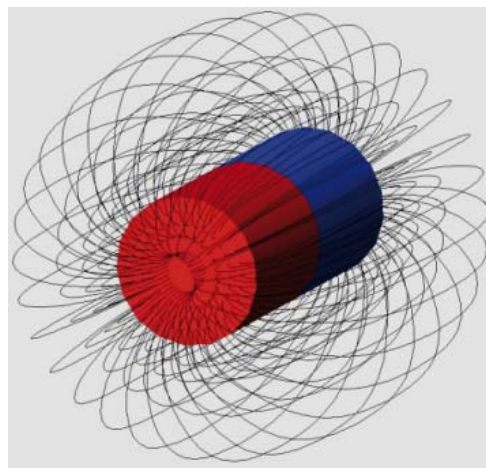
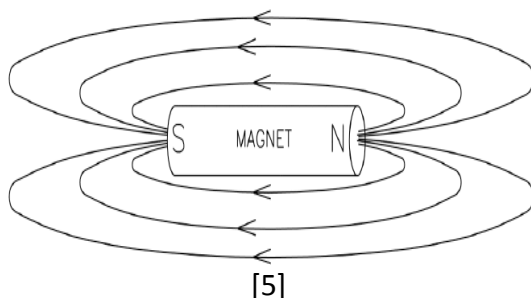
4.1. Nově získané poznatky ve studované oblasti

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)

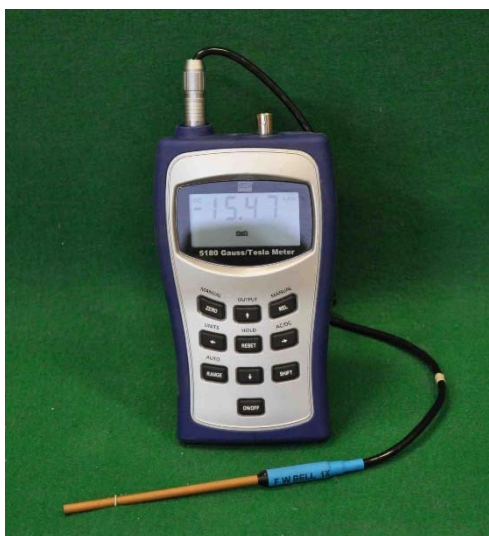
Na vyšší měrné hmotnosti drátků je založena rentgenografická metoda kontroly, resp. i počítačová tomografie, na různé permeabilitě jsou založeny magnetické a elektromagnetické metody.



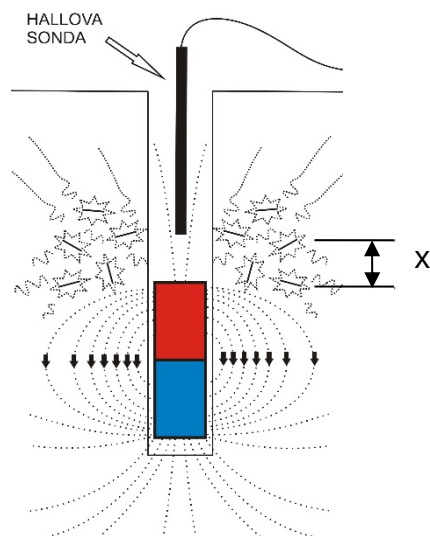
(Zdroj: Adama Benda, www.omforum.cz)

Obr. 4. Zobrazení stacionárního magnetického pole

Nová metoda je založena na vlastnostech permanentních magnetů, které kolem sebe vytváří magnetické pole, charakterizované magnetickými siločárami, které je měřitelné Hallovoú sondou (Obr. 3 a Obr. 5). 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. 6).



Obr. 5. Gauss-teslameter Bell 5180



Obr. 6. Porušení magnetických siločar v drátkobetonu vlivem drátků

Pokud bude změna tohoto pole vhodně změřena, může být nalezena korelace mezi nárůstem koncentrace drátků v drátkobetonu a změnou intenzity magnetického pole. Jako vhodný přístroj pro měření intenzity magnetického pole byl zvolen Gauss-teslameter Bell 5180 s axiální Hallovoú sondou. Cílem prvního měření bylo nalézt

optimální velikost permanentního magnetů (počet magnetů) a optimální vzdálenost Hallovy sondy od povrchu magnetu.

4.2. 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 trubicou vnějšího průměru 25 mm, do které mohly být umísťovány válcové permanentní magnety o průměru 20 mm (Obr. 7).



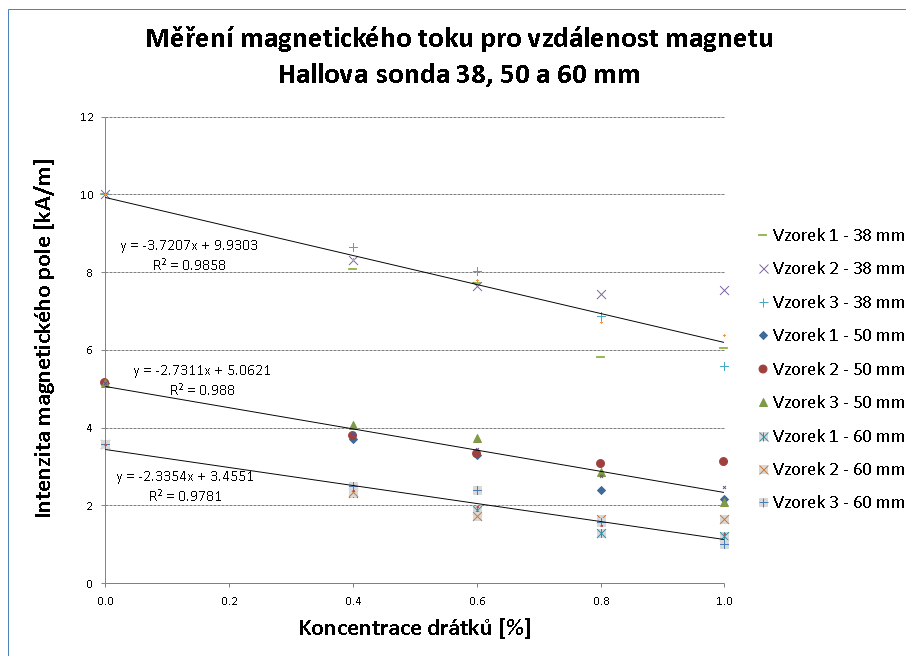
Obr. 7. Vývojová sonda PeMaSo-01 s měnitelnou vzdáleností Hallovy sondy od magnetu
Ve volitelné vzdálenosti v podélné ose byla umístěna samotná Hallova sonda, měřící magnetické pole uvnitř sondy (hliníkové trubice). Vzdálenost Hallovy sondy od povrchu magnetů byla u vývojové sondy nastavitelná.



Obr. 8. Zobrazení magnetického pole v okolí permanentního neodymového magnetu
v experimentální sondě pomocí ocelových pilin

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 1) mezi úbytkem intenzity magnetického pole a rostoucí koncentrací drátků ve vzorcích.

Nejmenší rozptyl měření na stejných vzorcích byl zjištěn při vzdálenosti 50 mm Hallovy 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.

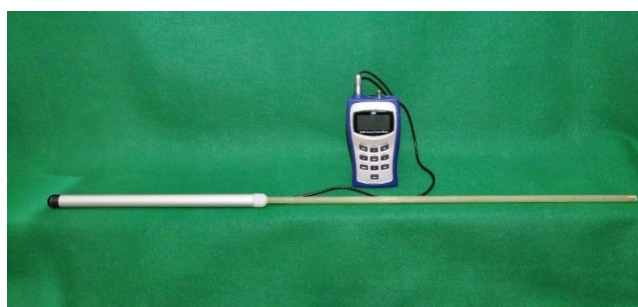


Graf 1. Korelace mezi úbytkem intenzity magnetického pole a rostoucí koncentrací drátků ve vzorcích

4.3. 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.

Rozdíl mezi vývojovou sondou a prototypem sondy PeMaSo-02 je především v napevno nastavených parametrech, které byly stanovené pro měření jako optimální a sondou je uskutečnitelné měření do hloubky konstrukce (Obr. 9).



Obr. 9. Prototyp hloubkové sondy PeMaSo-02 s pevnou vzdáleností Hallovy sondy od magnetu

4.4. 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. 10). Pro zvýšení počtu hodnocení byly do každého vzorku vyvrtány vždy 2 otvory $\varnothing$ 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“.

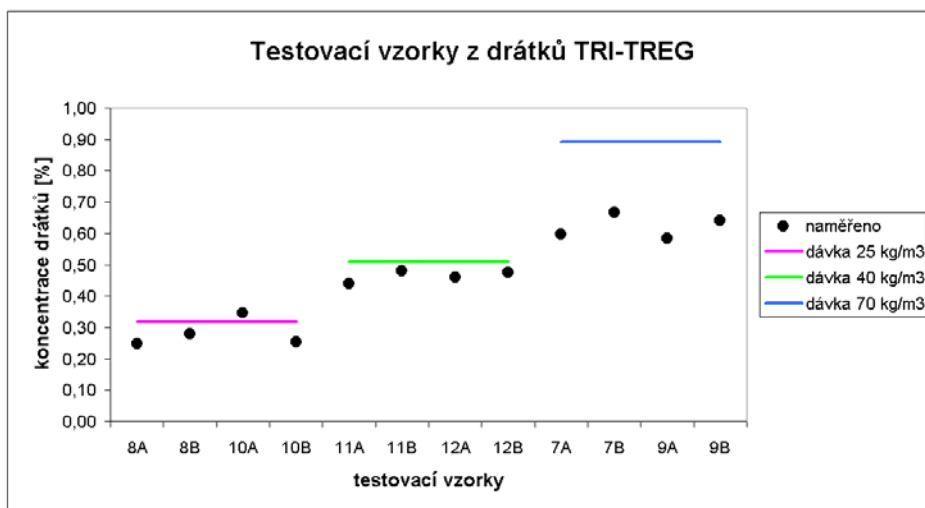
Výsledky srovnávacích měření

Naměřené výsledky z „testovacích vzorků“ byly vyhodnoceny z korelačního vztahů (Graf 1), získaných na „kalibračních vzorcích“. Po „odtajnění“ hodnot koncentrace drátků v drátkobetonu byly výsledky vyneseny do dvou grafů (Graf 2 a Graf 3). Graf 2 je vyneseny pro drátky Tri-treg o koncentraci 0,32 % (25 kg/m^3), dále 0,51 % (40 kg/m^3) a 0,89 % (70 kg/m^3) a pro stejné koncentrace je vyneseny i Graf 3, kde ovšem výztuž tvoří drátky Dramix.

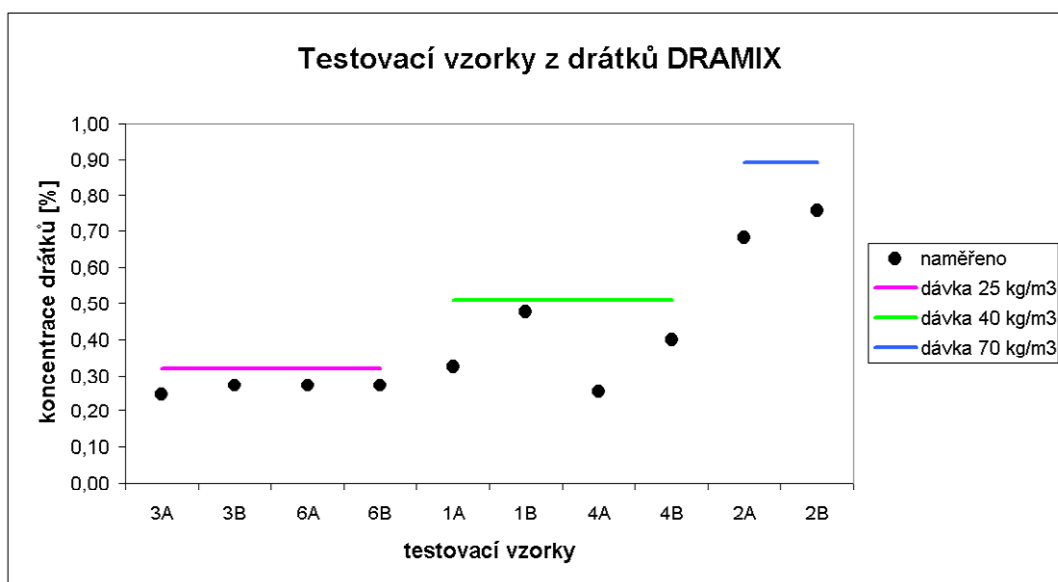


Obr. 10. Sada testovacích drátkobetonových vzorků

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 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 2. Graf výsledků měření vzorků z drátků TRI-TREG



Graf 3. Graf výsledků měření vzorků z drátků DRAMIX

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 1).

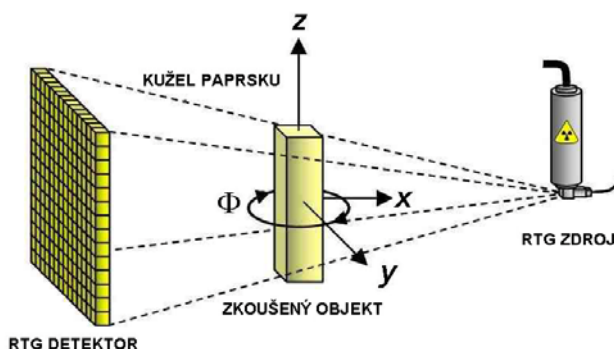
5. Problematika vzorků

Pro přesnou kalibraci vyvíjené hloubkové magnetická 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. Některé vzorky vykazovaly při měření výchyly, 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.

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. 11). Naopak u lékařských CT se otáčí zdroj s detektorem, a to kvůli stabilizaci pacienta.



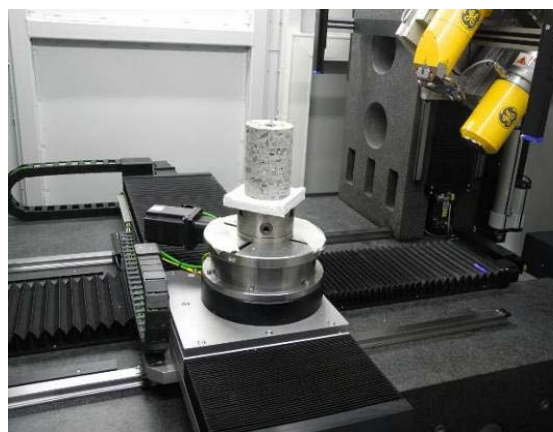
Obr. 11. Princip průmyslového tomografu

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. 12. GE phoenix v|tome|x L 240

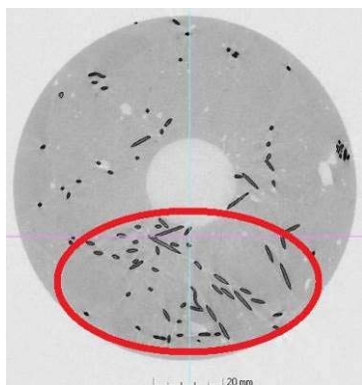


Obr. 13. Válcový vzorek upevněný v manipulátoru

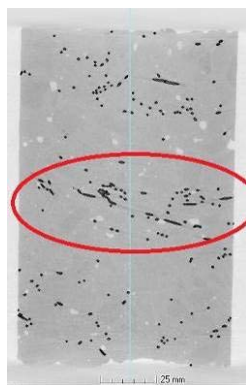
5.1.2. Válcový vzorek o průměru 100 mm

Nejdříve byl na CT odzkoušen menší válcový vzorek, který byl pevně umístěn do manipulátoru tomografu (Obr. 13) a po bezpečném uzavření stínících dveří přístroje (Obr. 12) došlo k postupnému prozařování vzorku.

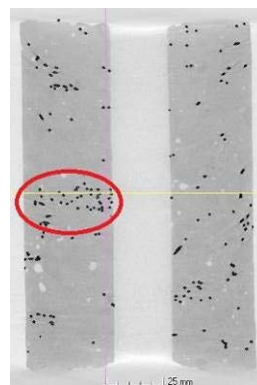
Následným matematickým zpracováním jsou rekonstruovány virtuální řezy vzorku. Tato data byla získána s voxelovým rozlišením 100 μm . Vhodnými počítačovými softwary lze z těchto řezů vyseparovat drátky a vytvořit 3D model vzorku. Zpracování tomografických dat trvalo přibližně dvě hodiny.



přodorys



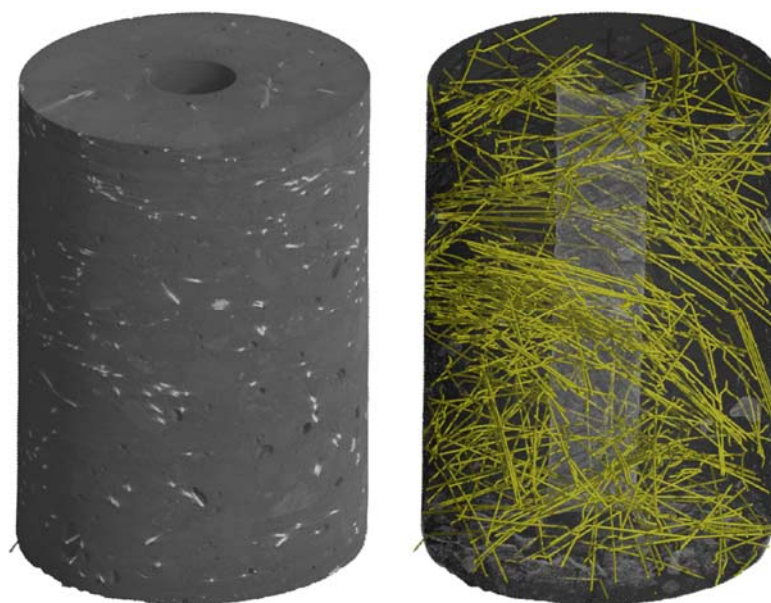
čelní pohled



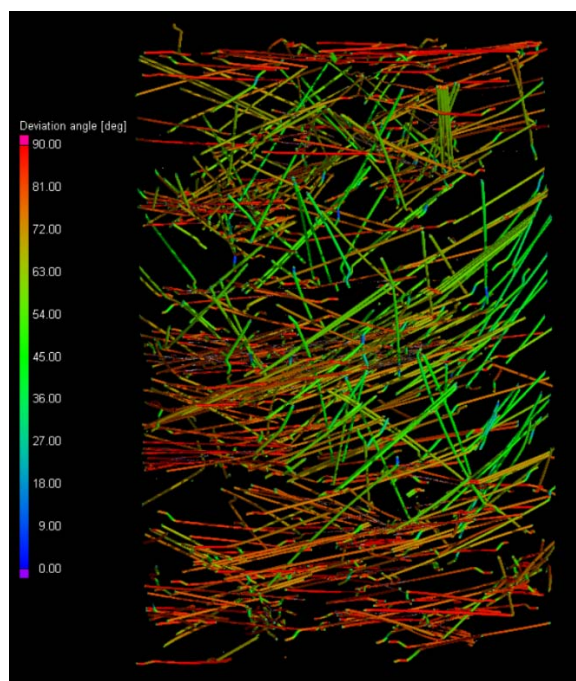
boční pohled

Obr. 14. Jednotlivé CT snímky vzorkem s vyobrazením shluků

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 „anomalie“ (Obr. 14), které způsobují odchylné výsledky při kalibraci magnetické sondy (Obr. 15).

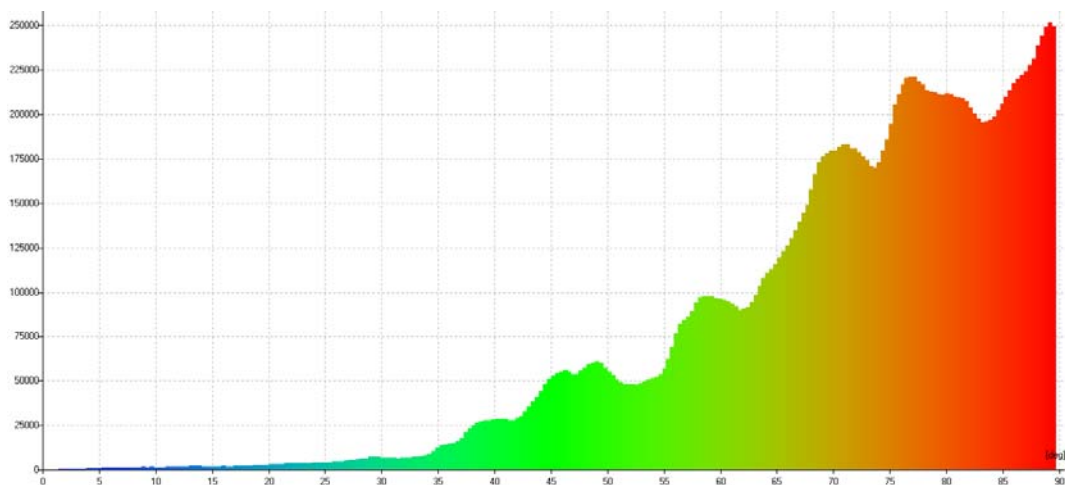


Obr. 15. Axonometrické zobrazení transparentního vzorku válce s drátky



Obr. 16. Axonometrické zobrazení separovaných drátů ve válci se směrovou analýzou

Pro provedenou směrovou analýzu vláken je pak možné zobrazit histogram a určit tak převládající směry orientace vláken (Obr. 16).



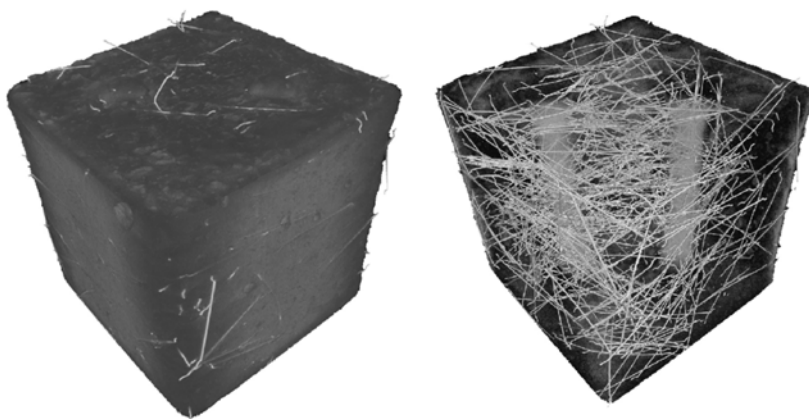
Graf 4. Histogram směrové analýzy – orientace vláken ve válci

5.1.3. 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.

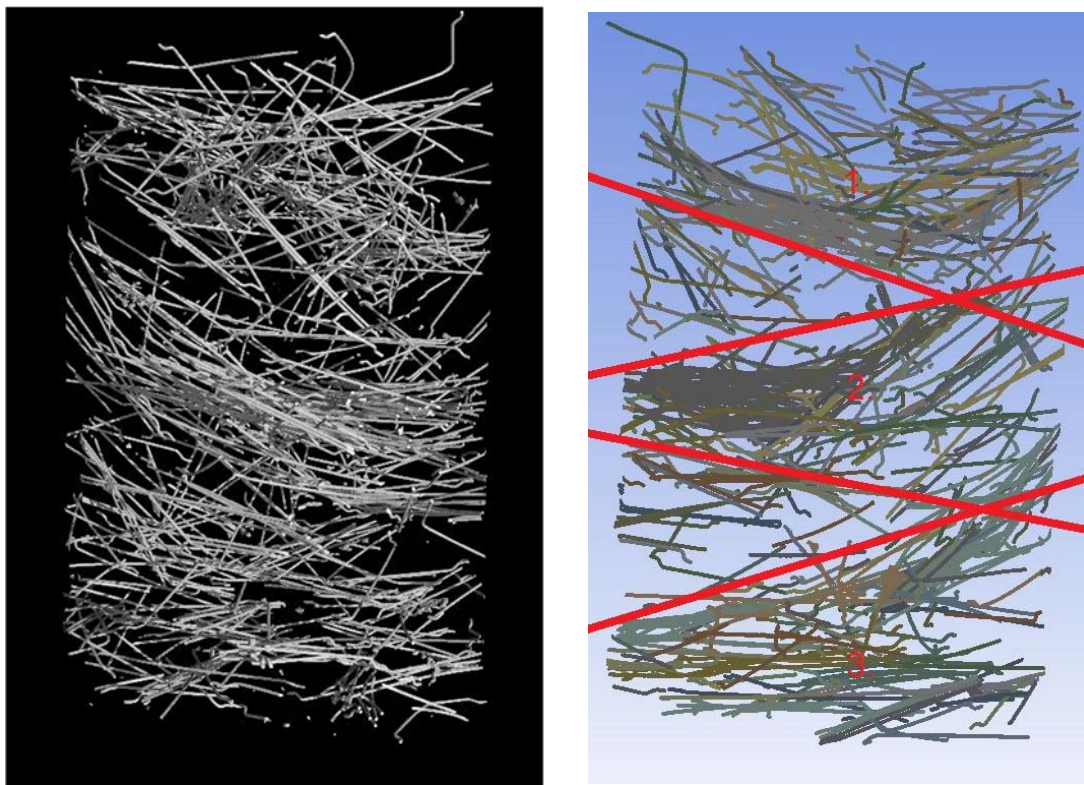
Proto bylo využito obdobného tomografu, avšak s vyšším výkonem. Při vyšším napětí je možné s úspěchem prozářit a počítačově zpracovat i celou zkušební krychli. Na obrázku je v dolní a horní části znatelné rozmazání způsobené artefaktem kuželového svazku. Pro eliminaci artefaktu kuželového svazku by bylo vhodné krychli naklonit, ale v případě takto hustého materiálu je možné krychli prozářit pouze ve vodorovné poloze.

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

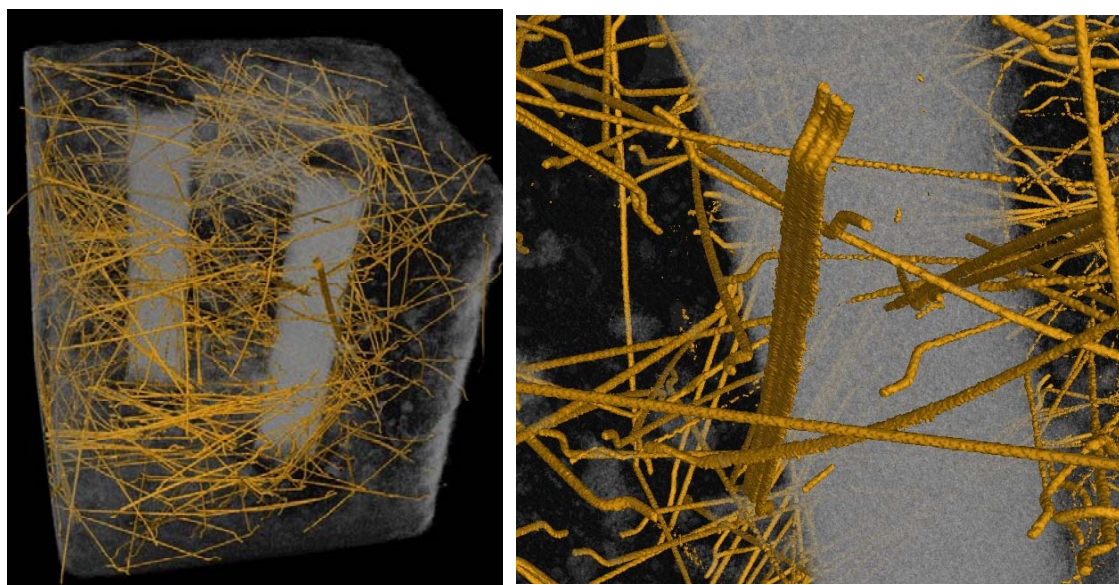


Obr. 17. Axonometrické zobrazení transparentního vzorku krychle s drátky

5.1.4. Zjištěné anomálie drátkobetonových vzorků



Obr. 18. U válcového vzorku jsou patrné tři vrstvy drátku a převládající horizontální směr



Obr. 19. U krychle se objevil zajímavý defekt nerozlepených drátků

5.1.5. Závěr tomografické vyšetření drátkobetonových vzorků

Kontrola počítačovým tomografem potvrdila předpoklad, že v drátkobetonových vzorcích došlo k nepravidelnému rozmísení drátků (Obr. 17

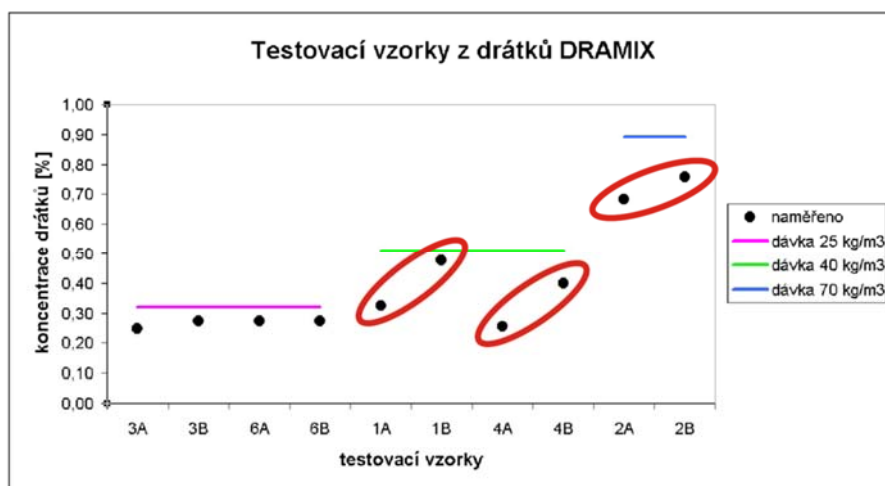
odkazů.), které při kalibraci magnetické sondy vykazovalo anomálie ve výsledných údajích.

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 5).



Graf 5. Graf výsledků měření vzorků z drátků DRAMIX

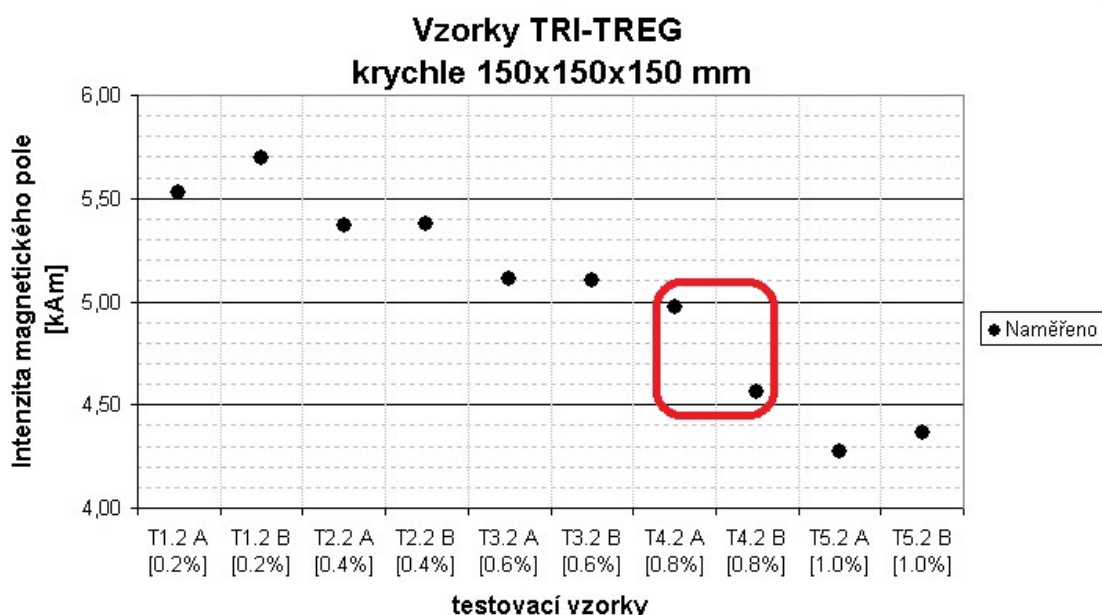
Nové drátkobetonové vzorky s částečnou eliminací okrajového efektu. Na základě zkušenosti s krychlemi o rozměrech 150 x 150 x 150 mm byly vytvořeny nové atypické

vzorky o rozměru 300 x 300 x 150 mm a to s pěti různými koncentracemi. Blok byl následně rozřezán diamantovým kotoučem na čtvrtiny (Obr. 20), u kterých je alespoň částečně okrajový efekt eliminován a bude možné sledovat vývrt zatížený okrajovým efektem (A) a nezatížený (B).



Obr. 20. Blok drátkobetonu s drátky TRI-TREG s vyznačeným řezem

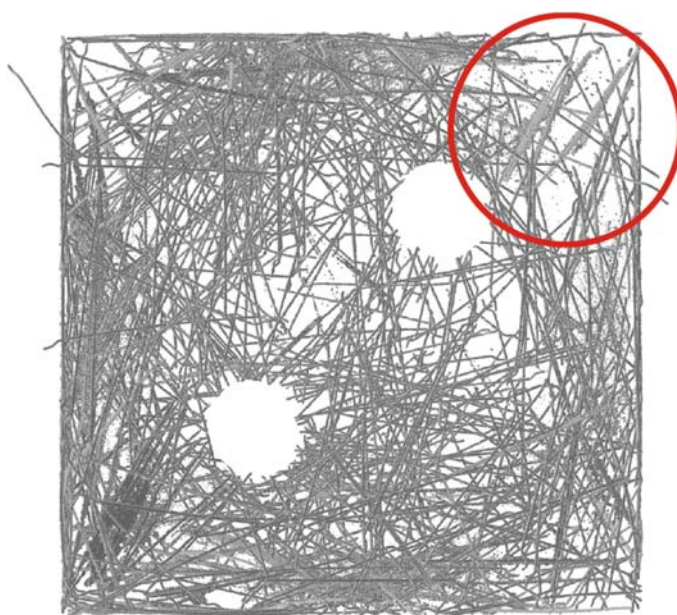
Z výsledků měření vychází velký rozptyl mezi naměřenými hodnotami na vzorku T4 o koncentraci 0,8 % a je tedy zřejmé, že problematika okrajového efektu pro vyšší koncentrace se dotýká i takto zhotovených vzorků (Graf 6).



Graf 6. Graf výsledků měření vzorků z drátků TRI-TREG

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. 21). 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. 21. *Půdorys axonometrického zobrazení separovaných drátků krychle*

Následující snaha vývoje byla 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. 9) 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. 22). 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 %.



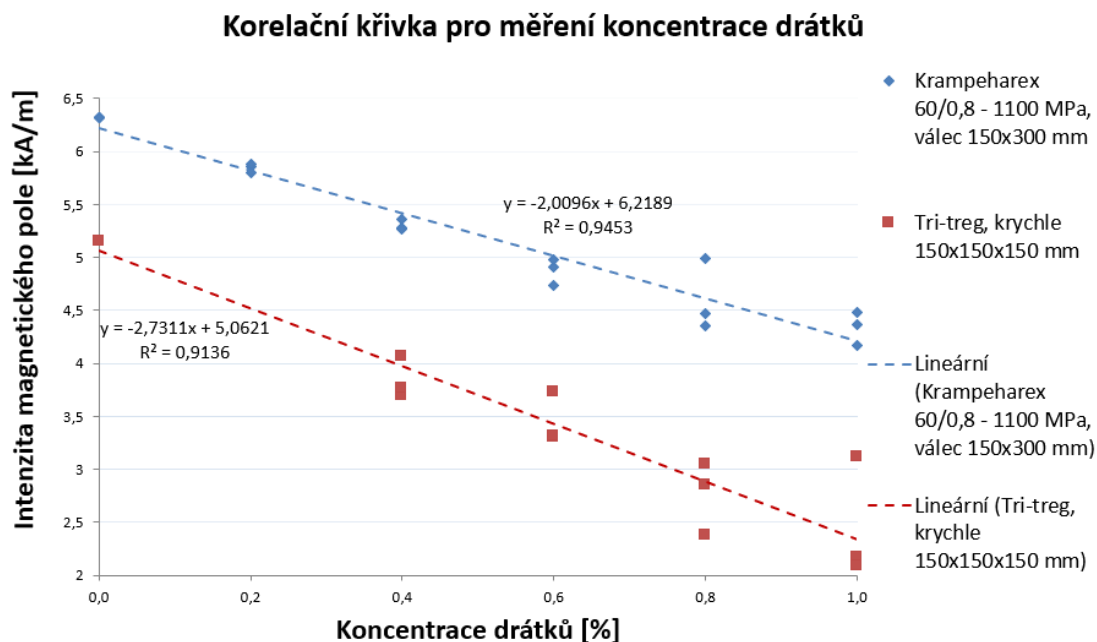
Obr. 22. Foto z výroby vzorků KH

Uprostřed vzorku byl vyvrtán po celé délce centrický jádrový vývrt o průměru 25 mm pro měření magnetickou hloubkovou sondou (Obr. 23).



Obr. 23. Sada kalibračních vzorků KH

Vzorky byly měřeny průběžně po délce s odstupem jednotlivých měření jeden centimetr. Hodnoty byly zprůměrovány, vyneseny do grafu (Graf 7) a proloženy přímkou.



Graf 7. Korelační křivka pro měření drátků – vzorky Krampeharex

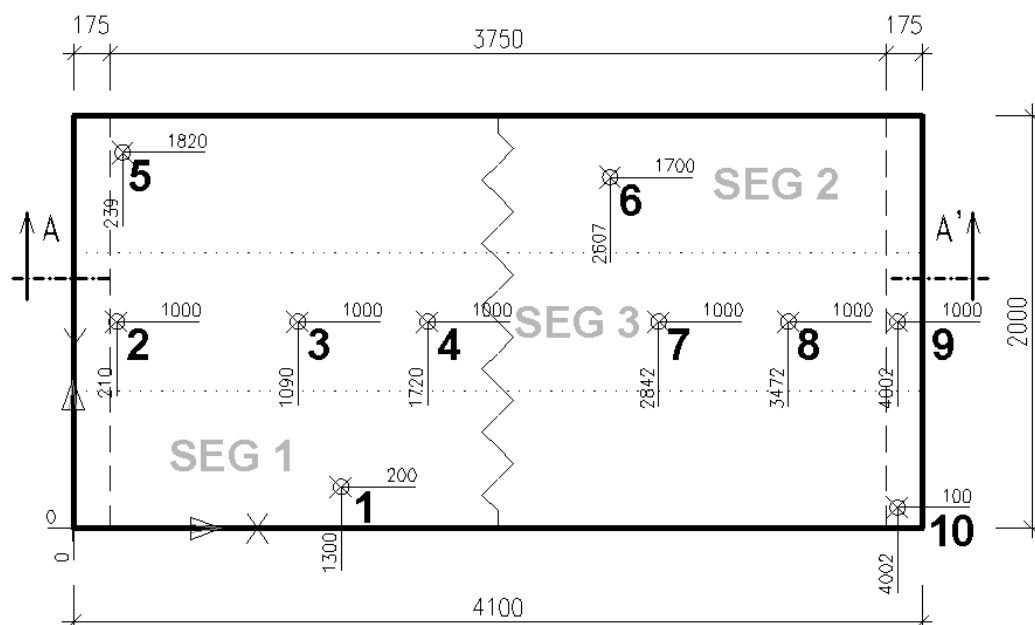
Z grafu (Graf 7) je patrný rozdíl mezi přímkou získanou od drátku Tri-treg a přímkou od drátků Krampe Harex, což potvrdilo předpoklad, že pro každý typ drátku bude muset být vytvořen vlastní korelační vztah. Rovněž se potvrdilo, že vzorky vykazují při vyšších koncentracích větší rozptyl pro stejnou koncentraci, což je patrné nejvíce u koncentrace 0,8%.

6.2. 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.

Pro odběr válcových vzorků $\varnothing$ 150 mm byla použita lamela ostění, odzkoušená na lamičové dráze. Původní rozměr lamely byl 2 m x 4,2 m x 0,4 m. Pro osazení na lamičovou 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. 24).



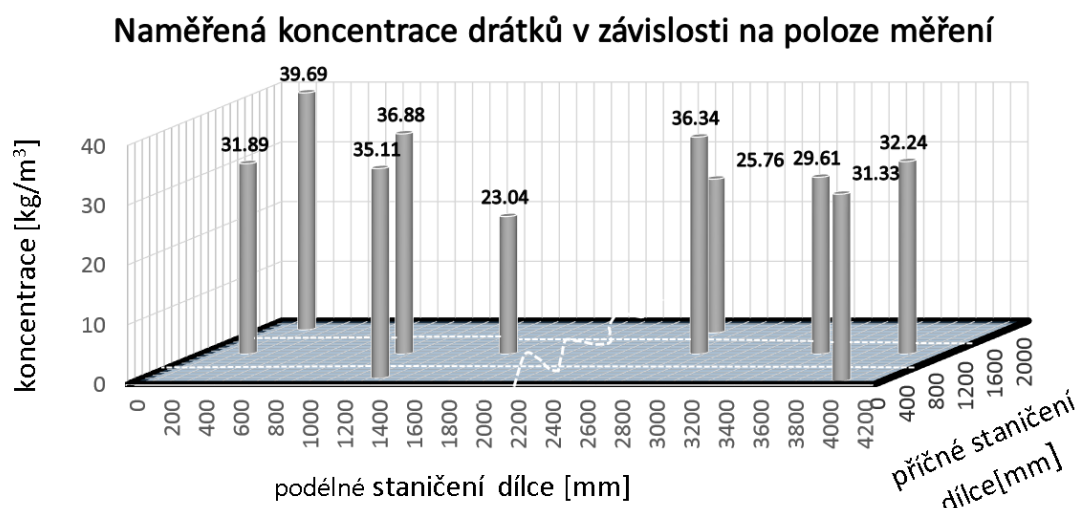
Obr. 24. Rozložení odběrných míst na dílci

Odběry válcových vzorků se uskutečnily v jednotlivých dílech a přesné umístění odběrných míst je vyznačeno v obrázku (Obr. 24).

Jednotlivá měření po délce vývrtu byla zprůměrována a výsledky byly vyneseny do tabulky (Tab. 1) a do grafu (Graf 8).

Tab. 1. Naměřené hodnoty koncentrací v jednotlivých vývrtech

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 8. Graf naměřené koncentrace v závislosti na poloze měření na dílci

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.

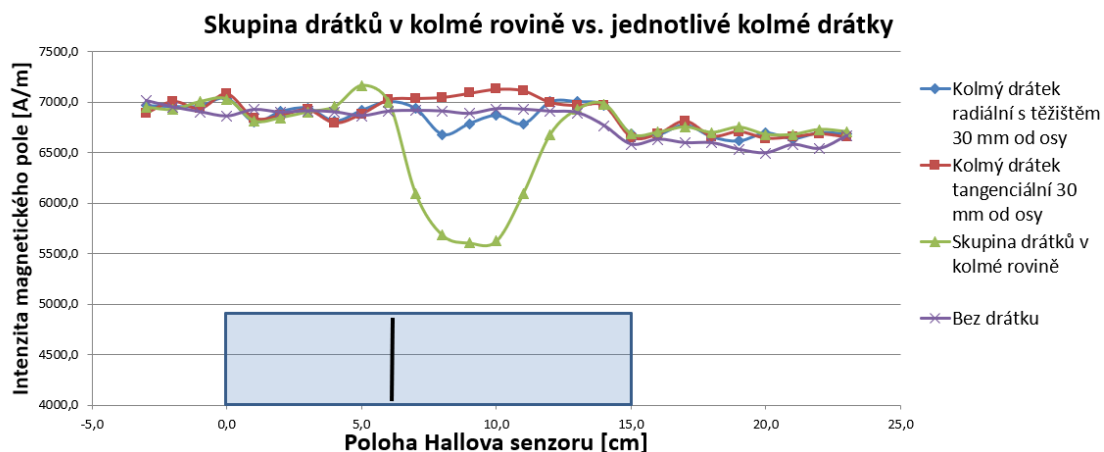
7. NUMERICKÁ ČÁST

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 Hallovy sondy v pozici – 30 mm od spodního okraje válce, kdy soustava s fixovanou vzdáleností Hallovy 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.

7.1. Analýza vlivu orientace skupiny drátků na měření

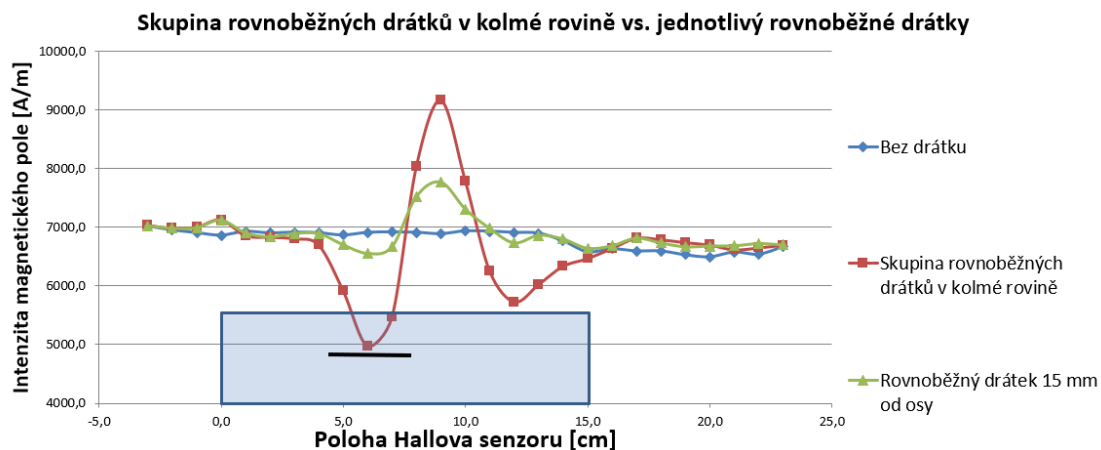
Následující analýza byla provedena pro skupinu 20 kolmých drátků v jedné rovině, drátky jsou v rovině nahodile rozmístěny a výsledek je porovnán s jednotlivými kolmými drátky v radiální i tangenciální rovině (Graf 9).

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

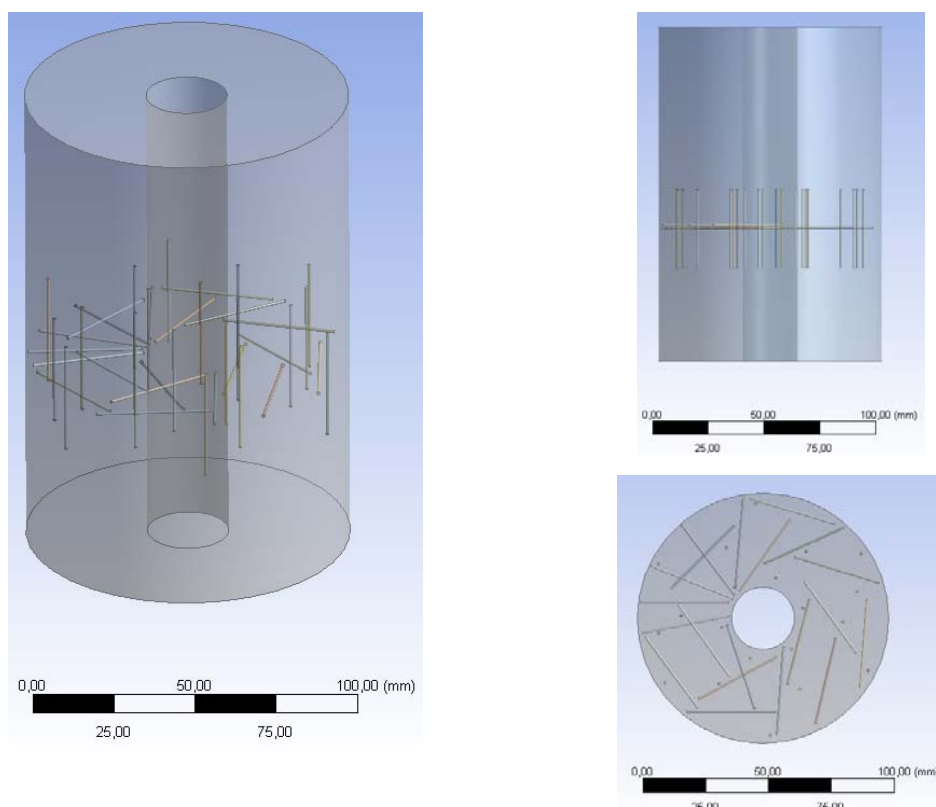
Pro další analýzu bylo použita skupina 20 rovnoběžných drátků v jedné rovině, drátky jsou v rovině nahodile rozmístěny a výsledek je porovnán s jedním rovnoběžným drátkem (Graf 10).



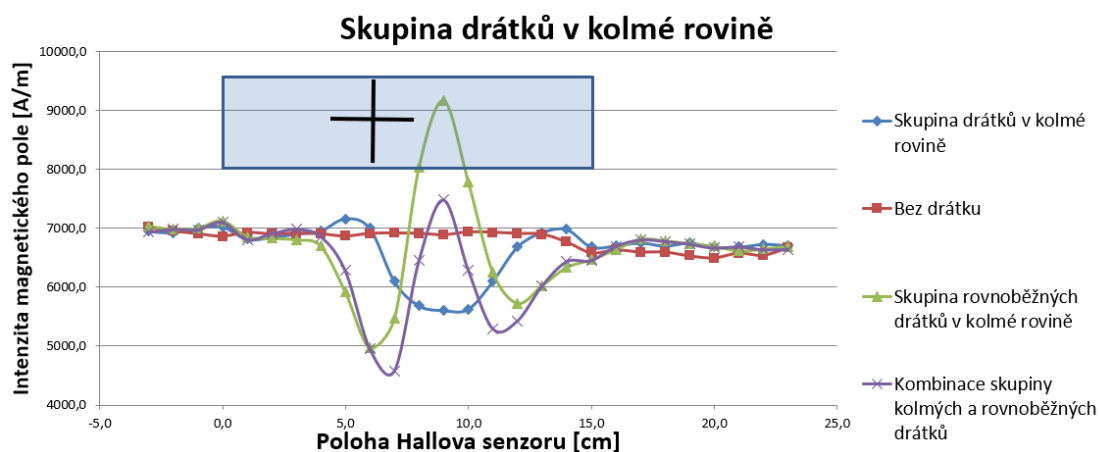
Graf 10. Porovnání skupiny rovnoběžných drátků s osou vzorku s jedním drátkem

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

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



Obr. 25. Kombinace skupiny kolmých a skupiny rovnoběžných drátků s osou vzorku



Graf 11. 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.

7.2. 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.

7.3. 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 pomoci průmyslového tomografu, a opatřit je vývrtem pro měření. Měřením na vyrobených vzorcích a vynesení průměrné

koncentrace od kalibračních vzorků vytvoříme novou korelační křivku pro konkrétní typ drátků.

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. 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 %. [15]

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.

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.

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 užitný vzor pod číslem CZ 25427 U1 – Hloubková magnetická sonda na stanovení homogenity drátkobetonu.

10. SEZNAM POUŽITÝCH PUBLIKACÍ

- [1] HOBST L., ADÁMEK J. a kol.: Diagnostika stavebních konstrukcí – Přednášky
- [2] KRÁTKÝ, J. - TRTÍK, K. - VODIČKA, J.: Drátkobetonové konstrukce. Praha: EBS,
- [3] MYSLÍK, J., *Elektromagnetické pole: základy teorie*. Praha : BEN, 1998. 160 s.
- [4] *Magnety a teorie - Permanentní magnety. Co je třeba vědět o magnetech.*, <http://www.sinomag.cz>, 2006, 44 s.
- [5] *Gauss / Tesla meter Model 5170 / 5180 – Instruction Manual*, www.fwbell.com,
- [6] HORÁK, Z., KRUPKA, F., ŠINDELÁŘ, V. *Technická fyzika*. Praha: SNTL, 1961,
- [7] DĚDKOVÁ, J., KŘÍŽ, T., *Modelování elektromagnetických polí.*, Brno, 2012, 98 s
- [8] LACKO, R., *Testovací pracoviště pro analýzu vlastností permanentních magnetů pro elektrické pohony*, Univerzita Pardubice, 2011, 56 s.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] HOBST, L., ANTON, O., VODIČKA, J., & ŠČUČKA, J., 2012. *Homogeneity detection of fibre-concrete structures by using radiographic technice*. In: *Nondestructive Testing of Materials and Structures*, RILEM Bookseries. Istanbul, Springer. 2012. p. 1 - 6. ISBN 978-94-007-0722-1.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] 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.
- [16] 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.*

Normy a předpisy

- [17] ČSN P 732450: Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Předběžná česká technická norma. ÚNMZ, Praha, 2015.
- [18] ČSN P 732451: Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu. Předběžná česká technická norma. ÚNMZ, Praha, 2015.
- [19] ČSN P 732452: Vláknobeton – Zkoušení ztvrdlého vláknobetonu. Předběžná česká technická norma. ÚNMZ, Praha, 2015
- [20] ČSN EN 206+A1: Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. ÚNMZ, Praha, 2018
- [21] ČSN EN 14889-1: Vlákná do betonu – Část 1: Ocelová vlákna – Definice, specifikace, shoda. ÚNMZ, Praha, 2007
- [22] ČSN EN 14721+A1: Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny – Měření vláken v čerstvém a ztvrdlém betonu. ÚNMZ, Praha, 2008
- [23] ČSN P CEN ISO/TS 25108: Nedestruktivní zkoušení – Organizace pro školení pracovníků NDT. ÚNMZ, Praha, 2019
- [24] ČSN EN ISO 9712: Nedestruktivní zkoušení – Kvalifikace a certifikace pracovníků NDT. ÚNMZ, Praha, 2013
- [25] ČSN EN ISO 1849: Nedestruktivní zkoušení – Ověření zrakové ostrosti pracovníků NDT. ÚNMZ, Praha, 2015
- [26] ČSN EN 13018 (015037): Nedestruktivní zkoušení – Vizuální zkoušení - Obecné zásady. ÚNMZ, Praha, 2016
- [27] TKP MD 31: Opravy betonových konstrukcí. PRAGOPROJEKT, a. s., Praha, 2008.

11. ŽIVOTOPIS

Ing. et Ing. Petr Bílek

Datum narození: 4.1. 1977, Zábřeh na Moravě

Vzdělání:

Magisterské:

2000-2004

Vysoké učení technické v Brně – VUT FSI

Specializace: Inženýrská automatizace a informatika, informatika

1995-2000

Vysoké učení technické v Brně – VUT FAST

Specializace: Konstrukce a statika staveb, betonové konstrukce

Středoškolské:

1991-1995

Střední průmyslová škola stavební v Uničově

Zaměření: Stavebnictví

Základní:

1983-1991

Základní škola v Zábřehu

Zaměření: Sportovní škola se zaměřením na lehkou atletiku

Další kvalifikace:

Autorizace ČKAIT

Autorizovaný inženýr v oboru statika a dynamika staveb – IS00

Autorizovaný inženýr v oboru zkoušení a diagnostika staveb – IZ00

Certifikace

Certifikovaný technik NDT zkoušení ve stavebnictví (akreditován ČIA, o.p.s.) Nedestruktivních měření na mostech, tunelech a pozemních stavbách.

Dosavadní praktická činnost:

říjen 2014 - srpen 2018

GEOtest, a.s., společnost zabývající se hydrogeologií, inženýrskou geologií a geotechnikou. Pozice: zpracovatel – geotechnik

září 2011 - červen 2015

Ústav stavebního zkušebnictví FAST VUT, výuka cvičení v laboratořích ÚSZK v předmětu Stavební látky, Zkušebnictví a technologie. Práce na výzkumných projektech a publikační činnost.

červen 2007 - srpen 2009

Tebodin Czech Republic, s.r.o., Projektová společnost zabývající se projektováním průmyslových staveb a technologických celků. Pozice: senior engineer – statik, betonové konstrukce

říjen 2005 - červen 2007

SKANSKA Prefa, a.s., stavební firma zabývající se prefabrikací. Oddělení projekce vytvářející realizační a výrobní dokumentaci prefabrikovaných staveb. Pozice: projektant – statik

říjen 2002 - říjen 2005

Ing. - Software Dlubal, s.r.o., softwarová firma produkující statický software využívající metodu konečných prvků a to RFEM, RSTAB. Pozice: analytik – statik

Znalosti softwaru:

OS, kanc. aplikace:

Windows, MS Office

pokročile

DTP:

CorelDRAW

pokročile

CAD:

AutoCAD, CADKON RCD, RECOC

pokročile

FEM:

RFEM, RSTAB, SCIA, ANSYS

pokročile

Geotech. aplikace:

GEO 5, Soilin, PLAXIS 2D,

středně pokročile

MIDAS GTS NX

základy

Programování:

VBA, C, MATLAB, expertní systémy, programování dataloggerů

Jazykové znalosti:

Zahraniční pracovní zkušenost v roce 2008 v Německu – projekt elektrárny v Boxbergu.

Němčina

dobře slovem i písmem

Angličtina

komunikativní úroveň

Ruština

základy

12. 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 ztvdhlém 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.