

# ROZVOJ POUŽITÍ GEORADARU PŘI DIAGNOSTICE ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ ■ DEVELOPMENT OF THE USE OF GROUND PENETRATING RADAR FOR THE DIAGNOSIS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Jakub Štainbruch, Ondřej Anton, Tomáš Kordina

S nástupem a rozvojem použití georadaru (GPR) při diagnostice železobetonových konstrukcí souvisí i řada experimentálních měření. Jejich cílem je rozvinout metodiku měření a vymezit okruh praktických aplikací, rozšířit povědomí o této v České republice relativně nové metodě a přesvědčit odbornou veřejnost o jejich přednostech. ■ Based on the development of ground penetrating radar (GPR) applications for diagnostic surveys of reinforced concrete structures, a large quantity of experimental measurements have been carried out. The purpose of doing those tests was, firstly, to help to improve the methodology of measurement; secondly, to determine the range of possible practical applications; and, last but not least, to increase awareness of this method, which is still not so well-known in the Czech Republic, and to convince the professional public of its usefulness.

## GEORADAR VE STAVEBNICTVÍ

S technologií radaru, tedy s metodou založenou na principu vysílání elektromagnetických pulzů do zkoumaného prostředí a na následné registraci jejich odrazů od překážek, se můžeme setkat v mnoha odvětvích lidské činnosti. Letectví, kosmonautika, glaciologie, vyhledávání munice, kriminalistika, geologie a geotechnika, archeologie, ... to je jen několik příkladů toho, jak široké je spektrum aplikací radaru. Není tedy divu, že metoda radaru se nemohla vyhnout ani stavebnictví, kde našla uplatnění v diagnostických průzkumech konstrukcí.

V souvislosti se stavební diagnostikou se hovoří o metodě GPR (ground penetrating radar) či o georadaru, méně rozšířené je označení WPR (wall penetrating radar). Zatímco ve světě, především ve Spojených státech, patří georadar ke standardně používaným diagnostickým metodám a na toto téma se pořádají specializované odborné konference, v České republice není metoda GPR ve stavebnictví zatím příliš rozšířená a odbornou veřejností dostatečně akceptovaná. Autoři článku si vytkli za cíl ukázat na konkrétních příkladech výhody a přínos této progresivně se vyvíjející diagnostické metody. S ohledem na zaměření časopisu se budeme věnovat především otázce průzkumů železobetonových konstrukcí.

V České republice se georadarová měření provádějí od 90. let. K rozvoji stavební diagnostických průzkumů dochází především od poloviny první dekády tohoto století, a to hlavně v souvislosti s rozvojem měřicí techniky, kdy přední výrobci georadarových systémů uvedli na trh vysokofrekvenční antény ( $10^9$  Hz) s dostatečně vysokým rozlišením detekovatelných nehomogenit ( $10^{-2}$  až  $10^{-3}$  m). Ruku v ruce s rozšiřujícím se okruhem možných (a potenciálně možných) aplikací bylo nutné zahájit intenzivní výzkum této metody, a to jak v samotné komerční oblasti, tak především ve spolupráci s vědeckými a výzkumnými pracovišti. V průběhu několika uplynulých let byly prováděny série experimentálních měření na fyzikálních modelech a reálných konstrukcích, jejichž cílem bylo ověřit možnosti použití různých nedestruktivních metod při diagnostických průzkumech a porovnat dosažené výsledky. V článku se zmíníme o výsledcích srovnávacích

měření mezi georadarem a profometrickým skenerem při vyhledávání výztuže v ostění tunelu, o výsledcích měření georadarem na velkorozměrových vzorcích betonu se zabudovanými různými typy konstrukčních prvků a defektů a o výsledcích výzkumného úkolu nazvaného „Rozvoj diagnostiky betonových konstrukcí pomocí radarového skeneru“.

## Srovnávací měření profometrickým skenerem a georadarem

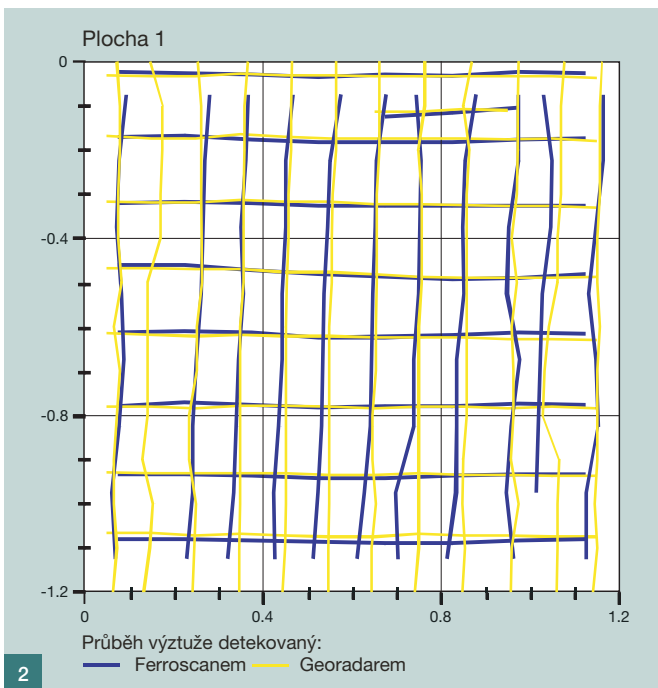
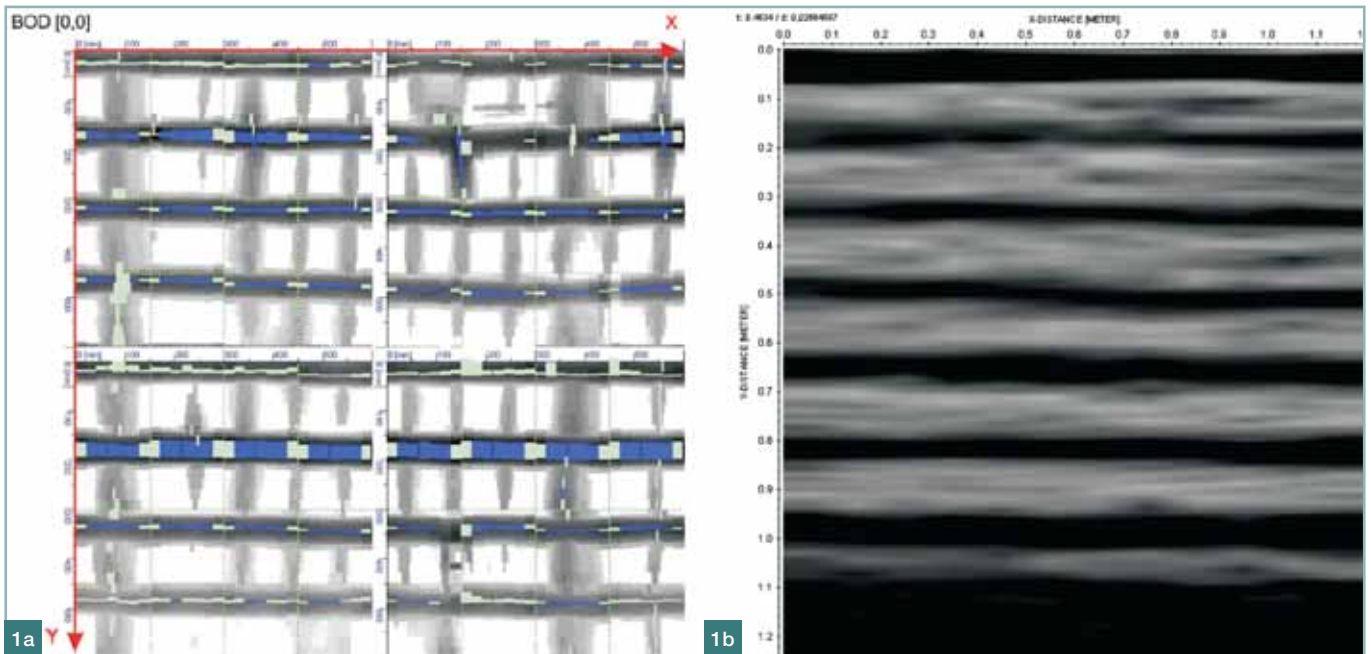
Použití magnetického indikátoru výztuže (tzv. profometru – podle nejrozšířenějšího typu přístroje v České republice firmy Proceq) patří ve stavební diagnostice k standardně používaným nedestruktivním metodám detekce výztuže. Jedná se o relativně jednoduchou metodu založenou na změně elektromagnetického pole v blízkosti kovového vodiče. Vyspělejší technika je opatřena sběrníci dat a umožňuje provádět a vyhodnocovat i plošná měření.

Srovnávací měření polohy výztuže georadarem a profometrickým skenerem bylo provedeno na základě zadání VUT v Brně během listopadu roku 2008 na dvou referenčních plochách na ostění tunelu Lahovice SOKP 514 v Praze. Cílem bylo porovnat přesnost a spolehlivost dvou různých nedestruktivních metod detekce ocelové výztuže v betonových konstrukcích. Profometrická měření provedla společnost Beton Bohemia ZL, s. r. o., za použití měřicího přístroje Hilti Ferrosan PS 200 (který patří ke špičce mezi běžně užívanými přístroji). Společnost Inset, s. r. o., provedla měření georadarová s použitím systému Ramac švédského výrobce Mala GeoScience s měřicí anténou 1,6 GHz.

Kontrolní měření hloubky uložení a pozice ocelové výztuže v betonové konstrukci proběhla na dvou referenčních plochách o rozměrech 1,2 x 1,2 m. Profometrická měření proběhla v síti vodorovných a svislých profilů s rozestupem 150 mm. Grid pro georadarová měření měl vzdálenost profilů 100 mm.

Z obr. 1 a 2 vyplývá dobrá shoda ve výsledcích srovnávacího měření georadarem a profometrickým skenerem. Pouze minimální rozdíly panují v určení pozice vodorovné výztuže. Oběma metodami byly detekovány nejen průběžné pruhy, ale i třmínek mezi prvním a druhým vodorovným prutem. Vrstva svislé výztuže se nacházela hlouběji od měřeného povrchu a byla skryta za vodorovnou výztuží. Proto odezva při měření byla méně zřetelná a určení pozice obtížnější. Výsledky srovnání patrné na obr. 2 jsou přesto dobré. Výrazněji se liší pouze v dolní části skenované plochy. Profometrický skener rovněž nedetekoval druhý svislý prut zleva, který byl uložen relativně hlouběji mimo hloubkový dosah přístroje.

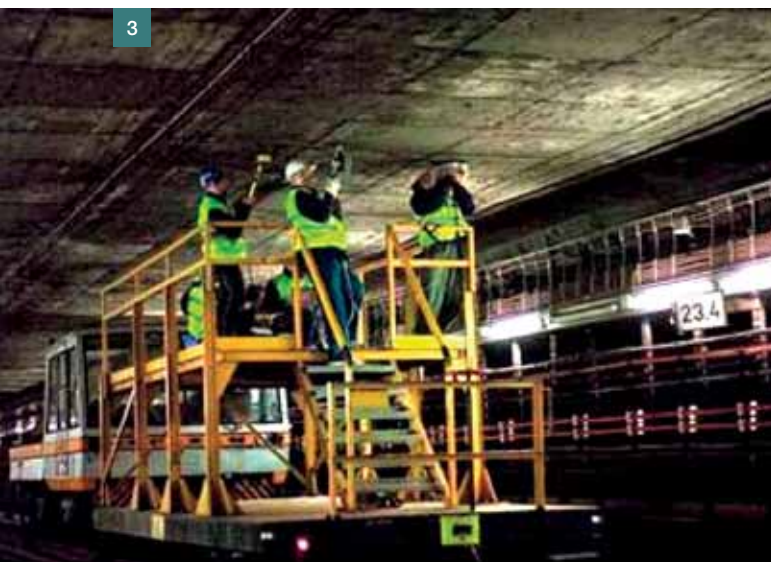
Z výsledků srovnávacích měření vyplynulo, že georadar i profometr reagují citlivě na přítomnost výztuže, nebo obecně železných prvků. Radar má výhodu ve větším hloubkovém dosahu. Na základě praktických zkušeností s používáním obou metod je nespornou výhodou georadaru vysoká produktivita měření. Za pracovní směnu lze změřit až několik kilometrů profilů. Rychlost sběru dat umožňuje měření georadarem se zachováním dostatečné citlivosti při pochozí



rychlosti nebo dokonce při pomalém pojezdu. GPR průzkumy se osvědčují zejména v případech, kdy lze shromáždit data zpracovávat a vyhodnocovat až dodatečně (tzv. post-processing).

#### Experimentální měření na zkušebních blocích

Při diagnostických průzkumech lze využít celou řadu nepřímých metod. V poslední době dochází k prudkému rozvoji přístrojového vybavení, zpracovatelských postupů a inovativním přístupům. Možnosti použití metod se tak posouvají stále kupředu a snahou vědeckých a výzkumných pracovišť je tyto nové hranice ověřovat. V rámci řešení výzkumných úkolů (Podpora dlouhodobého zajištění jaderné bezpečnosti provozu jaderných elektráren v ČR a Metodika zkoušení masivních železobetonových konstrukcí) zaměřených na diagnostiku silnostěnných betonových konstrukcí byly vyrobeny velkoobjemové fyzikální modely, betonové bloky o rozměrech řádu několika metrů, na kterých byla provedena řada experimentálních a srovnávacích měření na různých typech úloh – detekce konstrukčních prvků, stanovení geometrických vlastností zkoumané konstrukce a zjišťování různých typů vnitřních defektů. Jednou ze zkoumaných metod byl i georadar.

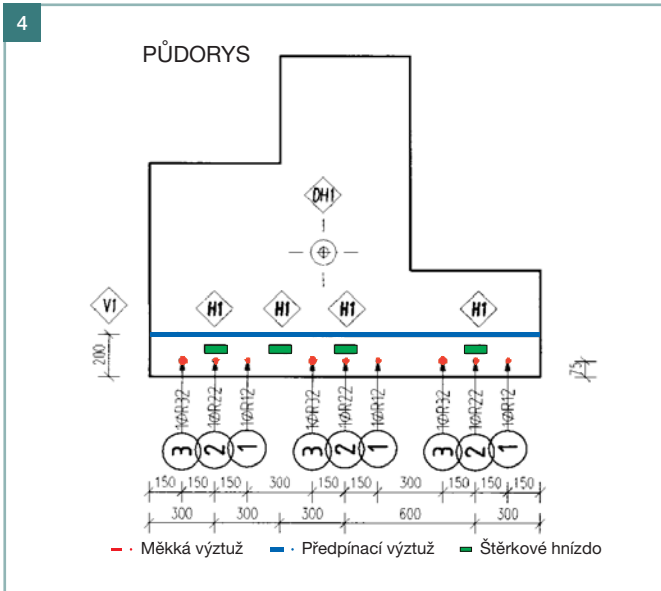


Obr. 1 Výsledky srovnávacích měření na zkušební ploše, a) grafický výstup zjišťování horizontální výztuže profometrickým skenerem metodou Imagescan spojený v PC do jednoho celku, b) výsledky zjišťování horizontální výztuže georadarem zpracované programem ReflexW ■ Fig. 1 Results of the comparison measurement at a test site: a) graphical output of profometric scanning of horizontal reinforcing rods using software Imagescan, b) results of GPR measurement using software ReflexW

Obr. 2 Výsledky srovnávacího měření na zkušební ploše 1, porovnání pozice jednotlivých prutů výztuže detekovaných profometrickým skenerem a georadarem ■ Fig. 2 Results of the comparison measurement at a test site no.1, comparison of reinforcement layout detected with profometric scanner (blue lines) and GPR (yellow lines)

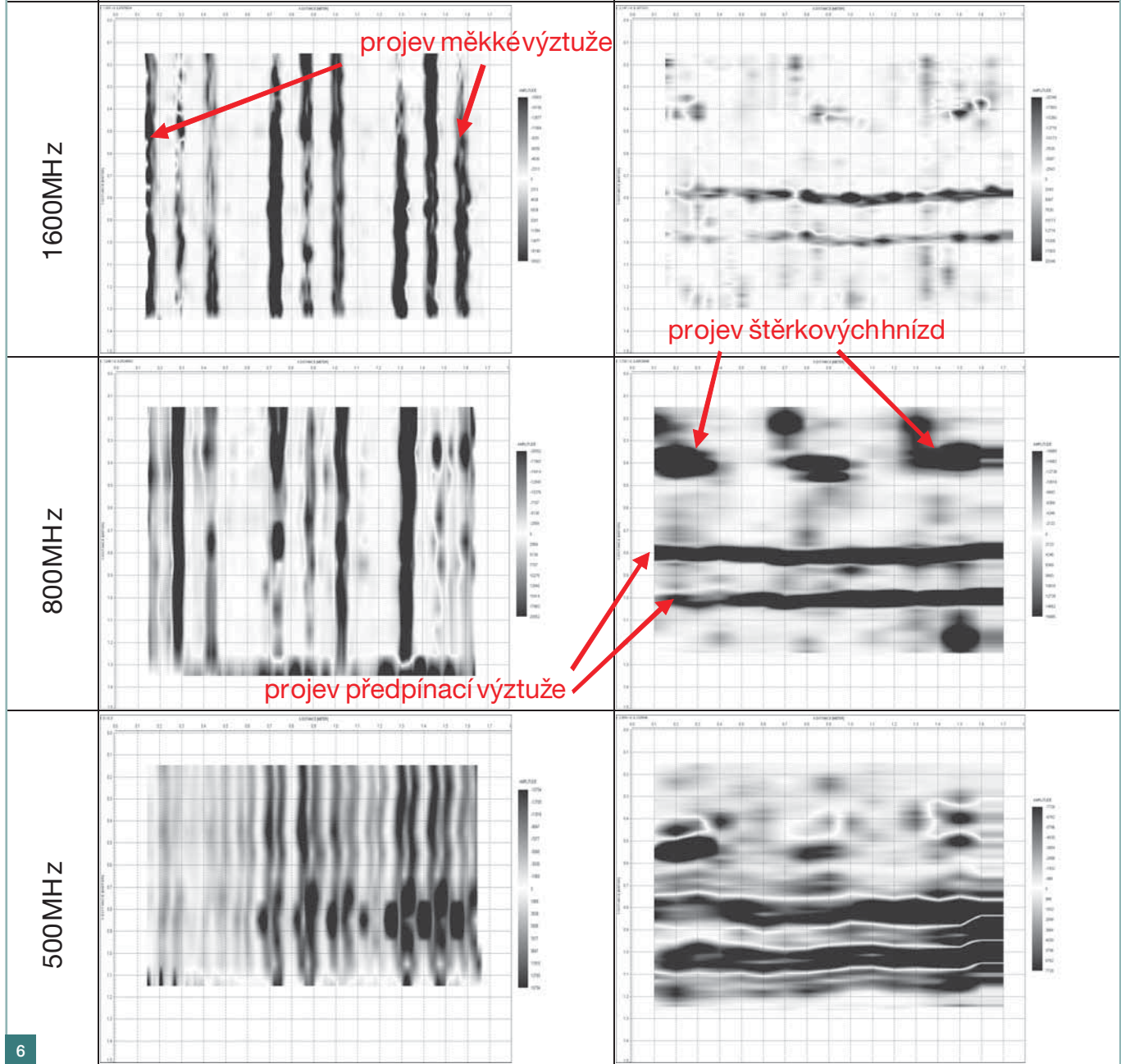
Obr. 3 Diagnostický průzkum stropu komůrky Nuselského mostu v Praze – GPR měření je relativně rychlé a lze jej provádět i z pomalu jedoucí plošiny ■ Fig. 3 The diagnostic survey of the chamber ceiling of Nuselský Bridge in Prague – GPR measurement is relatively fast and can be carried out even from the moving trolley





Anténa Měření v síti vodorovných profilů

Měření v síti svislých profilů

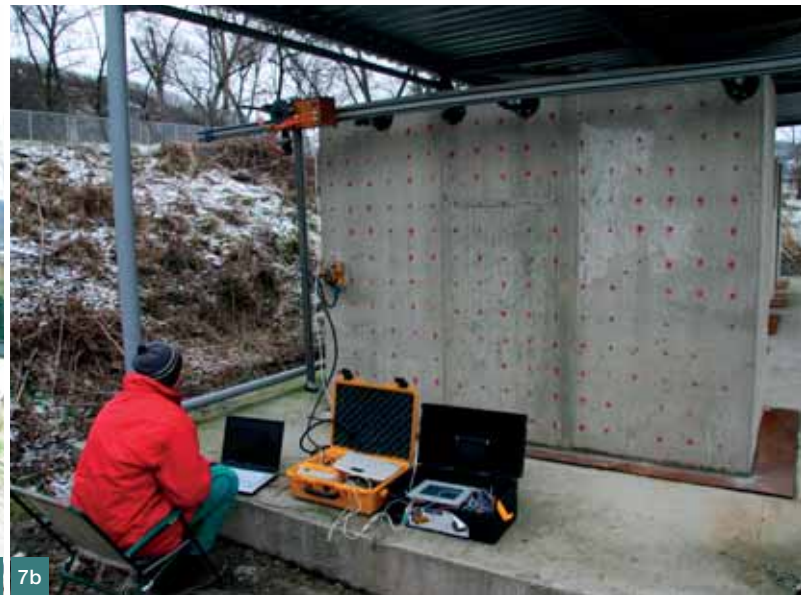




Obr. 4 Konstrukční schéma fyzikálního modelu vyrobeného pro VUT v Brně | Fig. 4 The design of a concrete test specimen by the TU in Brno

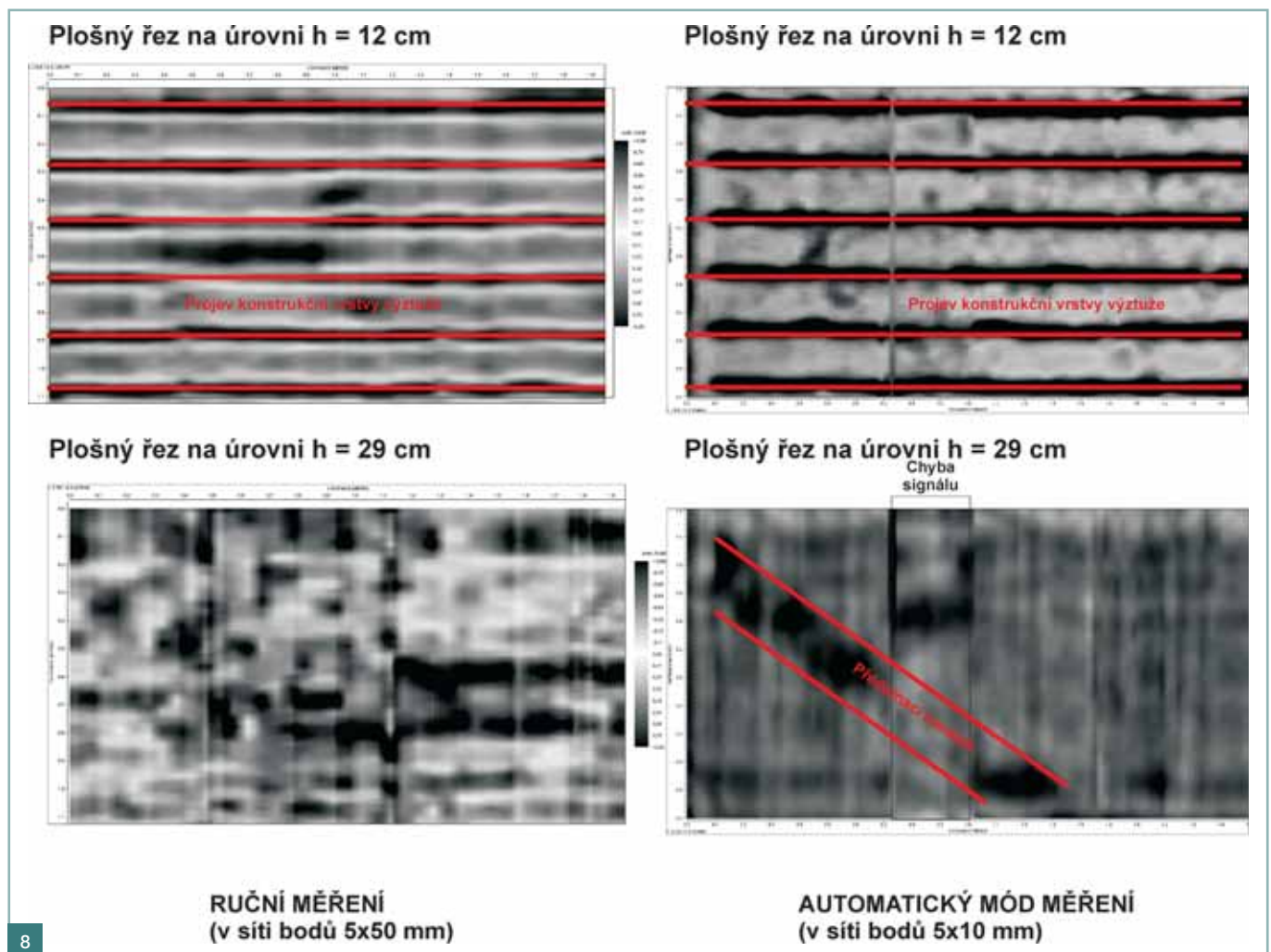
Obr. 5 Ukázka GPR měření na fyzikálním modelu | Fig. 5 Photo from the GPR measurement at a physical model

Obr. 6 Srovnání výsledků GPR měření pomocí anténních systémů 500, 800 a 1 600 MHz na fyzikálním modelu | Fig. 6 GPR measurement at a physical model by the use of different antenna systems: 500, 800 and 1 600 MHz / comparison of results



Obr. 7 Zkušební blok č. 5 v areálu ÚJV v Řeži, a) výstavba, b) měření GPR skenerem | Fig. 7 Test specimen no. 5 at NRI in Rez a) construction, b) GPR scanning

Obr. 8 Výsledky srovnávacích měření: plošné řezy zkonstruované pro hloubkovou úroveň 120 a 290 mm s interpretovanou pozicí detekovaných konstrukčních prvků, a) ruční měření v síti bodů 5 x 50 mm, b) automatické měření GPR skenerem v síti bodů 5 x 10 mm | Fig. 8 Results of comparison measurements: scans constructed for the depth horizon of 120 mm and 290 mm with interpreted position of detected construction elements, a) manual measurement in a grid 5 x 50 mm, b) automatic scanning in a grid 5 x 10 mm



8



Na základě technické specifikace VUT v Brně byly zhotoveny dva tvarově a rozměrově shodné betonové bloky. Do bloku „A“ byly při výrobě zabudovány různé typy nehomogenit – pruty měkké výztuže různého průměru, zainjektovaná i nezainjektovaná předpínací výztuž a štěrková hnízda (obr. 4). Blok „B“ byl vyroben z prostého betonu a sloužil jako referenční.

V září 2007 proběhla série georadarových měření, kdy se zkoumaly diagnostické možnosti georadaru při použití různých typů měřících antén (500, 800 a 1 600 MHz). Platí, že s rostoucí frekvencí antény vzrůstá rozlišovací schopnost (kratší vlnová délka umožňuje detekovat i objekty menších rozměrů). Zároveň ale progresivně klesá hloubkový dosah měření, neboť vyšší frekvence jsou více tlumeny a nemají takovou schopnost průniku materiálem jako nízké. Na obr. 6 je ukázka srovnání výsledků měření pomocí různých typů měřících antén. Na plošných skenech se zobrazil průběh jednotlivých prutů výztuže a pozice štěrkových hnízd. Přestože obstojné výsledky byly získány ve všech případech, jako optimální anténní systém se pro tento konkrétní typ úlohy ukázala anténa 800 MHz. Anténa 1 600 MHz sice zřetelně vykreslila průběh svíslé výztuže, ale projevy vodorovné výztuže (předpínací) a především štěrkových hnízd nejsou již tak zřetelné. Naproti tomu anténa 500 MHz má dostatečný hloubkový dosah, ale projevy jednotlivých prutů výztuže díky nižšímu rozlišení splývají.

Při řešení praktických úloh je nutné zohledňovat konkrétní podmínky, jakými jsou předpokládaná velikost hledaných objektů, jejich hloubka a fyzikální vlastnosti prostředí. Vždy je výhodné použít více anténních systémů různých frekvencí a při zpracování naměřených dat vzájemně srovnávat výsledky.

### GPR skener

Během experimentálních měření se ukázala jako limitující faktor pro výslednou kvalitu GPR dat a diagnostických možností této metody malá hustota naměřených dat a především nedostatečná přesnost určení pozice antény. Při ručním vedení antény nelze zajistit přímost profilů a konstantní krok měření s dostatečnou přesností. I při maximální pečlivosti věnované kvalitě sběru dat, použití papírových gridů s předkreslenou sítí profilových linií a délkových vyrovnávacích značek se chyba určení pozice antény pro daný měřící bod pohybuje okolo 20 mm. Při řešení praktických úloh, kde měření probíhá v technicky náročných podmínkách (z pojiždějí plošiny, nebo při měření z horolezeckého závěsu), roste nepřesnost určení pozice antény až na cca 200 mm. Rovněž je prakticky nemožné dosáhnout dostatečné hustoty profilů. Na základě výsledků různých vědeckých studií je pro dosažení kvalitních 3D měření optimální, pokud je krok měření na profilu srovnatelný se vzdáleností mezi profily. V praxi je mezi krokem měření a rozestupem profilů značný rozdíl. Při experimentálních ručních měřeních se tento poměr pohybuje okolo 1 : 10, při řešení praktických úkolů není výjimkou, že krok měření je v řádu mm nebo desítek mm a rozestup mezi profily dosahuje desetin metru až prvé metry. Interpolace jednotlivých anomálií je v takovém případě obtížná, při větší hustotě detekovaných prvků nemožná.

Omezení plynoucí z nedostatečné kvality ručně prováděného měření lze odstranit použitím automatického GPR skeneru, tj. zařízení, které (pevně spojeno s konstrukcí) posunuje měřící GPR anténou v předem definované síti měřících bodů. Tím je zajištěna jak dostatečná přesnost urče-

ní pozice měřených bodů, tak i požadovaná hustota měřených dat. Vývoj automatického GPR skeneru probíhal v letech 2008 až 2010 v rámci výzkumného projektu podporovaného MPO. Na základě vyhodnocení praktických zkušeností ze zkušebních měření byly nakonec vyvinuty dvě verze skeneru. Základní model Dibekon je určen především k proměřování větších ploch a díky své robustnější konstrukci umožňuje nést georadarové antény větších rozměrů (např. stíněnou anténu 800 MHz). Pro detailní skenování menších ploch je vhodný model Dibekon Lt. Jedná se o kompaktní, snadno transportovatelné a jednoduše smontovatelné zařízení.

V lednu 2011 proběhlo na zkušebním bloku v areálu ÚJV v Řeži srovnávací měření, jehož cílem bylo posoudit, do jaké míry se zlepšila kvalita GPR dat naměřených pomocí skeneru Dibekon Lt. oproti ručnímu plošnému měření prováděnému na témže bloku v roce 2006. Zkušební blok, na němž srovnávací měření probíhalo, má rozměry 2,6 x 2 x 1,2 m a relativně komplikovanou vnitřní stavbu (obr. 7a). Pod vrstvou konstrukční výztuže jsou diagonálně rozmístěny kanálky předpínací výztuže. Srovnání prokázalo výrazné zlepšení schopnosti detekovat hlouběji uložené prvky. Zatímco při ručním měření se kanálek při plošném zpracování neprojevil, pomocí skeneru se průběh kanálku podařilo spolehlivě určit. Výsledky srovnávacích měření jsou prezentovány na obr. 8.

Použití skeneru při GPR měřeních se osvědčilo především při diagnostických průzkumech složitějších detailů, kde je třeba znát přesný průběh jednotlivých konstrukčních prvků a případných defektů (diagnostika mostních závěrů, zjišťování pozice kluzných trnů a kotev v cementobetonových vozovkách, pozice nosné výztuže v místě plánovaných průrazů apod.).

### ZÁVĚR

Tak jako radar znamenal v minulosti revoluci v letectví, věříme, že stejně široké uplatnění najde tato nedestruktivní diagnostická metoda i v českém stavebnictví. Cílem tohoto článku je na základě výsledků intenzivních několikaletých výzkumů přesvědčit odbornou veřejnost o nesporných kvalitách metody GPR a jejím platném místě v komplexu metod nedestruktivního zkušebnictví.

Příspěvek byl vytvořen s podporou projektu Specifického výzkumu FAST-S-11-23 uděleného Vysokým učením technickým v Brně.

RNDr. Jakub Štainbruch, Ph.D.

Inset, s. r. o.

Divize geologie a geofyziky

Novákových 6, 180 00 Praha 8

e-mail: stainbruch.jakub@inset.com



Ing. Ondřej Anton, Ph.D.

e-mail: anton.o@fce.vutbr.cz

Ing. Tomáš Kordina

e-mail: kordina.t@fce.vutbr.cz



oba: Fakulta stavební VUT v Brně

Ústav stavebního zkušebnictví

Veveří 95, 602 00 Brno

Fotografie: 1 až 6, 8 – archiv společnosti Inset, s. r. o., a Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební VUT v Brně, 7 – Ing. Pečinka