

# SLEDOVÁNÍ ANOMÁLNÍHO ROZMÍSTĚNÍ DRÁTKŮ V KALIBRAČNÍCH VZORCÍCH DRÁTKOBETONU POČÍTAČOVOU TOMOGRÁFIÍ ■ MONITORING OF ANOMALOUS DISTRIBUTION OF WIRES IN THE CALIBRATION SAMPLES OF FIBER CONCRETE BY COMPUTED TOMOGRAPHY

Leonard Hobst, Petr Bílek,  
Ondřej Anton, Tomáš Zikmund

Počítačová tomografie (CT) patří k nedestruktivním metodám, které mají velké vypovídací schopnosti. Kromě předností má však tato metoda i svá omezení, na která je nutno při jejím uplatnění brát zřetel.

V příspěvku je obecně popsána CT metoda a na praktickém příkladu – tomografickém vyšetření kalibračních vzorků z drátkobetonu – jsou popsány její možnosti a omezení. Kalibrační vzorky drátkobetonu, se stanovenou koncentrací drátků, byly speciálně vyrobeny pro nakalibrování magnetických sond, vyvinutých v rámci výzkumného úkolu na FAST VUT v Brně. Při kalibraci však některé vzorky vykazovaly anomální výsledky, a proto byly tyto vzorky podrobeny kontrole CT metodou, která prokázala nepravidelné rozdělení drátků v kontrolovaných vzorcích. ■

Computed tomography (CT) belongs among the non-destructive methods which are characterized by a high explanatory power. This method has its advantages and also limitations and in case this very method is applied, its limitations must be taken into account.

The CT method is generally described in this contribution, and its capabilities and limitations are explained in a practical example – CT monitoring of calibration fibre concrete samples. The calibration fibre concrete samples with a determined fibre concentration were specially produced for calibrating the magnetic probes which were developed in the framework of a research project at the Brno University of Technology, Faculty of Civic Engineering. Some calibration samples showed anomalous results and hence such calibration samples were tested using the CT method which proved irregular fibre distribution in the tested samples.

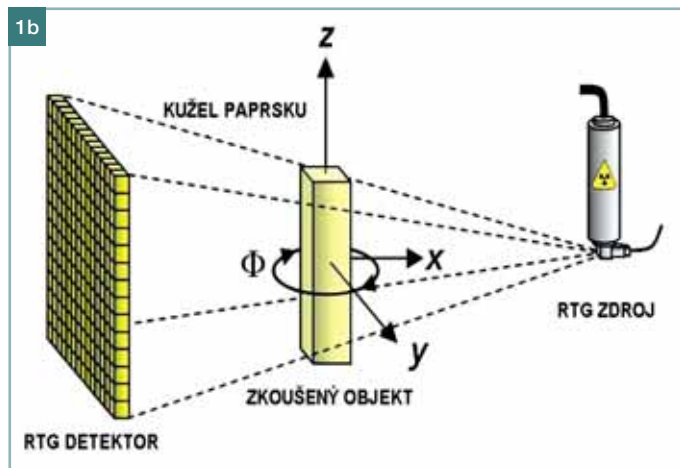
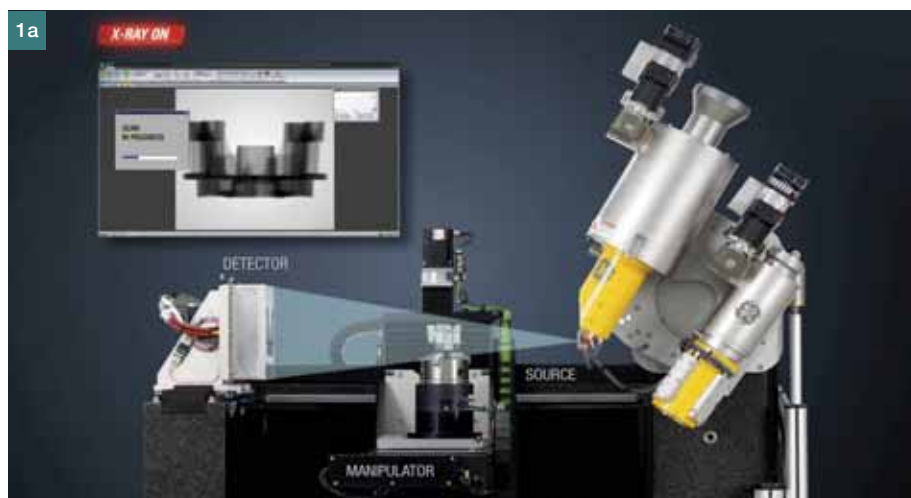
Jedním z cílů nedestruktivních metod kontroly je stanovení co nejvíce základních údajů o zkoušených materiálech bez jejich porušení. K tomu se dají využít metody založené na různých fyzikálních principech. K nejučinnější metodě, co se vypovídací schopnosti týče, patří počítačová tomografie (Computed Tomography, CT). Ta se již po řadu let využívá v lékařské diagnostice, ale v průmyslových aplikacích je však stále v rozvoji. Týká se to i stavebnictví, kde údaje o využití počítačové tomografie jsou velmi kusé.

K prvním zmínek o jejím využití ve stavebnictví patřil článek [1]. Jeho autor v něm stručně popisuje své zkušenosti při zjišťování vnitřní struktury betonu z hlediska rozložení kameniva v cementové matici a obsahu vzduchu ve vzorcích betonu. Při vhodném nastavení a filtraci lze jednotlivé složky samostatně zobrazit. Při této kontrole byl využit lékařský tomograf. Nevýhodou lékařských tomografů však je to, že se zdroj záření a detektor synchronně pohybují nad stacionárním kontrolovaným objektem (pacientem).

U průmyslových tomografů je zdroj záření a příslušný detektor stacionární a pohybuje se (rotuje) kontrolovaný objekt. Tím je možné dosáhnout preciznějších výsledků.

## PRŮMYSLOVÁ POČÍTAČOVÁ TOMOGRÁFIE

Počítačová tomografie je zobrazovací metoda, která umožňuje trojrozměr-



ně stanovit vnitřní strukturu materiálu. Obdobně jako rentgenografie využívá při zobrazení vnitřní struktury materiálu rentgenové záření, ale na rozdíl od rentgenografického zobrazení, které je dvourozměrné (2D), umožňuje tomografie zobrazit kontrolovaný předmět třírozměrně – prostorově (3D) [5].

Zjednodušeně lze princip počítačové tomografie zobrazit na schématu prozařování (obr. 1b). Zkoušený předmět je pevně umístěn na manipulační stolek tomografu mezi zdrojem záření (rentgenem) a plošným detektorem záření, tvořeným maticí miniaturních detektorů. Při otáčení stolku během činnosti tomografu plošný detektor zaznamenává postupnou změnu procházejícího rentgenového záření. Data změny intenzity záření snímaná detektorem jsou průběžně ukládána do počítače, kde dochází k vyhodnocení a zpětné rekonstrukci vnitřní struktury sledovaného vzorku, za pomoci specializovaného softwaru.

#### LABORATOŘ RENTGENOVÉ MIKRO- A NANOTOMOGRAFIE

Při řešení specifického výzkumu zaměřeného na vývoj magnetických sond na kontrolu koncentrace drátků v drátkobetonových konstrukcích bylo po-

třeba zhotovit řadu kalibračních vzorků s různou koncentrací drátků a to od 0,3 do 1,2%. Při kalibraci nové sondy se však u některých vzorků vyskytly anomální výsledky, které neodpovídaly deklarované koncentraci drátků ve vzorcích. Byl proto vysloven předpoklad, že u vzorků došlo (i přes pečlivou přípravu) k nepravidelnému rozmišení drátků. Pro potvrzení tohoto předpokladu bylo rozhodnuto využít počítačové tomografie a „podezřelé“ vzorky podrobně vyšetřit. Měření, jejichž cílem bylo určit přesné rozložení drátků u dvou vybraných kalibračních drátkobetonových vzorků vykazujících největší anomálie (obr. 2), byla provedena v Středoevropském technologickém institutu CEITEC

Středisko disponuje nejmodernějším počítačovým tomografem GE phoenix v|tome|x L240, osazeným rentgenkou o max. napětí 240 kV (obr. 3). Tomograf je umístěn ve „stíněném kabinetu“ (obr. 4), takže na pracovišti není třeba přijímat zvláštní bezpečnostní opatření. Speciální plošný detektor, kterým je tomograf osazen, má aktivní oblast  $410 \times 410$  mm, což odpovídá hustotě  $2\,048 \times 2\,048$  pixelů (při použitém rozměru pixelu  $200 \times 200$   $\mu\text{m}$ ). To umožňuje snímání vnitřní struktury trojroz-

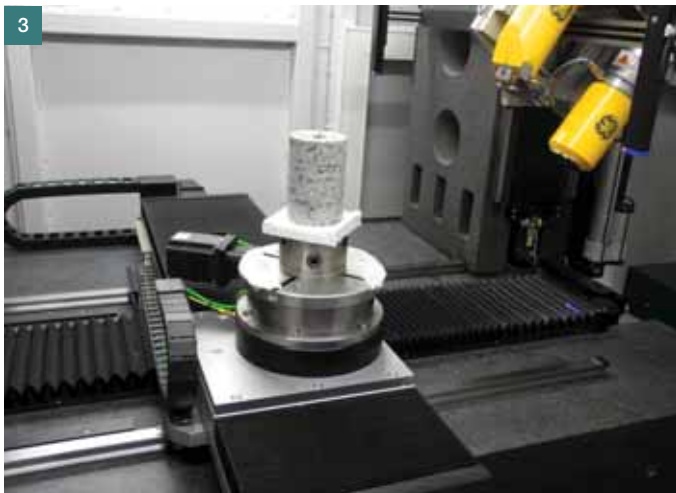
měrných předmětů s vysokým prostorovým rozlišením.

#### TOMOGRAFICKÉ VYŠETŘENÍ KALIBRAČNÍCH VZORKŮ

Pro kontrolu počítačovou tomografií byly vybrány dva kalibrační vzorky drátkobetonu, které při kalibraci magnetických sond vykazovaly anomálie v měření.

První kalibrační vzorek drátkobetonu byl pro snadnější vyhodnocování při tomografické kontrole upraven tak, že tvořil válec průměru 100 mm a délky 150 mm, jehož středem prochází otvor průměru 25 mm pro umístění magnetické sondy, která se používá pro stanovení koncentrace drátků v drátkobetonových konstrukcích (obr. 2). Válec byl pevně umístěn do manipulátoru tomografu a po uzavření stínících dveří přístroje (obr. 4) došlo k postupnému prozařování kalibračního vzorku.

Následným matematickým zpracováním byly rekonstruovány virtuální řezy vzorku. Tato data byla získána s voxelovým rozlišením 100  $\mu\text{m}$  (voxel = „třírozměrný pixel“). Počítačovým softwarem bylo možné z těchto řezů vyseparovat drátky a vytvořit 3D model vzorku. Zpracování tomografických dat snímaného vzorku trvalo více než 2 h.



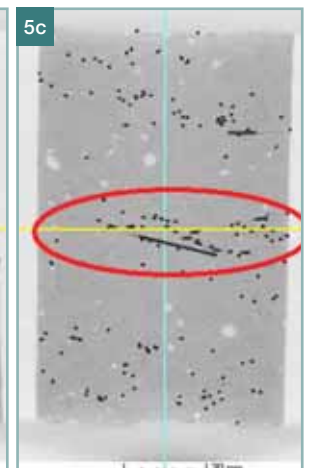
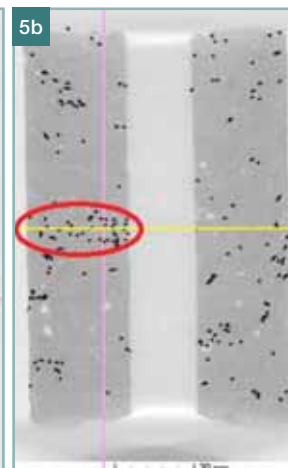
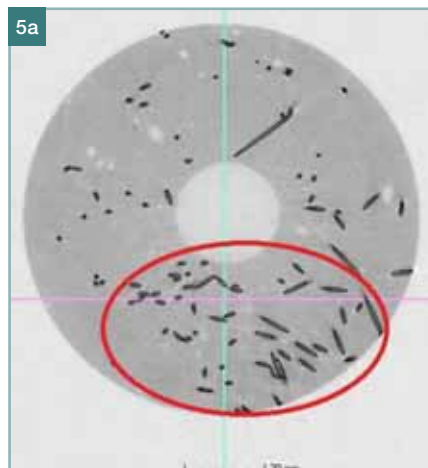
Obr. 1 Schéma průmyslového tomografu ■ Fig. 1 Industrial tomograph scheme

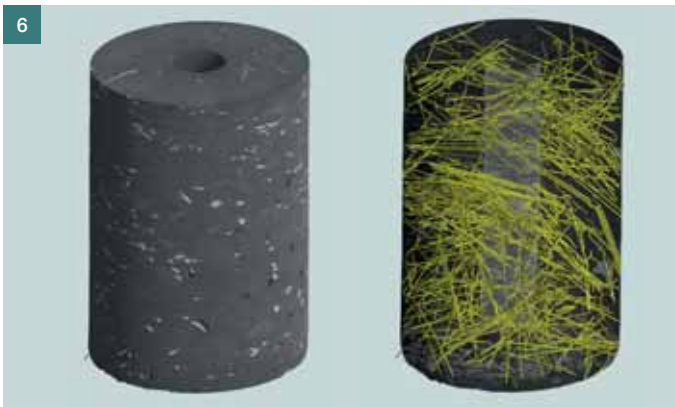
Obr. 2 Testované kalibrační vzorky ■ Fig. 2 Tested calibration samples

Obr. 3 Válcový vzorek, upevněný v manipulátoru ■ Fig. 3 Cylindrical sample fixed to the manipulator

Obr. 4 Stíněný „kabinet“ tomografu ■ Fig. 4 Shielded “cabinet” tomograph

Obr. 5a, b, c Jednotlivé CT snímky kalibračním vzorkem s vyznačením shluků drátků ■ Fig. 5a, b, c Individual CT images of the sample with fibre clusters



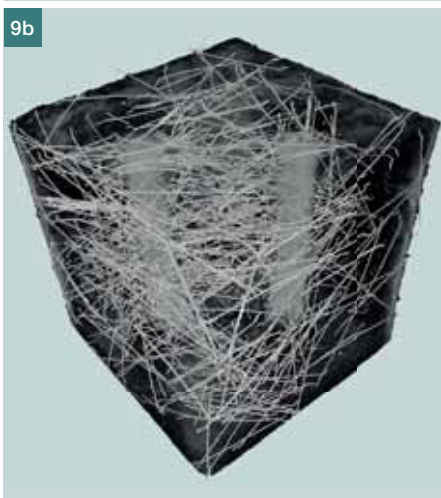
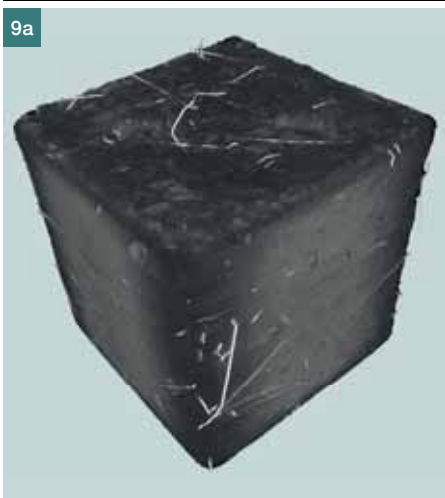
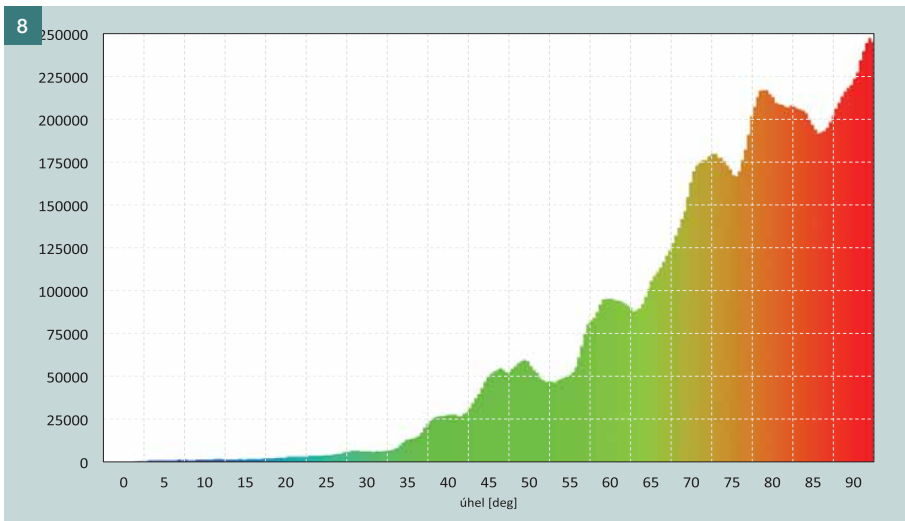
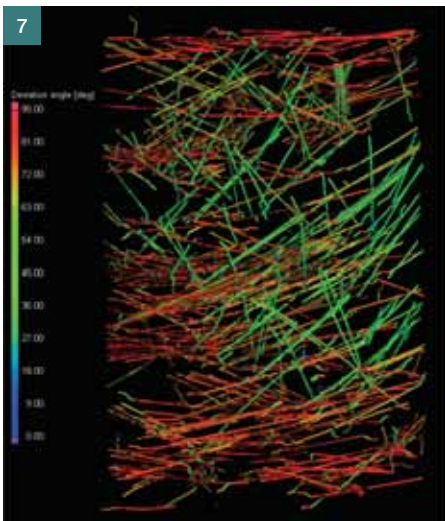


Obr. 6 Axonometrické zobrazení transparentního vzorku válce s drátky ■ Fig. 6 Axonometric image of a transparent sample cylinder with wires

Obr. 7 Axonometrické zobrazení separovaných drátků ve válci se směrovou analýzou ■ Fig. 7 Axonometric image of separated fibres in the cylinder sample with directional analysis

Obr. 8 Histogram směrové analýzy – orientace směru vláken ve válci ■ Fig. 8 Histogram directional analysis – orientation direction of the fibres in the cylinder

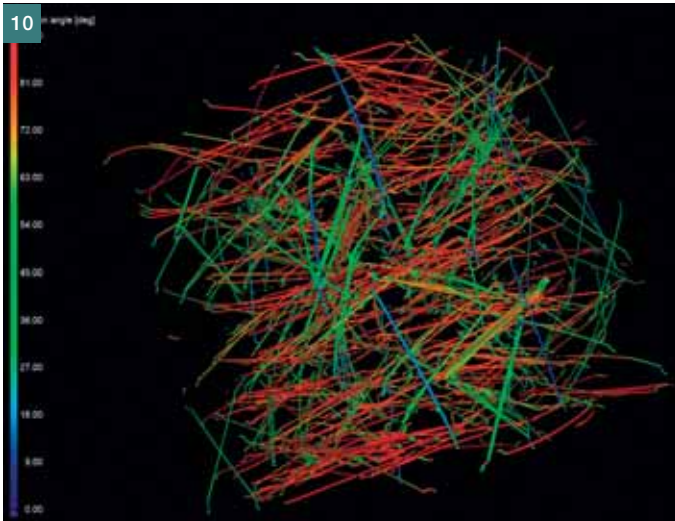
Obr. 9 Axonometrické zobrazení transparentního vzorku krychle s drátky ■ Fig. 9 Axonometric image of a transparent sample cube with wires



Výsledkem je axonometrické zobrazení kalibračního válce s rozložením jednotlivých drátků. Toto axonometrické zobrazení tělesa lze „řezat“ ve všech třech osách (x, y a z) a je možné v tomto tělese najít „anomálie“, které byly příčinou odchýlných výsledků při kalibraci magnetické sondy (obr. 5).

K další analýze tomografických dat se využívá speciální modul 3D vizualizačního software Volume Graphics Studio Max 2.2 pro analýzu vláken kompozitního materiálu (obr. 6), který umožňuje kvantitativní posouzení rozložení drátků barevným axonometrickým zobrazením (obr. 7). Pro provedení směrové analýzy vláken je pak možné zobrazit histogram směrů a určit tak převládající směr vláken (obr. 8).

Jako další byla odzkoušena drátko-betonová krychle. Větší rozměry krychle však způsobily, že se snížila rozzeznatelnost drátků uvnitř krychle a vnitřek krychle proto nešel jednoznačně vyhodnotit. Bylo proto využito obdobného tomografu, avšak s vyšším výkonem rentgenky, a to až 300 kV. Při tomto vyšším napětí bylo možné s úspěchem prozářit a počítačově zpracovat i krychli o hraně 150 mm (obr. 9 a 10).



Obr. 10 Axonometrické zobrazení separovaných drátků v krychli se směrovou analýzou ■ Fig. 10 Axonometric image of separated fibres in the cube sample with directional analysis

## Literatura:

- [1] Balazs G. L., Lublóy É.: Možnosti použití počítačové tomografie (CT) ke studiu betonu. Beton TKS 6/2013. p. 43–45. ISSN 1213-3116
- [2] Bílek P., Hobst L.: Ověřování homogenity drátkobetonu na kalibračních vzorcích vyvíjenou magnetickou metodou, Sanace betonových konstrukcí, roč. 2012, č. 1, s. 278–284. ISSN: 1211- 3700
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Zikmund T., Petrilak M., Kaiser J.: Rentgenová počítačová tomografie pro analýzu odlišků, defektoskopii a kontrolu rozměrů, In Sborník recenzovaných příspěvků 2013 konference Zkoušení a jakost ve stavebnictví, 2013, s. 429–438. ISBN: 978-80-214-4777- 6

## ZÁVĚR

Kontrola počítačovým tomografem potvrdila předpoklad, že v drátkobetonových vzorcích došlo k nepravidelnému rozmísení drátků (obr. 7 až obr. 10), 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 svá omezení. I když drátkobetonový válec o průměru 100 mm nebyl pro počítačový tomograf problém, drátkobetonové kostky o hraně 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.

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu FAST-S-14-2490 a v rámci CEITEC – Středoevropského technologického institutu s pomocí výzkumné infrastruktury financované projektem CZ.1.05/1.1.00/02.0068 z Evropského fondu regionálního rozvoje.

prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.  
e-mail: hobst.l@fce.vutbr.cz  
tel.: 541 147 836



Ing. Ondřej Anton, Ph.D.  
e-mail: anton.o@fce.vutbr.cz  
tel.: 541 147 823



oba: VUT v Brně  
Fakulta stavební, ÚSZK  
Veveří 95, 602 00 Brno  
www.fce.vutbr.cz

Ing. et Ing. Petr Bílek  
VUT v Brně, ÚSI  
Údolní 53, 602 00 Brno  
e-mail: petr.bilek@usi.vutbr.cz  
tel.: 541 147 829  
www.usi.vutbr.cz



Ing. Tomáš Zikmund  
CEITEC VUT v Brně  
Technická 3058/10, 616 00 Brno  
e-mail: tomas.zikmund@ceitec.vutbr.cz  
tel.: 541 142 875  
www.ceitec.vutbr.cz



## REŠERŠE ZE ZAHRANIČNÍCH ČASOPISŮ

### HOTEL NAGOLD – EIN KOMPLEXES STAHLBETON-TRAGWERK IN INNERSTÄDTISCHEM UMFELD

Holger Hinz, Christian Münich

Na první pohled neupoutá nový sedmipodlažní hotel v malém městečku Nagold ve Schwarzwald z konstrukčního hlediska ničím výjimečným. Avšak, jak to často bývá, ďábel je skrytý v detailu. Neobvykle vysoký počet přesunů podpor a míst přenosu zatížení vytvořil tvrdé požadavky na návrh konstrukce. Minimalizované podpory smykových stěn a umístění vykonzolovaných stěnových nosníků určitě stojí za zmínku. Z pohledu relativně malá budova v sobě skrývá vysokou úroveň inženýrských znalostí a dovedností a to přesto, že se inženýři-statici k návrhu budovy dostali až v pozdním stádiu, kdy už byly všechny dispoziční otázky rozhodnuty architekty a změně v uspořádání konstrukce nebyly připouštěny. Umístění v místě s významnou seismicitou a vysoký stupeň nepravidelné geometrie konstrukce si vyžádaly ověření její bezpečnosti celým spektrem různých metod.

Hinz H., Münich Ch.: Hotel Nagold – ein komplexes Stahlbetontragwerk in innerstädtischem Umfeld, Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Heft 3, s. 223–228

### ERMÜDUNGSVERSUCHE AN STAHLBETON-FERTIGTEILEN FÜR LÄRMSCHUTZWÄNDE AN EISENBAHN-HOCHGESCHWINDIGKEITSSTRECKEN

Manfred Keuser, Eugen Hiller, Roman Lenner

Ochrana proti hluku podél dopravních tras má v Německu velkou důležitost vzhledem k vysoké hustotě populace v rozsáhlých oblastech země. Železobetonové panely jsou často užívané zejména v konstrukcích protihlukových stěn podél železničních tratí. Zatížení od rychle projíždějícího vlaku způsobuje kmitání stěn a jejich možné

únavové porušení musí být proto vyšetřováno. Během posledních let byl v Laboratory of the Institute of Structural Engineering at the University of the German Armed Forces in Munich realizován velký počet zkoušek cyklického namáhání. Zvláštní pozornost byla zaměřena na poměrně úzkou oblast podpor.

Keuser M., Hiller E., Lenner R.: Ermüdungsversuche an Stahlbetonfertigteilen für Lärmschutzwände an Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsstrecken, Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Heft 4, s. 248–256

### EIN NACHWEISKONZEPT FÜR QUERKRAFT-TRAGFÄHIGKEIT VERSTÄRKTER STAHLBETONGURTE VON VERBUNDTRÄGERN IM BEREICH GROSSER STEGÖFFNUNGEN

Christian Balzer, Jürgen Schnell

Ocelová stojina kompozitního nosníku přenáší většinu působící smykové síly. Jestliže je stojina oslabena velkým otvorem, musí betonová pásnice přenést téměř celou smykovou sílu. Hlavové šrouby na horní části ocelového nosníku slouží jako smyková výztuž. V několika experimentech byla smyková kapacita nosníku významně zvýšena uspořádáním tuhých ocelových výztužných vložek v betonové pásnici nosníku v místě velkého otvoru ve stojině.

Částí výzkumného projektu řešeného na Kaiserslautern TU bylo vyšetřování vlivu tuhých smykových vložek v betonových pásnicích kompozitních nosníků s velkým otvorem ve stojině na přenos smykových sil. K vyšetření smykové kapacity uvedených konstrukčních prvků byl navržen speciální model. Článek popisuje vývoj modelu, který slouží k simulaci chování nosníku s oblastí oslabenou velkým otvorem ve stojině.

Balzer Ch., Schnell J.: Ein Nachweiskonzept für Querkrafttragfähigkeit verstärkter Stahlbetongurte von Verbundträgern im Bereich großer Stegöffnungen, Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014), Heft 3, s. 158–169