

OVĚŘENÍ HOMOGENITY ZTVRDLÉHO DRÁTKOBETONU POMOCÍ OBRAZOVÉ ANALÝZY ■ VERIFICATION OF HOMOGENEITY OF HARDENED FIBRE-REINFORCED CONCRETE BY IMAGE ANALYSIS

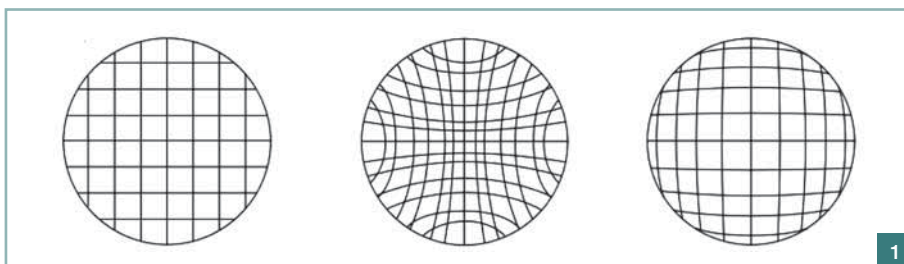
Josef Fládr, Filip Hejnic, Petr Bílý

Výhody drátkobetonu jako konstrukčního materiálu se mohou plně projevit jedině za předpokladu, že je materiál homogenní v celém rozsahu navrhovaného prvku. Dosažení rovnoměrné disperze drátků v cementové matici je technologicky náročný úkol. Neméně problematické je i následné ověření homogenity ztvrdlého materiálu. K usnadnění tohoto úkolu byl vyvinut pracovní postup a softwarový nástroj popsany v tomto článku. Podstatou metody je počítačová obrazová analýza digitální fotografie řezu drátkobetonového prvku. ■ Advantages of fibre-reinforced concrete as a structural material can be fully exploited only if the material is homogeneous in the whole element. Achieving even distribution of the fibres in the cement matrix is a demanding task from the technological point of view. No less problematic is the subsequent verification of homogeneity of the hardened material. To facilitate this task, a working procedure and a software tool described in this paper were developed. The method is based on an image analysis of a digital photography of the section of a fibre-reinforced concrete member.

Drátkobeton můžeme označit za homogenní, jestliže obsahuje ocelová vlákna orientovaná všemi směry a rovnoměrně rozložená v celém objemu. Tento požadavek vychází z technického předpisu TP FC 1-1 [1].

Polohu prutů betonářské výztuže v železobetonu lze vizuálně zkontrolovat před jejich zabetonováním. V případě drátků, které ztužují strukturu drátkobetonu, není tato kontrola uskutečnitelná. Vyhodnocení homogenity ztvrdlého materiálu může probíhat různými způsoby:

- vizuální kontrola – odborný pohled na řez vzorkem,
- manuální vyhodnocení – ruční změření souřadnic jednotlivých drátků v řezu vzorku, matematické vyhodnocení rovnoměrnosti rozptýlení,
- mechanická separace – rozdrčení drátkobetonových vzorků, spočítání počtu drátků v různých vzorcích a porovnání,
- elektromagnetické metody – stanovení procenta drátků ve směru jednotlivých os na základě elektrické vodivosti materiálu (např. přístroj BSM100 [2]),
- hloubková magnetická sonda – sledování změny intenzity magnetického



pole ve vývrtu v drátkobetonovém prvku umožňuje odhadnout koncentraci drátků v různých místech vzorku [3],

- rentgenová tomografie – vytvoření 3D snímku rozmístění drátků uvnitř prvku pomocí CT scanneru a následné počítačové zpracování [4].

Všechny uvedené přístupy mají určité nevýhody. První přístup je neobjektivní, druhý časově neefektivní, třetí pracný a nepřesný, čtvrtý až šestý vyžadují použití speciálního přístrojového vybavení, které není běžně k dispozici a je finančně nákladné. Žádná z uvedených metod proto nedokáže uspokojit základní požadavky výzkumníků i projektantů – poskytnout přesné výsledky s nízkými náklady v krátkém čase.

Tento článek představuje novou metodu vyhodnocení homogenity vláknobetonu, která nemá žádnou ze zmíněných nevýhod metod stávajících.

PRINCIP METODY OBRAZOVÉ ANALÝZY

Metoda obrazové analýzy je založena na počítačovém vyhodnocení digitálního snímku řezu drátkobetonového vzorku. Využívá se přitom odlišné světelné odrazivosti lesklých ocelových drátků a matné cementové matrice. Při správném úhlu dopadu světla dochází k jeho výraznému odrazu od řezných ploch čerstvě přeříznutých drátků. Čím větší je kontrast mezi drátkem a maticí, tím vyšší je pravděpodobnost správné detekce drátků v řezu.

Jak bude patrné z dále uvedeného popisu, metoda je rychlá a jednoduchá na provedení, nevyžaduje žádné speciální přístrojové vybavení a poskytuje přesné a objektivní výsledky. Metodu lze použít na staveništi i v laboratoři. Pro pořízení fotografie je nutné mít k dispozici pouze vhodný fotoaparát, stativ, jednobarevnou textilií, délkové měřidlo a zdroj světla. Světelným zdrojem nemusí být drahá

záblesková světla, postačí běžné stavební halogenové svítidlo.

POŘÍZENÍ FOTOGRAFIE

Pořízení fotografie je klíčovým bodem celé analýzy. Měl by být volen fotoaparát s dostatečným rozlišením, optimálně alespoň 8 Mpx. Vyšší rozlišení fotoaparátu snižuje riziko vzniku tzv. sporných obrazových pixelů, u kterých může později mít softwarový vyhodnocovací algoritmus problém určit, zda se jedná o drátek či cementovou matici.

Při snímání objektu nesmí dojít k jeho distorzi – soudkovitému nebo poduškovitému zkreslení (obr. 1). Pro zcela dokonalý výsledek je nutné použít profesionální fotoaparát s pevným sklem se střední ohniskovou vzdáleností [5]. V praxi je při použití klasického fotoaparátu se zoomovým objektivem dostačující, pokud je fotografie pořizována z dostatečné vzdálenosti od objektu tak, aby distorzní zkreslení nebylo patrné prostým okem. Distorze by vedla ke zkreslení výsledků, neboť program by špatně určil jak celkovou plochu snímaného průřezu, tak i pozice jednotlivých drátků.

Důležité je také nastavení fotoaparátu z hlediska vyvážení bílé. Vyvážení bílé je ve fotografii označení pro úkon spočívající v barevném vyrovnání předmětu snímání (a jeho světelných podmínek) tak, aby se zachycený obraz co nejlépe shodoval s podáním barev, jak je vnímá lidské oko. Pro pořizování snímků za standardních světelných podmínek je přijatelná volba automatického vyvážení bílé. V případě umělého osvětlení či focení s bleskem je však vhodnější manuální nastavení podle aktuálních světelných podmínek. Automat by mohl potlačit barevné rozdíly mezi drátky a cementovou maticí, které jsou pro správné vyhodnocení rozhodující.

Významným aspektem pro pořízení kvalitní fotografie je také volba poza-



2

3

4

dí. Nejvhodnější je jednobarevné matné pozadí. Autorům se nejlépe osvědčila černá textilie, na kterou byly umístovány zkoumané vzorky.

Klíčové je nasvícení vzorku. Zdroj světla je potřeba zafixovat v poloze, ve které dochází k nejvýraznějšímu odrazu světelných paprsků od řezných ploch drátků. Pro fixaci polohy zdroje světla je vhodné použít stativ.

Jak již bylo řečeno, metoda pracuje se snímky řezů drátkobetonových těles. Řezy jsou prováděny pomocí pil na beton vybavených vodním chlazením a při procesu řezání tedy dochází ke smočení řezné plochy. Při fotografování však nesmí být povrch potažen vodním filmem, který by zvýšil jeho odlesk, a tím redukoval kontrast mezi drátky a cementovou maticí. Proto je vhodné osušit povrch například savou textilií. Řezné plochy je navíc nutné vyfotografovat co nejdříve po provedení řezu, dokud nedojde ke korozi drátků.

ÚPRAVA SNÍMKU

Před vyhodnocením digitálních snímků je nutné provést v libovolném grafickém programu jejich oříznutí (obr. 2). Dále je potřeba stanovit skutečné rozměry oblasti vzorku zobrazené na fotografii. Nejjednodušším způsobem je přiložení libovolného délkového měřidla ke zkoumanému vzorku při pořizování fotografie.

Vhodné (nikoliv však nutné) je také provedení dodatečných úprav snímku pro zvýšení kontrastu mezi drátky a cementovou maticí (obr. 3). Použit lze libovolný grafický software, který je k dispozici.

VYHODNOCENÍ FOTOGRAFIE

Vyhodnocení je nejjednodušší částí, protože probíhá pomocí intuitivního programu ASEF (Automatic Specimen Evaluation of Fibres), který byl pro tyto účely vyvinut. ASEF je naprogramován v jazyce MATLAB, k jeho využití však

není nutné vlastnit licenci softwarového balíku MATLAB. Uživatel si vystačí pouze s instalací volně dostupné knihovny MATLAB Compiler Runtime (MCR).

V prvním kroku dojde k načtení upraveného snímku, zadání jeho rozměrů a průřezové plochy jednoho drátku (obr. 5a). V načteném snímku je nutno kurzorem specifikovat barvu odpovídající drátkům. Následně je spuštěn detekční algoritmus, který vyhledá na fotografii pozice jednotlivých drátků. Načtené drátky jsou barevně označeny (obr. 5b), jsou zaznamenány souřadnice jejich těžišť a výsledky jsou zpracovány do číselné i grafické podoby (obr. 5c,d). Výsledky je možné exportovat do různých datových formátů (zejména .jpg a .xlsx) pro další zpracování.

Výsledkem analýzy jsou dva grafy.

Obr. 1 Rastr nasnímaného objektu:

a) správně, b) poduškovité zkreslení, c) soudkovité zkreslení [6] ■

Fig. 1 Undistorted grid: a) correct,

b) pincushion distortion, c) barrel distortion [6]

Obr. 2 Fotografie příčného řezu krychle

z drátkobetonu ■ Fig. 2 Image of section of a cube fibre-reinforced concrete specimen

Obr. 3 Fotografie po úpravě kontrastu

a vyvážení barev v grafickém softwaru za účelem usnadnění detekce drátků ■

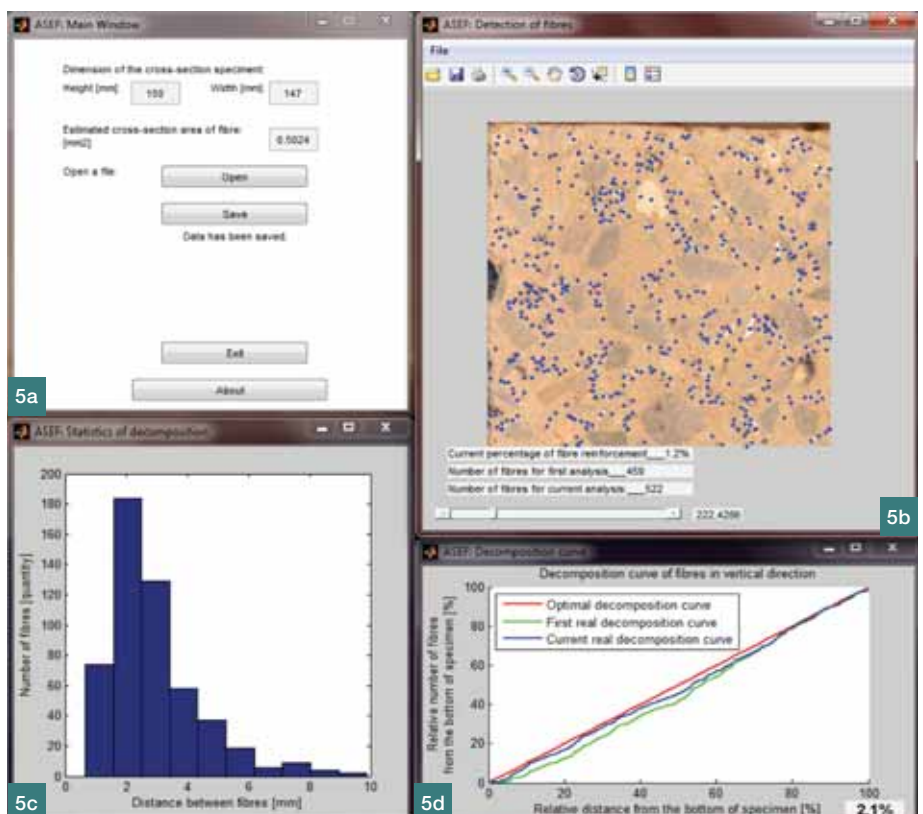
Fig. 3 Image after adjustment of contrast and colour balance in a graphic software. The aim was to facilitate detection of fibres

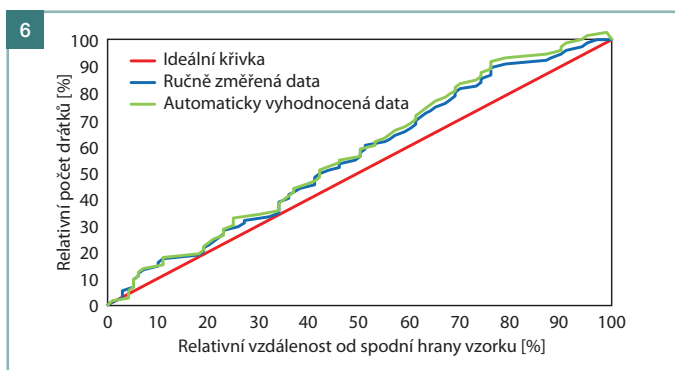
Obr. 4 Pozice drátků detekované programem

ASEF na fotografii z obr. 2 ■ Fig. 4 Coordinates of fibres detected by ASEF software in the image in Fig. 2

Obr. 5a až d Vyhodnocení snímku

v programu ASEF ■ Fig. 5a to d Image analysis in ASEF software



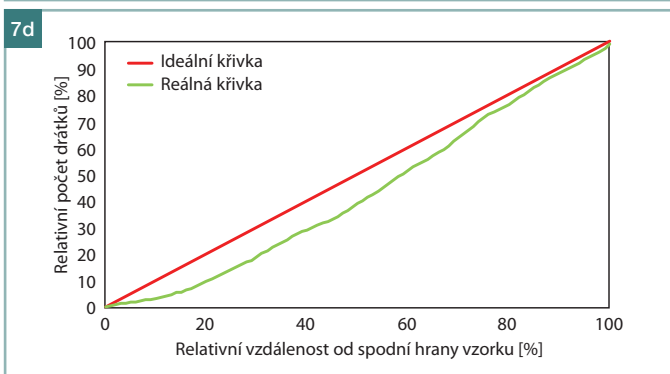
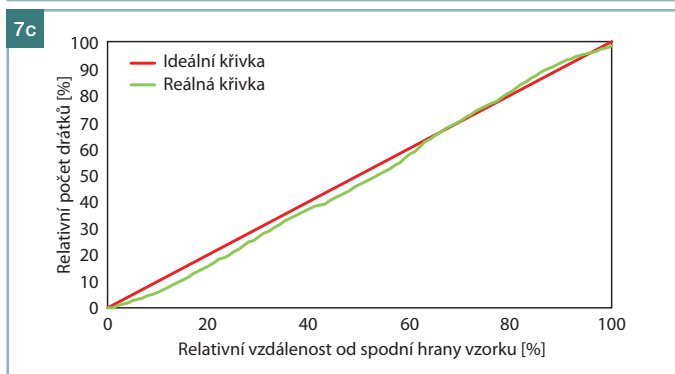
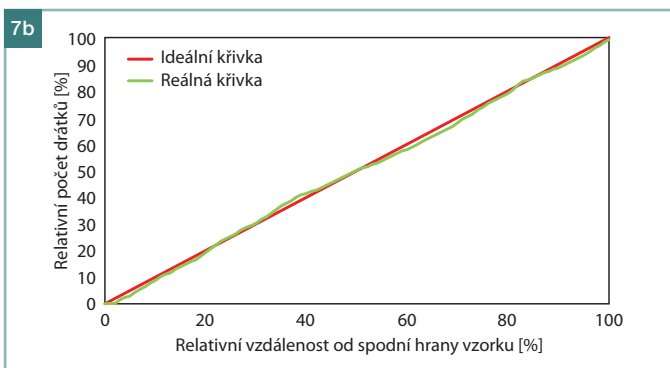
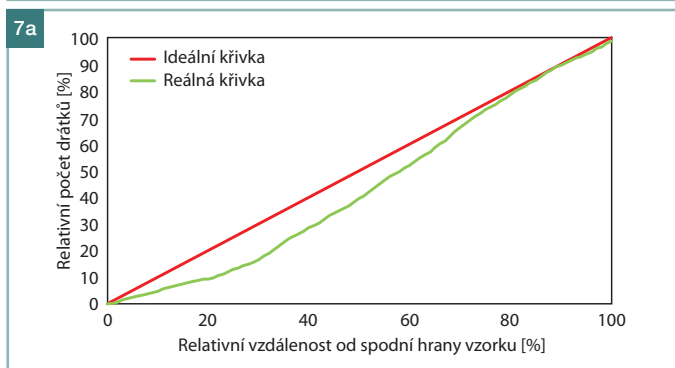


Obr. 6 Porovnání rozložení drátků stanoveného ručně a programem ASEF
Fig. 6 Comparison of fibre distribution determined manually and by ASEF software

Obr. 7 Rozložení drátků v jednom ze vzorků: a) série D1, b) série D2, c) série D3, d) série D4
Fig. 7 Distribution of fibres in one of the specimens: a) of D1 series, b) of D2 series, c) of D3 series, d) of D4 series

Tab. 1 Použité receptury pro výrobu vzorků
Tab. 1 Mixtures of specimens

Označení	Cement [kg]	Voda [kg]	Frakce	Kamenivo [kg]	Drátky [kg]
D1	500	202	0/4 + 4/8	874 + 700	120
D2	500	202	0/4	1 442	120
D3	600	228	0/2	1 308	120
D4	800	240	0/1	1 041	120



V první řadě se jedná o histogram četností, který zobrazuje skupiny drátků s danou maximální vzdáleností od nejbližšího sousedního drátku (obr. 5c). Pro zcela homogenní materiál by měly být všechny drátky stejně daleko od sebe, histogram by se tedy skládal pouze z jednoho sloupce. V praxi lze za homogenní považovat takový materiál, který má v histogramu skupinu dvou až tří dominantních sousedících sloupců, ostatní sloupce by měly být nevýznamné.

Hlavním výsledkem je pak křivka porovnávací skutečné rozložení drátků po průřezu s rozložením ideálním (obr. 5d). Jedná se o součtovou čáru zobrazující závislost relativního počtu drátků na relativní vzdálenosti od spodního okraje vzorku. V ideálním případě naprosto rovnoměrného rozdělení vláken by závislost měla mít tvar přímky se sklonem 1 : 1. Čím více se skutečná křivka blíží tomuto stavu, tím lepší je homogenita materiálu. Pro rychlou porovnatelnost výsledků je pod grafem vyčíslena procentuální odchylka skutečné

křivky od křivky ideální Δ . Číslo se stanoví jako průměr odchylek v jednotlivých bodech křivky podle vztahu

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |k_i - j_i| \quad (1)$$

kde n je počet bodů křivky, k_i relativní počet drátků v daném bodě skutečné křivky a j_i relativní počet drátků v daném bodě ideální křivky.

Program provede v prvním kroku analýzu zcela automaticky. Pokud není uživatel spokojen s kvalitou detekce drátků (např. pokud program omylem detekuje jako drátky i některá zrna kameniva nebo naopak některé drátky nenalezne), může ručně upravit parametr citlivosti výběru (posuvník v pravém horním okně programu na obr. 5b). Program provede novou analýzu, kterou porovná s analýzou původní. Na obr. 5d je křivka rozložení drátků stanovená podle automatického výběru zobrazena zelenou barvou, křivka po ruční úpravě má barvu modrou, křivka ideální je červená.

OVĚŘENÍ FUNKCE PROGRAMU

Správnost vyhodnocovací funkce programu ASEF byla ověřena na sérii zkušebních vzorků vyrobených z drátkobetonu s obsahem ocelových vláken 30 kg/m³. Nízký obsah drátků byl volen z důvodu ručního postupu ověření, který spočíval v manuálním změření pozice každého drátku v průřezu. Zkušebními tělesy byly krychle o hraně 150 mm, které byly rozříznuty na poloviny. Při zvolené dávce se počet drátků v jednom řezu pohyboval okolo 75. Výsledné porovnání pro jeden ze vzorků je zobrazeno na obr. 6. Je patrná vynikající shoda.

APLIKACE PROGRAMU

Popsaná metoda obrazové analýzy byla využita pro stanovení vlivu velikosti zrn kameniva na rovnoměrnost rozptýlení ocelových vláken v drátkobetonu s vysokým obsahem drátků. Pro účely tohoto výzkumu byly vyrobeny vždy tři zkušební krychle o hraně 150 mm pro čtyři různé receptury, které jsou uvedeny v tab. 1.

Literatura:

- [1] KRÁTKÝ, J., VODIČKA, J., VAŠKOVÁ, J., DRAHORÁD, M. TP FC 1-1 Technické podmínky 1. Vláknobeton – část 1: Zkoušení vláknobetonu, vyhodnocení destruktivních zkoušek a stanovení charakteristického pracovního diagramu vláknobetonu pro navrhování vláknobetonových konstrukcí. Českomoravský beton, 2009.
- [2] VÍTEK, J. L., SMIŘINSKÝ, S., VESELÝ, P., VESELÝ, V. Rozptyl parametrů drátkobetonu ve vazbě na způsob jeho výroby. In: *Sborník konference Fibre Concrete 2013*. Praha, 2013.

- [3] HELA, R., BÍLEK, P., VALA, J., VODIČKA, J. *Nová srovnávací měření při kontrole homogenity drátkobetonu* [online]. TZB-info [cit. 2013-03-18]. Dostupný z [www: http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/9664-nova-srovnavaci-mereni-pri-kontro-le-homogenity-dratkobetonu](http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/9664-nova-srovnavaci-mereni-pri-kontro-le-homogenity-dratkobetonu)
- [4] EIK, M., PUTTONEN, J., HERRMANN, H. Fibre orientation phenomenon in concrete composites: measuring and theoretical modelling. In: *Sborník konference Fibre Concrete 2013*. Praha, 2013.
- [5] HELA R., PŘÍKRYL J. Stanovení povrchové

- pórovitosti pohledových betonů. *Beton TKS*. 2008, roč. 8, č. 6, s. 52–54.
- [6] ABBAS. Slovníček pojmů machine vision. *Analyza-obrazu.cz* [online]. Dostupné z: <http://www.analyza-obrazu.cz/strojove-videni/slovnicek-pojmu/>
- [7] FLÁDR, J., BROUKALOVÁ, I., BÍLÝ, P. Determination of Conversion Factors for Compressive Strength of UHPC Measured on Specimens of Different Dimensions. In: *Proceedings of the RILEM-fib-AFGC Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*. Marseille, Francie, 2013, s. 731–738.

Do vzorků byla rozptýlena krátká vlákna Dramix OL 13/60. Tato vlákna byla zvolena z důvodu kompatibility s použitým kamenivem. Při použití delších vláken by jistě došlo k segregaci drátků u kameniva s frakcí 0/1.

Během výroby vzorků byl dodržován stejný technologický postup pro všechny vyráběné vzorky. Hlavní důraz byl kladen na stejnou dobu hutnění vzorků. Po výrobě byly všechny krychle rozděleny dvěma řezy na tři tělesa o velikosti 150 × 150 × 50 mm. Řez byl vždy veden rovnoběžně se směrem hutnění. Následně byly řezné plochy podrobeny analýze programem ASEF. Výsledné křivky popisující rovnoměrnost rozložení drátků po průřezu jsou zobrazeny na obrázcích 7a až 7d.

Nejhorší rozdělení drátků bylo zjištěno u série D4, kde bylo dosaženo průměrné odchylky od ideálního rozdělení 7,7 %. Tato skutečnost pravděpodobně souvisí s velmi jemnou zrnitostí směsi. Největší zrno plniva mělo rozměr pouze 1 mm, značná část plniva byla nahrazena cementem. Během hutnění došlo k segregaci drátků při spodním povrchu, jak je patrné z křivky na obr. 7d, kde je zřetelné výrazné odchýlení od ideálního průběhu v počáteční části. Vzorky ze sérií D3 a D2 dosáhly vynikající homogenity, odchylka od ideálního rozdělení drátků byla 2,4 % pro sérii D3 a 1 % pro sérii D2. V případě série D1 byla opět zjištěna špatná distribuce

ocelových vláken, kdy se rozložení drátků v průměru odchylovalo od optima o 6,4 %. Tato skutečnost byla pravděpodobně způsobena nevhodnou křivkou zrnitosti kameniva, kterou se nepodařilo vyhladit na přechodu mezi jednotlivými frakcemi.

ZÁVĚR

Obrazová analýza s podporou výpočetní techniky je velmi zajímavou alternativou k dostupným metodám pro hodnocení homogenity ztvrdlého drátkobetonu. Metoda je levná, rychlá a jednoduchá na provedení na stavbě i v laboratoři. Po rozříznutí vzorku pilou na beton a jeho osušení se vzorek nasvítí (např. staveništním halogenovým světlem), vyfotí (postačí středně kvalitní digitální fotoaparát), fotografie se upraví v běžně dostupném grafickém programu a podrobí se analýze v programu ASEF. Výsledkem je jasná, srozumitelná a objektivní informace o homogenitě ztvrdlého drátkobetonu.

Využití programu ASEF je možné na základě licence pro výzkumné i komerční účely. Ve fázi vývoje a ověřování vlastností nového materiálu lze díky použití obrazové analýzy snížit počet zkušebních těles, a tím i pracovních hodin nutných pro optimalizaci nové receptury drátkobetonu. V průběhu realizace stavebního díla program poslouží pro průběžnou kontrolu homogenity vyráběného materiálu, jež je naprosto

klíčovým parametrem, neboť odolnost konstrukce je dána odolností jejího nejslabšího místa. Je-li produkován nehomogenní materiál, hrozí porušení konstrukce při nižším než projektovaném zatížení a následně velké ekonomické ztráty v souvislosti s opravou.

Pomocí obrazové analýzy bylo prokázáno, že drátkobeton obsahující až 120 kg drátků na 1 m³ betonu lze vyrobit s výbornou homogenitou, pokud je odpovídajícím způsobem upravena čára zrnitosti kameniva. Drátkobeton s takto vysokým množstvím drátků se běžně nepoužívají, ale u speciálních betonů, jako jsou vysokohodnotné betony, je možné se setkat i s takto vysokým dávkováním ocelových vláken [7].

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory projektu GAČR 14-19561S Cementové kompozity v náročných podmínkách prostředí.

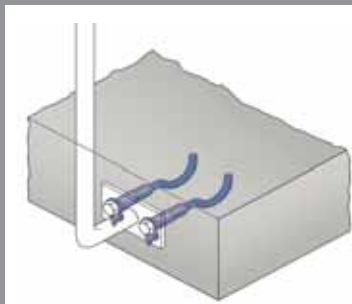
Ing. Josef Fládr
e-mail: josef.fladr@fsv.cvut.cz

Ing. Filip Hejnic
e-mail: filip.hejnic@fsv.cvut.cz

Ing. Petr Bílý
e-mail: petr.bily@fsv.cvut.cz



všichni: Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných konstrukcí



DB-KOTVY PFEIFER – ETA JIŽ ŽÁDNÉ VRTÁNÍ A PORUŠENÍ VÝZTUŽE!

Kotvy PFEIFER DB 682 garantují bezpečné trvalé zakotvení v betonu. Správný návrh pomocí návrhového softwaru PFEIFER Suite. Snadná, rychlá a čistá montáž díky předem zabetonovaným kotvám.



JORDAHL & PFEIFER Stavební technika, s.r.o.

www.jpcz.cz