

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 704*

*ISSN 1213-418X*

**Ondřej Anton**

**VYBRANÉ ASPEKTY DIAGNOSTIKY  
OCELOVÉ VÝZTUŽE  
V ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍCH  
A KONSTRUKCÍCH  
Z PŘEDPJATÉHO BETONU**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STAVEBNÍ  
Ústav stavebního zkušebnictví

Ing. Ondřej Anton, Ph.D.

**VYBRANÉ ASPEKTY DIAGNOSTIKY  
OCELOVÉ VÝZTUŽE V ŽELEZOBETONOVÝCH  
KONSTRUKCÍCH A KONSTRUKCÍCH  
Z PŘEDPJATÉHO BETONU**

SELECTED ASPECTS OF DIAGNOSTICS OF STEEL REINFORCEMENT  
IN REINFORCED CONCRETE AND PRESTRESSED  
CONCRETE STRUCTURES

ZKRÁCENÁ VERSE HABILITAČNÍ PRÁCE  
OBOR: KONSTRUKCE A DOPRAVNÍ STAVBY



BRNO 2021

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Hodnocení stávajících konstrukcí, železobetonová konstrukce, konstrukce z předpjatého betonu, výztuž, elektromagnetický indikátor výztuže, georadar, radiografie, izotop Co60, rentgen.

## **KEYWORDS**

Evaluation of existing structures, reinforced concrete structure, prestressed concrete structure, challenge, electromagnetic indicator of reinforcement, GPR, radiography, Co60 isotope, X-ray.

## **MÍSTO ULOŽENÍ**

Originál práce je uložen v Oddělení pro vědu a výzkum Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno.

© Ondřej Anton, 2021

ISBN 80-214-5993-9

ISSN 1213-418X

## OBSAH

1 ÚVOD .....	5
2 HODNOCENÍ EXISTUJÍCÍCH KONSTRUKCÍ.....	6
2.1 Postup hodnocení stávající konstrukce .....	6
3 DIAGNOSTIKA VYZTUŽENÍ ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ .....	7
3.1 Důvody stanovení polohy výztuže .....	7
3.2 Požadavky na stanovení výztužení .....	7
3.3 Druhy výztuží.....	8
3.4 Možnosti stanovení polohy výztuže – metody.....	8
4 DIAGNOSTIKA VYZTUŽENÍ KONSTRUKCÍ Z PŘEDPJATÉHO BETONU.....	17
4.1 Diagnostika předpjatých konstrukcí.....	17
4.2 Využitelné metody pro stanovení polohy předpínací výztuže v konstrukci .....	17
4.3 Následné metody stanovení zainjektování kabelových kanálů a stavu kabelů (koroze)uální kontrola .....	18
4.4 Koroze předpínací výztuže.....	19
5 DIAGNOSTIKA ROZPTÝLENÉ KOVOVÉ VÝZTUŽE .....	19
6 MOŽNOSTI TESTOVÁNÍ METOD NA MODELECH.....	19
6.1 Modely variabilně měnitelné .....	20
6.2 Modely stabilní (neměnné) .....	20
6.3 Speciální modely pro radiografii.....	21
7 TESTOVÁNÍ GEORADARU A KOMBINACE METOD IN SITU – OPTIMÁLNÍ POSTUPY STANOVENÍ VYZTUŽENÍ NA VYBRANÝCH TYPICKÝCH PRVCÍCH ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ.....	21
7.1 Sloupy .....	21
7.2 Desky .....	23
7.3 Trámy .....	24
7.4 Předpjaté mostní nosníky – lokalizace předpínací výztuže .....	27
8 PŘÍPADOVÉ STUDIE VYUŽITÍ RADARU V KOMBINACI S OSTATNÍMI METODAMI NA ROZSÁHLEJŠÍCH KONSTRUKCÍCH – POROVNÁNÍ S MOŽNOSTÍ VYUŽITÍ RADIOGRAFIE.....	28
8.1 Případová studie 1 – srovnání možností stanovení množství a průběhu hlavní nosné výztuže v konstrukci železobetonového trémového mostu .....	28
8.2 Případová studie 2 – vazníky montovaného skeletu – potvrzení správného vyztužení .....	31
9 PŘÍPADOVÉ STUDIE SOUČASNÉHO VYUŽITÍ RADIOGRAFIE S POMOCÍ RENTGENU .....	32
9.1 Radiografický průzkum plastiky pieta .....	32
9.2 Radiografická kontrola rozmísení drátků v drátkobetonových deskách .....	34
10 ZÁVĚR.....	36
11 SEZNAM LITERATURY A PRAMENŮ .....	37
ABSTRAKT.....	40
ABSTRACT .....	40

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jméno a příjmení: Ondřej Anton  
Datum a místo narození: 2. prosince 1967 v Brně  
Národnost: česká



Adresa do zaměstnání:  
Ústav stavebního zkušebnictví, Fakulta stavební VUT v Brně,  
Veveří 331/95, 602 00 Brno, Česká republika  
Telefon: 541 147 823, e-mail: [ondrej.anton@vutbr.cz](mailto:ondrej.anton@vutbr.cz)

Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

Maturita: 1986 Gymnázium Brno – Vídeňská, obor matematicko-fyzikální.  
Ing.: 1991 VUT v Brně, Fakulta stavební, obor Vodní stavby a vodní hospodářství.  
Ph.D.: 2009 VUT v Brně, Fakulta stavební, obor 3911V006 Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství.

Zaměstnání, pracovní zařazení a funkce:

1991 – 2001 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Středisko radiační defektoskopie - samostatný vědecký pracovník. Od roku 1999 asistent.  
2001 – dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví, asistent. Od roku 2009 odborný asistent.

Další odborná praxe:

2011 – Certifikace Technik NDT zkoušení ve stavebnictví, reg. Č. 1620 – 11.  
2017 – Osvědčení zvláštní odborné způsobilosti pro pracovníky přímo řídící, vydaným Státním úřadem pro jadernou bezpečnost.

Výzkumné a odborné zaměření: Diagnostika staveb při hodnocení aktuálního stavebně technického a statického stavu existujících konstrukcí – specializace na radiační metody v diagnostice konstrukcí a analýze stavebních materiálů, dále na využití georadaru a elektromagnetických metod v diagnostice konstrukcí.

Pedagogická činnost: Výuka v předmětech bakalářských a magisterských studijních programů BIA001 Stavební látky, BIA007 Diagnostické metody ve stavebnictví, BIB003 Diagnostika stavebních konstrukcí (K), MI051 Hodnocení stávajících konstrukcí, NIA021 Kvalita provádění a diagnostika staveb a mnoha dalších. Ve výuce garant úloh a přednášek v oboru radiační defektoskopie, zasloužil se například o zavedení metod měření radonu v půdě a objektech do praktické výuky, stejně tak zavedení měření georadarem do výuky, garant úloh a přednášek se zaměřením na zkoušení keramiky, kovů a polymerů. Zásadní podíl na vytváření výukových videopořadů v rámci distančního studia. Vedoucí obhájených bakalářských (25) a magisterských (22) prací, školitel 2 doktorandů s úspěšně obhájenou prací (Ph.D.)

Projekty a granty: Do roku 2021 člen řešitelských kolektivů 3 výzkumných projektů (GAČR a NAKI II) a hlavním řešitelem projektu NAKI II.

Publikační a tvůrčí činnost: do roku 2021: aktuálně autorem či spoluautorem: 2 monografií, 3 články s  $IF > 0,5$ , 17 článků s  $IF < 0,1$ , 15 příspěvků ve sborníku světové konference, 78 příspěvků ve sborníku národní vědecké konference, 8 publikací v odborném časopisu, 65 expertíz v oblasti diagnostiky konstrukcí, 1 realizované výstavy, 2 památkových postupů a 1 certifikované metodiky.

# 1 ÚVOD

Žijeme v době, která v sobě v oblasti stavebních konstrukcí obdivuhodně snoubí současnost i historii. Každý rok vzniká velké množství stavebních konstrukcí, mnohdy velmi inovativních a neotřelých řešení, jindy zase tradičních, využívajících rozsáhlé zkušenosti generací projektantů a stavitelů. Současně jsou hodnoceny tisíce stávajících konstrukcí, pro které se hledá nový způsob využití související s prodloužením jejich životnosti, změnou podoby, zatížení a celým spektrem dalších hledisek. Jedno mají ale všechny stavební konstrukce společné – v některé z fází své existence vyžadují provedení diagnostiky s cílem ověřit vybrané, v dané situaci významné, vlastnosti použitých materiálů, stavebních prvků či konstrukčních celků pro optimalizaci řešení vzniklé situace a potřebné zhodnocení skutečného stavu dané konstrukce.

V této fázi přichází ke slovu specifický obor – diagnostika stavebních konstrukcí. Obor, na jedné straně zcela plnohodnotný, který se ovšem neobejde bez úzké interdisciplinární spolupráce s blízkými obory jako je statika, materiálové inženýrství, geotechnika, chemie a geodézie, či v případech historických konstrukcí související obory humanitními, jako archeologie či historie. Doby, kdy byla diagnostika konstrukcí brána pouze jako pomocný, podpůrný proces základních stavebních oborů, již naštěstí neplatí.

Ruku v ruce s vývojem stavebních technologií a v souladu se směry stavebního vývoje společnosti v daném období se mění a specifikují cíle, které musí obor diagnostiky řešit. A opět v návaznosti na tento proces je nezbytný vývoj nových a modernizace stávajících metod a technologií, které umožní stavební diagnostice udržet krok s vývojem a požadavky v oboru.

Je obrovskou devízou současné doby, že po letech jisté stagnace v tomto směru můžeme sledovat v poslední dekádě značnou renesanci v oboru. Pokrok v oblasti vývoje měřících přístrojů určených pro diagnostiku stavebních konstrukcí je v tomto období větší než v průběhu několika předchozích desetiletí. Do popředí se dostávají zejména metody pro nedestruktivní zkoušení (dále jen NDT), které jsou nejen šetrné ke konstrukci, ale i současně s rostoucí kvalitou používaných technologií již ne vždy platí dříve proklamovaná premisa, že zkoušky nedestruktivní jsou zákonitě méně přesné než ty destruktivní.

Vše, co bylo dosud řečeno, platí měrou vrchovatou i pro specifickou část oboru, kterým je diagnostika stavebních konstrukcí zaměřená na ocelové výztuže v železobetonových konstrukcích a konstrukcích z předpjatého betonu. I v oblasti diagnostiky vyztužení konstrukcí dnes disponujeme jak novými generacemi přístrojů v oblasti tradičních metod, jakými je například metoda elektromagnetických indikátorů výztuže, tak technologií georadaru, která se konečně po mnoha desetiletích využívání v geologii, geotechnice či archeologii konečně dočkala adekvátní aplikace určené speciálně pro oblast diagnostiky železobetonových konstrukcí. Na druhé straně vývoj v jiných oblastech lidské činnosti může používání některých tradičních NDT metod narušit – typickým příkladem je ztráta možnosti využít při terénní diagnostice železobetonu klasickou radiografickou metodu s použitím gamazářiče Co60.

Navzdory vývoji nových a rozvoji tradičních diagnostických metod, jsou některé z nich využívány spíše sporadicky, zařízení odpovídající kvality nejsou často využívány buď z ekonomických příčin, či z důvodu nedůvěry k novým metodám a technologiím, či nepochopením jejich možností a omezení.

Právě zde by měla vystoupit do popředí role univerzitních pracovišť, aby v rámci výzkumu i praktických činností využily svých možností, sledovaly a využívaly maximálně moderních metod a zařízení, a snažily se šířit relevantní informace prostřednictvím odborných publikací či teoretické i praktické výuky. Podobný cíl si klade i tato práce, která by měla osvětlit vybrané aspekty diagnostiky stavebních konstrukcí zaměřené na ocelové výztuže v železobetonových konstrukcích a konstrukcích z předpjatého betonu.

## 2 HODNOCENÍ EXISTUJÍCÍCH KONSTRUKCÍ

Stavebně technické průzkumy, či šířeji a obecněji, diagnostika stavebních konstrukcí jsou součástí rozsáhlého systému Hodnocení stávajících konstrukcí. Tento systém byl poměrně podrobně sepsán v normě ČSN ISO 138 22 Zásady navrhování konstrukcí – Hodnocení stávajících konstrukcí [1], ta vznikla jako doplněk předpisu ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí [2], právě pro postižení specifik přístupu ke konstrukcím již stojícím. Paradoxně právě pojem „stávající konstrukce“ je doslova všeobsahující, není podstatné, zda je konstrukce stovky let stará, či jde o novostavbu. Součástí tohoto předpisu byly v dřívější verzi i národní dodatky, které byly však odděleny, a dnes jsou již obsahem navazující normy ČSN 73 0038 Hodnocení a ověřování existujících konstrukcí – Doplnující ustanovení [3].

I tak je nosným motivem předpisu snaha o případné maximální prodloužení životnosti konstrukce, což je přístup v mnohém se lišící od navrhování nových konstrukcí.

Podle [1] lze tedy normu použít pro hodnocení každé stavební konstrukce, která byla původně navržena, staticky posouzena a realizována, s tím, že k hodnocení mohou vést následující okolnosti:

- Očekávaná změna v užívání nebo prodloužení návrhové životnosti.
- Ověření spolehlivosti.
- Degradace konstrukce vlivem časově závislých zatížení či vlivů.
- Poškození konstrukce od mimořádných zatížení.

Norma [1] rovněž definuje základní pojmy jako:

- Hodnocení – soubor činností prováděných za účelem ověření spolehlivosti existující konstrukce z hlediska jejího budoucího používání.
- Poškození – nepříznivá změna stavu konstrukce, která může ovlivnit její funkční spolehlivost.
- Degradace – proces, který nepříznivě ovlivňuje funkční způsobilost včetně spolehlivosti v čase vlivem:
  - přirozeně se vyskytujících chemických, fyzikálních či biologických jevů,
  - opakovaných zatížení, která mohou vyvolat únavu,
  - obvyklých či nepříznivých vlivů prostředí,
  - opotřebení v důsledku způsobu používání,
  - nesprávného provozu nebo údržby.

Podstatným faktorem hodnocení konstrukce je dle [1] účel z hlediska požadavků na její budoucí funkční spolehlivost.

### 2.1 POSTUP HODNOCENÍ STÁVAJÍCÍ KONSTRUKCE

Postup hodnocení závisí jak na účelu hodnocení, ale také na specifických okolnostech, mezi něž patří dostupnost projektové dokumentace, zjištěné škody, způsob využívání konstrukce atd. Před samotným zahájením procesu hodnocení se doporučuje prohlídka stavby [1]. Samotný proces sestává z následujících kroků:

- Stanovení účelu hodnocení – jednoznačný účel s ohledem na budoucí způsobilost, stanovený dohodou mezi objednatelem, posuzovatelem a příslušnými úřady.
- Scénář – pro identifikaci možných kritických situací, pro následné zajištění bezpečnosti a použitelnosti konstrukce.
- Předběžné hodnocení – na základě studia dokumentace, následuje předběžná prohlídka pro identifikaci konstrukčního systému, vizuálního stanovení míry poškození konstrukce, jejíž výsledky vyjadřují kvalitativní zatřídění konstrukce. Předběžná ověření pro určení nutnosti dalšího průzkumu, případně rozhodnutí o okamžitých opatřeních (havarijní stav). Konkrétní doporučení pro podrobné hodnocení.

- Podrobné hodnocení – zejména vyhledání dokumentace a podrobná prohlídka, zkoušky materiálů, které vyústí v analýzu konstrukce a ověření spolehlivosti.
- Výsledky hodnocení – součástí je zpráva, koncepční návrh konstrukčních opatření a řízení rizik.
- V případě potřeby se proces opakuje.

Předpis se poměrně podrobně věnuje i problematice objektů kulturních památek, které vyžadují ve většině ohledů specifický přístup.

Z hlediska praxe je podstatné, že ve výběru zkušebních metod pro ověření vlastností jsou jednoznačně preferovány metody nedestruktivního zkoušení.

### **3 DIAGNOSTIKA VYZTUŽENÍ ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ**

#### **3.1 DŮVODY STANOVENÍ POLOHY VÝZTUŽE**

V rámci stavebně technických průzkumů železobetonových konstrukcí se běžně setkáváme s požadavkem stanovení vyztužení vybraných prvků konstrukce. Důvodů může být více, ale dominují dva:

Absence dokumentace (projektová či prováděcí dokumentace konstrukce), zahrnující výkresy množství a tvarů ocelové výztuže v jednotlivých prvcích konstrukce. Důvodem nutnosti zjištění vyztužení je potřeba statického přepočtu únosnosti konstrukce.

Pochybnost o správném vyztužení konstrukce – většinou motivovaná nežádoucím chováním konstrukce, poruchami v podobě trhlin, nadměrných deformací a podobně.

Nedodržení předepsaného vyztužení v minulosti většinou souviselo s dvojí příčinou:

- Nedostatkem konkrétní výztuže na trhu, a její adekvátní náhrada například jinými průměry prutů (kumulace tohoto faktu v objektech z konce 30. let 20. století může souviset s velkou spotřebou výztuže při budování pohraničního opevnění, a přednostními dodávkami na tyto stavby).
- Druhou typickou příčinou je změna typu výztuže v období probíhajících změn sortimentu vyráběných výztuží, kdy v době realizace stavby již původně projektovaná výztuž nebyla k dispozici.

#### **3.2 POŽADAVKY NA STANOVENÍ VYZTUŽENÍ**

Rozsah vyztužení vybraných prvků, průřezů či částí železobetonové konstrukce je formulován na základě důvodu provádění této části stavebnětechnického průzkumu.

Obecně může zahrnovat zjištění:

- Množství prutů výztuže v daném místě, či řezu konstrukce nebo prvku konstrukce či dílce.
- Tvaru prutů vyztužení, polohy jednotlivých prutů (či jiných výztužných prvků).
- Typu výztuže – u výztužných prutů jde o třídu oceli, která je vždy charakterizovaná základními mechanickými vlastnostmi (mez kluzu, pevnost v tahu, tažnost a další).
- Průměry jednotlivých výztužných vložek.

V případě kontroly dodržení předepsaného vyztužení jde pak o konkrétní případy předpokládaných chyb vyztužení, z nichž lze charakterizovat nejběžnější:

- Předpoklad absence části vyztužení.
- Předpoklad chybného tvaru vyztužení.
- Předpoklad nepřesné polohy (dodržení minimálního krytí výztuže, posunutí celého armokoše, nebo části výztuží).
- Předpoklad změny počtu, průměrů či typu výztuží.



Obecným parametrem pro diagnostiku v případě ocelové výztuže i je i problematika její koroze.

Nezanedbatelným, a v řadě případů opomíjeným důvodem pro stanovení polohy výztuže, je odběr vzorků betonu pro laboratorní zkoušky (např. jádrovým vrtáním), nebo nutnost dodatečného vytvoření prostupů skrze prvky železobetonové konstrukce. V těchto případech by mělo být zjištění polohy výztuže elementárním krokem, bohužel v praxi jsme svědky v řadě případů, že se tak neděje, což vede k přerušení výztuží a oslabení konstrukce.

Podle konkrétních požadavků, typu a provedení konstrukce a v neposlední řadě na základě stavu a způsobu užívání konstrukce se pak odvíjí volba vhodných diagnostických metod.

### 3.3 DRUHY VÝZTUŽÍ

V průběhu více než stoleté historie realizace železobetonových konstrukcí byla užívána řada druhů a způsobů vyztužení, důvodem vyztužení je přenášení vnitřních sil v tažené oblasti prvku železobetonové konstrukce.

Principiálně můžeme výztuž rozdělit na:

- Tuhé výztužné vložky – v podobě válcovaných ocelových profilů.
- Betonářská výztuž (tzv. měkká výztuž) – tyče a svařované sítě.
- Předpínací výztuž.
- Rozptýlená výztuž – drátky, vlákna.

V této kapitole bude věnována pozornost téměř výhradně betonářské výztuži – zejména ocelovým výztužným tyčím (prutům).

Diagnostiku železobetonových konstrukcí z pohledu určení vyztužení komplikuje fakt, že se během historie vytváření železobetonových konstrukcí používala řada různých typů výztuže, výrazně se lišících svými vlastnostmi, zejména mezi kluzu  $R_e$  a mez pevností v tahu  $R_m$  [5]. Právě určení druhu výztuže je jedním z požadovaných parametrů v rámci diagnostiky.

Pozitivní je, že s výjimkou několika druhů oceli s hladkým povrchem lze různé druhy výztužných ocelí v historii snadno identifikovat na základě vzhledu povrchových úprav, tedy tzv. žebírek, či přímo charakteristického tvaru průřezu (výztuže Roxor či Isteg).

Velkou pomocí pro obecné povědomí o dříve užívaných typech betonářské výztuže jsou souhrnné informace uvedené a tabelizované formě v normě ČSN 78 0038 Hodnocení a ověřování existujících konstrukcí – doplňující ustanovení [3].

Poněkud komplikovanější situace nastala po roce 2007, kdy přechod na nové značení ocelí dle evropských zvyklostí přineslo i další nemožnost identifikace konkrétní oceli dle povrchových úprav [4]. Proto v rámci diagnostiky železobetonové konstrukce ve většině případů postačí uvažovat s udanými mechanickými vlastnostmi dané výztuže, na základě určení jejího typu. Ve výjimečných případech se pro stanovení reálných vlastností neznámé výztuže ve vhodném místě odeberou vzorky pro laboratorní zkoušky – odběr vzorků nesmí ohrozit odolnost konstrukce [1].

### 3.4 MOŽNOSTI STANOVENÍ POLOHY VÝZTUŽE – METODY

V této části budou popsány všechny metody, které je možno v rámci diagnostiky konstrukce využít k identifikaci polohy výztuže. Pořadí nebylo zvoleno náhodně. Jako první bude zevrubně popsána radiografie, tedy jediná metoda, poskytující zcela komplexní výsledky ve všech požadovaných aspektech. Nicméně jde současně o metodu, jejíž možnosti provádění byly v nedávné době významně omezeny, přičemž reálnost návratu k původnímu stavu je dnes otázkou – právě tato omezení a další perspektivy jsou náplní následujících kapitol. Dále budou popsány metody, které lze dnes považovat za tradiční, neboť byly desítky let k dispozici současně s radiografií – elektromagnetické indikátory a sekané sondy, ale v případě elektromagnetických indikátorů došlo v posledních letech k velmi zásadnímu rozvoji měřicí techniky. Jako poslední bude opět podrobněji popsána metoda georadaru, která se jako plnohodnotná začlenila do portfolia využitelných metod v posledním desetiletí, a navzdory počáteční nedůvěře se stala perspektivně

vůdčí metodou s ambicemi v řadě případů radiografii více než adekvátně nahradit, či dokonce v některých aspektech předstihnout.

### 3.4.1 Radiografie – nedestruktivní metoda

Radiografická metoda je založena na specifických vlastnostech záření gama či rentgenového záření, které je rozptylováno a absorbováno prostředím, kterým prochází. Míra zeslabení při stejné energii záření je závislá na prozařované tloušťce a na objemové hmotnosti materiálu. V technické praxi jde tedy o metodu umožňující zobrazení vnitřních nehomogenit v materiálech a prvcích konstrukcí zcela bez porušení.

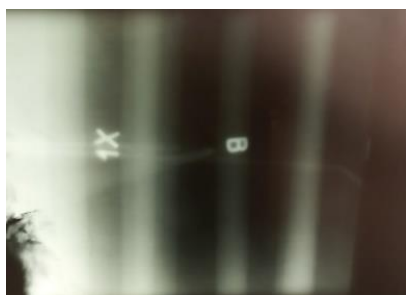
V případě železobetonu je například záření zeslabováno výrazněji ocelovou výztuží nežli betonem. Míra zeslabení záření po průchodu materiálem je zaznamenávána na radiografickém filmu či elektronickém záznamovém médiu (flatpanel, paměťová folie), který po vyvolání zobrazuje vnitřní strukturu kontrolovaného místa. U železobetonu se rozložení výztuže v prozařované části konstrukce projevuje světlejšími stopami nižšího zčernání na vyvolaném filmu způsobeným centrálním průmětem výztuže.

Gamazářič je umístěn v defektoskopickém stínícím krytu, který se v současné době nejčastěji zhotovuje z ochuzeného uranu. Velikost krytu limituje aktivitu zářiče. Gamazářiče umožňují prozařovat železobetonové konstrukce až do tloušťky 1 m, ovšem za cenu extrémně dlouhých expozic. Velkou předností gamazářičů je jejich mobilnost a nezávislost na zdrojích energie. Používají se proto převážně při pracích v terénu.

Pomocí dálkového ovládní lze zářič zasunout i do nesnadno přístupných míst.

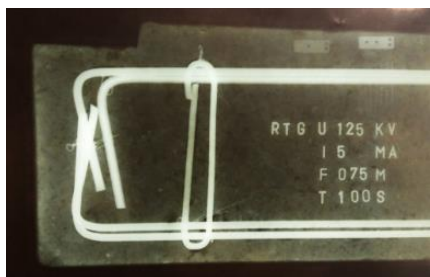
Pokud jsou k tomu vhodné podmínky, je možné použít místo gamazářiče zdroj rentgenového záření – technický rentgen. Jeho výhodou je vyšší jakost zhotovených radiogramů, nevýhodou je omezená tloušťka prozařovaného materiálu (např. v případě betonu do cca 150 mm), velké rozměry a závislost na zdroji elektrické energie. Tato zařízení se tedy používají ve specifických případech, nebo v rámci stabilních defektoskopických pracovišť.

Nejčastějším využitím radiografie v diagnostice konstrukcí bylo právě stanovení vyztužení, zejména v silně vyztužených železobetonových konstrukcích, v nichž jsou pruty výztuže uloženy těsně vedle sebe, popř. v několika vrstvách nad sebou a v konstrukcích, v nichž je ocelová výztuž kryta velkou vrstvou betonu. Zde je nezbytné jako zdroj záření užít izotop Co60 (gamagrafie), který umožňuje prozáření tlouštěk betonu cca do 1 m. Radiografii lze rovněž užít při stanovení kontroly zainjektování předpínací výztuže.



*Obr. 1 Radiogram zachycující obraz výztuže v železobetonovém trámu uprostřed rozpětí – výztuž je uložena ve dvou vrstvách, nicméně díky pronikavosti záření gama jsou všechny pruty detekovatelné.*

Radiografie s užitím rentgenu (rentgenografie) se užívá v diagnostice železobetonových konstrukcí v případech, kdy je postačující limitní prozařovaná tloušťka betonu do 150 mm. V poslední době jde zejména o diagnostiku rozličných plastik, které jsou součástí konstrukcí (nebo konstrukcí samotnou), či jako ideální postup k zobrazení makrostruktury různých zkušebních těles či vzorků (např. drátkobeton). Vhodnost využití rentgenu k podobným účelům vyplývá i z faktu, že díky nižší energii záření mají radiogramy pořízené s užitím rentgenu (rentgenogramy) výrazně vyšší jakost (dáno kontrastem a ostroty radiogramu), než odpovídající radiogramy pořízené s užitím gamazářiče (gamagramy).



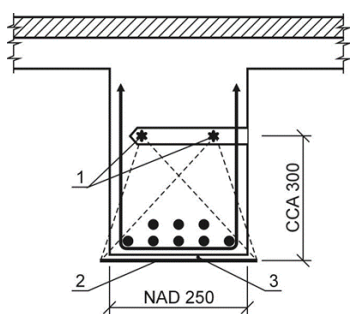
Obr. 2 Radiogramy téhož prvku (železobetonový prefabrikát tloušťky 70 mm vyztužený pruty výztuže Roxor 8 mm), vpravo gamagram, vlevo rentgenogram, je dobře patrná výrazně vyšší jakost rentgenogramu.

Podle typu a rozměrů prozařovaného prvku se volí poloha ohniska prozařování a poloha záznamového média (filmu) tak, aby bylo zajištěno ideální zobrazení předpokládané výztuže, a aby současně byl film exponován, pokud možno rovnoměrně. Současně se volí konfigurace prozařování tak, aby prozařovaná tloušťka nepřesáhla 300 – 350 mm (z důvodů omezení doby expozice).

V případě radiografie železobetonových trámů bývá zdroj záření umístěn často do předvrtaného otvoru dovnitř prvku, což je dobře možné díky malým rozměrům používaných izotopů (vrtá se otvor o průměru cca 16 mm). V případě železobetonových desek do tloušťky 300 – 350 mm se umísťuje zářič na povrch desky (a radiografický film na povrch protilehlý), v případě větších tlouštěk materiálu se opět izotop umístí do předvrtaných otvorů.

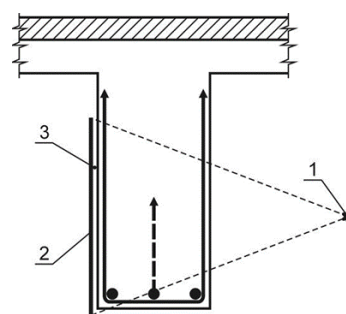
Každé místo se prozařuje postupně ze 2 a více ohnisek, aby bylo možné vyhodnotit polohu a průměr výztuží.

Obecně jsou pro typické prvky železobetonových konstrukcí známy optimální geometrie prozařování. Na níže uvedených příkladech je vyznačena poloha: 1 – ohniska prozařování (polohy zdroje záření), 2 – radiografický film, 3 – olovené fixační značky (díky vysoké hustotě olova se dobře zobrazí na radiogramu a umožní přesnost geometrie při vyhodnocování).

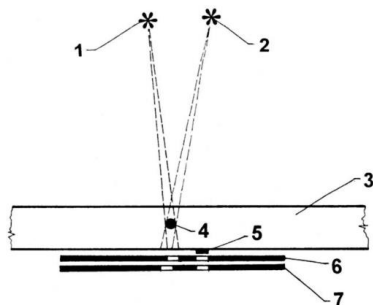


Obr. 3 Příklad optimálního prozařování trámu o šířce nad 250 mm [7].

Obr. 4 Příklad optimálního prozařování prozařování trámu – zjištění polohy smykové výztuže [7].



Rozložení výztuže v průřezích zkoumaných konstrukcí se nejčastěji zjišťuje graficky vynesáním geometrie, v jaké byly průřezy snímkovány. Na výkres se vykreslí řez konstrukcí, poloha ohnisek zářičů během prozařování a umístění fixačních olovených značek. Následně se začnou vynášet stopy výztuže na záznamovém médiu. Zakreslené stopy výztuže se postupně propojují s oběma ohnisky. Průsečíky příslušných spojnic ohniska se stopami výztuže ohraničují polohu výztuže.



Obr. 5 Schéma principu vyhodnocování radiografické kontroly výztuže: 1 - první ohnisko prozařování, 2 - druhé ohnisko prozařování, 3 - železobetonová deska, 4 - prut ocelové výztuže, 5 - olovené značení, 6 - radiografický film z první expozice, 7 - radiografický film z druhé expozice [7].

Výsledkem radiografie je **přesné určení polohy a průměru všech výztuží** v daném místě železobetonové konstrukce.

V rámci výzkumu autora zveřejněného v rámci [30] bylo experimentálně ověřeno, že prakticky při všech běžně dosažitelných prozařovaných tloušťkách betonu (do 650 mm) je zaručena odpovídajícím rozdílem zčernání radiogramu jak detekovatelnost všech užívaných průměrů betonářských výztuží, nad 650 mm již jsou obtížně detekovatelné profily menšího průměru než 10 mm.

Co se týká rozeznatelnosti typu výztuže dle tvaru průřezu či žebírek, záleží na konkrétní poloze (natočení výztuže), ale do tloušťky betonu 300 mm je možnost určení pravděpodobná, zejména u větších průměrů výztuže.

Zásadním omezením radiografie je fakt, že při její aplikaci je využíváno ionizující záření, jež je lidskému zdraví škodlivé. V české legislativě je ochrana před zářením řešena Atomovým zákonem 263/2016 Sb. (tzv. Atomový zákon) a navazující vyhláškou č. 422/2016 Sb. (Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje).

V důsledku těchto předpisů, a dalších souvisejících platných nařízení je provádění gamagrafie v terénu velmi obtížné, je třeba zajistit mimo jiné:

- V terénu vytyčení přechodného kontrolovaného pásma s vyloučením pohybu a pobytu osob z řad obyvatelstva v době prozařování.
- Kontrola dosažených dávkových příkonů a dávek na hranicích přechodného kontrolovaného pásma.
- Převaha na místo kontroly vozidlem splňujícím předpisy ADR, řidič s certifikací pro přepravu nebezpečných nákladů, plánování trasy s ohledem na nepovolené části komunikací pro přepravu nebezpečných nákladů. Zřízení externího manažera přepravy.
- Hlášení místa a doby prozařování příslušným úřadům, včetně hlášení o trase a době přepravy.
- Pravidelné ověřování provozní stálosti a dlouhodobé stability zdroje záření certifikovaným orgánem.
- Certifikace personálu pro práci s významným zdrojem záření.

Všechny tyto aspekty vedly k tomu, že i poslední pracoviště, které provádělo terénní radiografii železobetonových konstrukcí izotopem Co60 (Ústav stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně) se této činnosti z ekonomických i organizačních důvodů vzdalo.

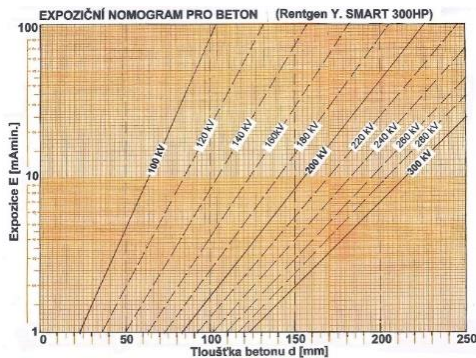
Nelze však vyloučit, že tato metoda bude pod tlakem investorů pro speciální případy obnovena.

Jak již bylo naznačeno, výhodou rentgenografie oproti gamagrafii je výrazně vyšší jakost radiogramů. Na druhé straně umožňuje zdroj záření v případě železobetonu prozařování výrazně menších tloušťek (do 150 mm), a zdroj záření je výrazně rozměrnější. Primárně byly sice technické rentgeny určeny pro užití v ozařovnách, nicméně u moderních přístrojů není vyloučeno užití v terénu. Příznivý je zcela jiný přístup k rentgenům, z hlediska ochrany před zářením, vzhledem k tomu, že rentgen je zcela jinou kategorií zdroje záření, jeho záření je kolimováno a pro přepravu nejsou třeba žádná opatření.

Rentgenografie si díky tomu našla prostor jako náhrada gamagrafie při prozařování konstrukčních prvků s menší tloušťkou, například v oblasti prozařování plastik, tedy uměleckých děl, které jsou součástí konstrukcí, či konstrukcí samou, nebo při makroskopické kontrole vnitřní struktury experimentálních zkušebních těles a vzorků.

V souvislosti s rozšiřováním možností využití rentgenografie v kombinaci s novým využíváním digitálních záznamových médií (paměťové folie) jsou nově zpracovávány tzv. expoziční nomogramy pro volbu parametrů prozařování (proud na rentgence, napětí na rentgence, doba expozice) v závislosti na geometrii (tloušťka materiálu a ohnisková vzdálenost) a materiálu.

K rentgenovým přístrojům se běžně dodávají expoziční nomogramy pro ocel, ale ty nelze jednoduše přetransformovat pro materiály jako je beton. Je třeba uskutečnit řadu expozic pro různé vrstvy betonu na zvolený záznamový prostředek a pro různé nastavení energie na rentgenu.



Obr. 6 Experimentálně získaný nomogram pro beton a rentgen YXLON SMART 300HP v kombinaci s paměťovými foliemi Dürr [8].

### 3.4.2 Sekané sondy – destruktivní metoda

Tuto metodu nelze nezmínit. Spočívá v odstranění krycí vrstvy betonu a obnažení výztužných vložek v potřebném rozsahu. Navzdory její problematickosti v řadě případů, je bohužel řadou subjektů stále užívaná jako základní metoda pro ověření vyztužení prvků železobetonové konstrukce. Jde sice o řešení relativně nejlevnější a nevyžadující žádnou speciální technologii, kromě lidské síly a bouracího kladiva, nicméně jde o metodu problematickou. Negativa se dají shrnout do několika bodů:

- Dochází k poškození povrchu konstrukce, což je v řadě případů (zejména u nových konstrukcí) nevhodné, u některých konstrukcí (pohledový beton, vodonepropustné konstrukce) vysloveně nepřijatelné.
- V extrémním případě může dojít i k zásadnímu statickému oslabení v místě realizace sondy.
- Sekaná sonda nemusí odhalit u prvků vyztužených ve více vrstvách veškerou hledanou výztuž, což vede při statickém přepočtu k podcenění únosnosti konstrukce.
- Samotné odstranění krycí vrstvy výztuže ve značném rozsahu v kombinaci s nekvalitním zapravením, nebo jeho absencí může být v budoucnu zdrojem koroze.

Sekané sondy lze akceptovat jen jako pomocnou metodu, realizovanou v nezbytném minimálním rozsahu, jako prostředek např. k ověření průměru výztužného prutu v případech, že to není možné jinak, nebo pro kalibraci nedestruktivních metod, či pro určení druhu výztuže.

V případě, že k obnažení výztuže (zejména ve větší hloubce) slouží návrt (obvykle běžným vrtáním s přiklepem, spíše výjimečně jádrovým vrtáním), lze hovořit o tzv. vrtané sondě.

### 3.4.3 Elektromagnetické indikátory – nedestruktivní metoda

Jde svým způsobem již o tradiční metodu, která má kořeny hluboko v minulosti. Dnes je tendence ji někdy označovat dle zvyklostí západních zemí Eddy Current, tedy Metoda vířivých proudů. Poměrně sofistikované přístroje druhé generace byly k dispozici již počátkem 80. let 20. století.

*„V poslední době je využívána metoda založená na pulsně – indukční technologii, která má cívkou vyhledávací hlavy bez magnetického jádra, a tudíž je odolná vůči výše uvedeným vlivům. Princip metody je popsán v [11]. Metoda má oporu i v platných normách, zejména v ČSN 73 2011 [12], která je však zaměřena spíše na starší typy přístrojů“ [9].*

V současnosti je v České republice (a šířeji i v Evropě) dosud využívána poměrně široká plejáda přístrojů, několika generací, od několika výrobců. Zařízení se liší uspořádáním, i měřicím výkonem, ovlivňujícím citlivost a hloubkový dosah sondy. Lze konstatovat, že v oblasti profesionálních přístrojů dominují firmy Proceq (která představuje tradičního výrobce této

techniky, jehož výrobky se v oboru diagnostice konstrukcí používají již mnoho desítek let) se svojí řadou Profometer, zatím nejnovějším produktem jsou přístroje šesté generace Proceq Profometer PM 600/630/650, a dále firma Hilti svojí řadou Ferrosan, s posledním modelem Hilti PS300 Ferrosan. Oproti starším generacím přístrojů mají obě uvedené sondy pojezd detekující ujetou dráhu po povrchu konstrukce. To je další zásadní odlišnost od starších či jednodušších přístrojů, kdy bylo třeba po indikaci výztuže pod sondou zakreslit její polohu na povrch konstrukce.

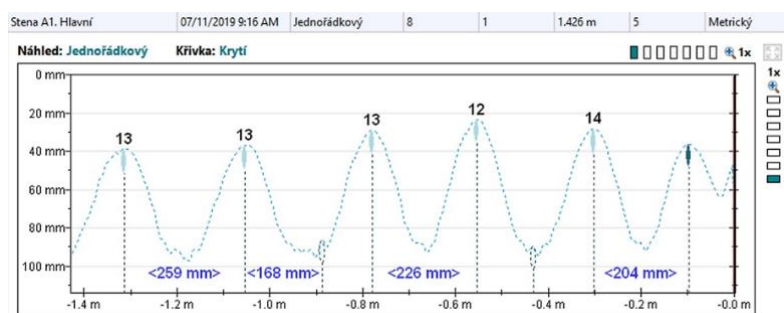
Metoda je předurčena pro určování relativně jednodušších typů vyztužení, důvodem jsou omezení daná fyzikálním principem metody. V rámci měření se sonda pohybuje po povrchu konstrukce v liniích s indikací výztuže, přes kterou sonda „přejede“. Poslední modely umožňují i plošné měření s řadou pojezdů ve dvou navzájem kolmých směrech, vzhledem k fyzikálním omezením této metody může být takové měření někdy zavádějící.

Na druhou stranu devízou těchto nejmodernějších přístrojů je možnost určení průměru výztuže za optimálních podmínek, daných vzdálenostmi okolních prutů, ale i současnou možností kalibrace v závislosti na vzdálenosti okolních výztuží.

Omezující faktory:

- Hloubkový dosah – obecně – při použití běžných sond 60 mm až 100 mm, při použití hloubkových sond ve výjimečně příznivých případech 150 mm až 200 mm [9].
- Blízkost sousední výztuže – pruty příliš blízko u sebe nejsou rozlišitelné – zde záleží rozlišitelnost vzdálenosti prutů od sebe v kombinaci s hloubkou pod povrchem betonu.
- Je možné detekovat jen vrstvu výztuže nejbližší povrchu.
- Není možné stanovit druh výztuže ani její korozi.

V současnosti je pomyslnou špičkou mezi evropskými přístroji šestá generace přístrojů Profometer PM-6 (typ 600, 630, 650). Možnosti měření přístrojem Profometer PM-630, včetně řady praktických případů byly podrobně popsány v [9], proto zde nebudou opakovány. Je třeba ale opakovat, že i u takto sofistikované sondy je nezbytná zkušenost obsluhy, a ověření různých aspektů měření na modelech i adekvátních reálných konstrukcích.



Obr. 7 Příklad záznamu přístroje PM-630 z měření polohy hlavní výztuže ve stěně železobetonového podchodu v areálu vápenky Mokrá - liniový sken hlavní výztuže ve stěně snedestruktivním měřením průměru výztuže. Krytí výztuží: 24 až 40 mm. Průměr: naměřený 12-14 mm, skutečný (ověřený sondou) 12 mm. Mírná disproporce v naměřených hodnotách jde na vrub druhu výztuže TOR 30 se spirálovitě kroucenými podélnými žebry, která opticky (i elektromagneticky) rozšiřují průměr výztuže [10].

### 3.4.4 Georadar – nedestruktivní metoda

Georadar (v anglofonní oblasti GPR – ground penetrating radar) je metoda založená na principu vysílání vysokofrekvenčních elektromagnetických pulzů (frekvence řádově stovky MHz až jednotky GHz) do zkoumaného prostředí a na následné registraci jejich odrazů od překážek. Dosah georadaru dle prostředí činí až 15 m. Metoda je dnes již standardně využívána k lokalizaci nehomogenit v zemním prostředí (archeologické průzkumy, vyhledávání polohy potrubí apod.), dále k lokalizaci dutin za stěnami a ostěním tunelů, chodeb a stok a v poslední době je metoda využívána pro lokalizaci ocelové výztuže a dalších nehomogenit v betonu při diagnostice železobetonových konstrukcí [13].

Georadar je nedestruktivní diagnostická metoda. Vysílací anténa (transmitter) generuje vysokofrekvenční elektromagnetický puls, který se šíří zkoumaným prostředím. Přijímač (receiver) přijímá v nastaveném časovém okně pulzní odezvu. K odrazu elektromagnetických vln dochází na každém rozhraní změny elektromagnetických vlastností prostředí srovnatelných s vlnovou délkou signálu. Registrovanou veličinou je intenzita odražené vlny zaznamenávaná v diskretních časových okamžicích. Měření lze provádět s velmi hustým krokem měření a získat tak prakticky kontinuální obraz zkoumaného prostředí. Z rychlosti šíření elektromagnetického vlnění prostředím lze čas příchodu přepočítat na hloubku odrazného rozhraní od povrchu. Rychlost šíření u nemagnetických materiálů je závislá především na relativní permitivitě zkoumaného materiálu podle vzorce:

$$v = \frac{c}{\varepsilon^{1/2}} \quad (1)$$

kde je  $v$  rychlost šíření elektromagnetického signálu prostředím, v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  
 $c$  rychlost šíření vakuem, v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  
 $\varepsilon$  relativní permitivita prostředí, -.

Útlum elektromagnetického signálu  $\alpha$  (dB/m) a s tím související maximální hloubka průniku signálu  $H$  (m) jsou závislé především na vodivosti prostředí  $\sigma$  (S·m). Pro nemagnetické materiály lze pro výpočet koeficientu útlumu a použít rovnici:

$$\alpha = \frac{1,64 \cdot \sigma}{\varepsilon^{1/2}} \quad (2)$$

kde je  $\sigma$  vodivost prostředí, v S·m;  
 $\varepsilon$  relativní permitivita prostředí, -.

Pro vysokofrekvenční elektromagnetické pulzy je vodivost, a tím i hodnota koeficientu útlumu frekvenčně závislá. U vyšších frekvencí dochází k většímu útlumu, a díky tomu je hloubkový dosah měření menší. Na rozhraní dvou prostředí se skokovou změnou elektromagnetických vlastností dochází k odrazu části signálu.

Tab. 1 Vhodné frekvence antény související s hloubkou zobrazení a velikostí cíle [14].

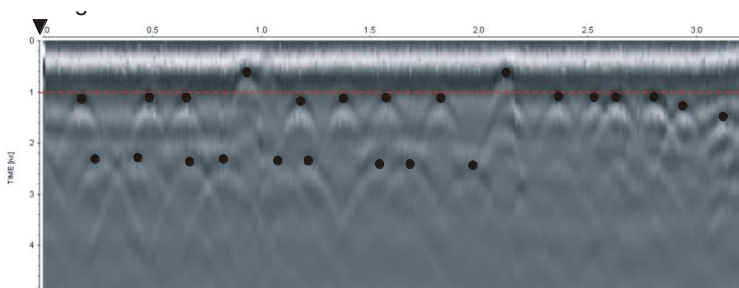
<b>Frekvence antény související s hloubkou zobrazení a velikostí cíle</b>			
Typická doba pulzu	Střední frekvence antény	Přibližná hloubka zobrazení	Přibližná velikost cíle
[ns]	[MHz]	[m]	[m]
1,0	1500	0,3	0,03
1,5	1000	1,0	0,10
3,0	500	2,0	0,20
6,0	250	3,0	0,30
15,0	100	5,0	0,50
30,0	50	10,0	1,00
75,0	20	20,0	2,00

V tab. 1 je patrná závislost hloubkového dosahu na vysílací frekvenci, navíc vyšší hloubkový dosah je „vykoupen“ menší citlivostí, tedy větší ideální velikostí cílového detekovatelného objektu. Právě pokusy uplatnit v diagnostice železobetonu geotechnické radary s nižšími frekvencemi vedla zpočátku u odborné veřejnosti k nedůvěře v tuto technologii.

Z tabulky jasně vyplývá, že pro diagnostiku výztuží by byly optimální sondy s vysokou frekvencí (1,5 GHz a vyšší), pochopitelně s vědomím nižšího hloubkového dosahu (řádově desítky cm).

Druhou problematickou okolností, která bránila zařazení georadarů mezi běžně užívané technologie v diagnostice konstrukcí patřil tradiční způsob výstupů ze zařízení a jeho komplikované vyhodnocování, do značné míry závislé na odborné erudici a zkušenostech obsluhy.

Standardní výstup z georadarového měření, kdy se sonda pohybuje lineárně po povrchu má podobu podélného řezu zkoumaným prostředím. V tomto zobrazení je poloha nehomogenit určována určujeme z vrcholů hyperbolických zobrazení odrazů radarového signálu v georadarovém skenu. Interpretace těchto skenů je výsadou odborníků s rozsáhlými zkušenostmi [15]. Nicméně zprovozených experimentů bylo zjevné, že georadarové měření je schopno detekovat betonářskou výztuž i v několika vrstvách, samozřejmě s drobnými omezeními danými geometrií vzájemné polohy měřicího zařízení a výztuží.



*Obr. 8 Ukázka georadarového skenu tzv. radarogramu – s charakteristickými projevy prutů ocelové výztuže v železobetonu, kdy polohu výztuží určujeme z vrcholů hyperbolických zobrazení odrazů radarového signálu v radarogramu. Zde byly do vrcholů odrazových hyperbol pro názornost vloženy černé tečky označující skutečnou polohu detekovaných výztuží [16].*

### **Sonda Hilti PS1000 X-scan – přelom možnosti využití georadaru v diagnostice železobetonu**

Přelomem ve využívání principu georadaru při stavebně technických průzkumech se stalo uvedení na trh přístroje PS1000 X-scan výrobce Hilti. Jak konstrukce zařízení, tak používaný software, jsou přímo určeny pro diagnostiku železobetonu s předpokládanou možností určit jak polohu ocelových výztuží, tak dalších případných nehomogenit v prvcích betonových konstrukcí. Na rozdíl od klasických georadarů je sonda určena k pohybu po povrchu konstrukce relativně malá, a pro dokonalé určení polohy i několika objektů ležících nad sebou je osazena trojicí antén. Vzhledem k tomu, že na volbě vysílací frekvence závisí jednak hloubkový dosah zařízení, jednak minimální velikost detekovatelného objektu zvolil výrobce řešení – vysílací frekvence 2 GHz, umožňující detekci objektů s následující přesností:

- Hloubka detekce do 300 mm.
- Přesnost lokalizace  $\pm 10$  mm.
- Přesnost určení hloubky  $\pm 10$  mm.

Údaje o přesnosti jsou spíše orientační, při přesném a správném měření je přesnost prostorového určení objektu vyšší.



*Obr. 9 Vlastní georadarová sonda Hilti PS1000 X-scan má relativně malé rozměry (310 × 180 × 150 mm), opatřená displejem pro okamžitou vizualizaci skenů (vlevo). Výrobce alternativně dodává k sondě terénní tablet pro možnost rozsáhlejšího vyhodnocení skenů v terénu (vpravo) [17].*

Pohybem koleček vozíku sondy je detekován a zaznamenáván její pohyb po povrchu konstrukce. Zde je potřeba kvitovat pozitivně fakt, že pohyb každého pojezdového kola je snímán samostatně a záznam dráhy je odvozen od záznamu kola, které se v daném okamžiku pohybuje nejvíc, což eliminuje chybný záznam dráhy na nerovném povrchu, kde není celý podvozek v kontaktu s povrchem.

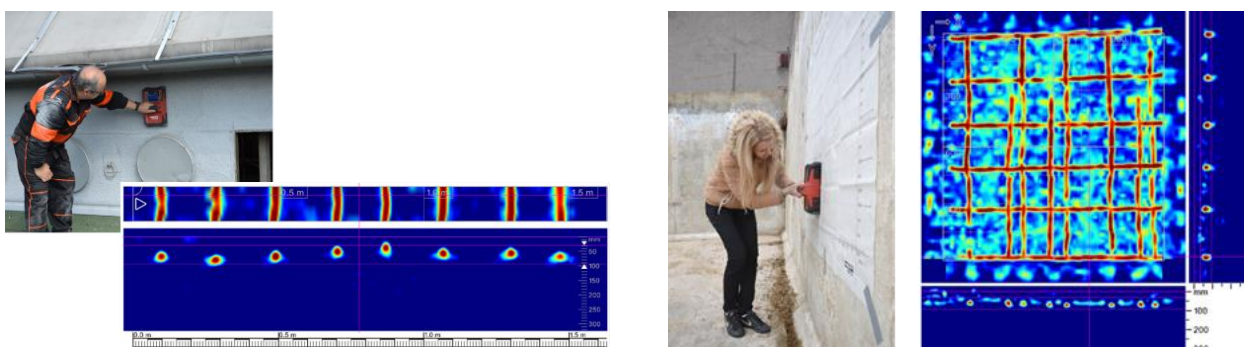
Sonda umožňuje v principu dva typy skenování liniové a plošné. V praxi lze použít buď jednodušší liniový sken délky až 10 m (pohyb sondy jen v jednom směru, zde je použití do jisté



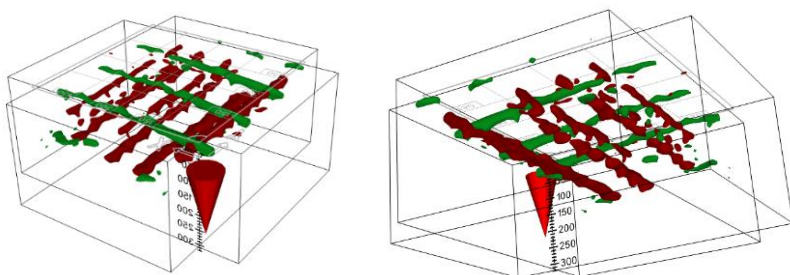
míry analogické k užívání magnetického indikátoru výztuže), nebo lze užít plošný sken, kdy sondou pohybuje po povrchu konstrukce v předem nastaveném rastru ve dvou na sebe kolmých směrech buď na ploše  $600 \times 600$  mm, nebo  $1200 \times 1200$  mm.

Připojený software poté přímo vytváří na monitoru jak sondy, tak později v počítači nebo dodaném tabletu, přímo vykreslení polohy zachycených objektů, a to buď jako 2D zobrazení (půdorys skenované plochy + řezy u liniového skenu, nebo půdorys skenované plochy + řezy ve dvou na sebe kolmých rovinách), nebo přímo 3D zobrazení skladby zjištěných objektů ve zkoumané části konstrukce. V softwaru je rovněž možné upravovat při vyhodnocování skenu řadu parametrů souvisejících s vlastnostmi betonu a ovlivňujících např. přesnost měření hloubky objektů. Stejně tak je možné využít i původní surová data v podobě hyperbol.

Obrovskou výhodou je to, že sonda je osazena ne jednou, ale hned třemi anténami, které provádí souběžně měření. Každý sken jsou de facto 3 skeny vzdálené od sebe cca 8,5 cm. Proto je možné i při liniovém skenu zaznamenat úhel, pod kterým výztuže kříží dráhu sondy.



Obr. 10 Vlevo liniové skenování na boku průvlaku železobetonové konstrukce a výstup v podobě softwarem upraveného skenu, který je v horní části tvořen pohledem na skenovanou dráhu sestaveným z údajů trojice antén, v dolní části pak podélným řezem vycházejícím z původního radarogramu s odrazovými hyperbolami, vpravo plošné skenování na rastru  $1200 \times 1200$  mm přilepeném na povrch konstrukce železobetonové stěny, a výstup v podobě softwarem upraveného skenu, který je tvořen pohledem na skenovanou plochu a řezy ve dvou na sebe kolmých rovinách.



Obr. 11 3D výstupy plošných skenů lze s výhodou využít při vyhodnocování prostorově náročnějších vyztužení, lze je libovolně prostorově otáčet či naklápět (zde sken  $600 \times 600$  mm na spodním lici předpjatého mostního nosníku typu I, se zachycenou předpínací i konstrukční podélnou výztuží).

Veškeré výstupy měření lze okamžitě vizualizovat nejprve na displeji sondy, poté v rámci vyhodnocovacího programu (v rámci dodaného tabletu, či běžného PC). Následně je možný export v podobě obrázků v běžných grafických editorech, či například export do programu Autocad k dalšímu zpracování. Rovněž je možné propojení vyhodnocovacích programů s elektromagnetickými indikátory téhož výrobce.

Ač je zařízení určeno primárně ke stanovení polohy ocelové výztuže, je možné s jeho pomocí lokalizovat v betonu i liniové objekty z jiných materiálů, či dutiny. Rovněž umožňuje záznam zadní strany betonové desky.

Georadar Hilti PS1000 X-scan se stal skutečným přelomovým momentem pro využití technologie georadaru v diagnostice železobetonových konstrukcí a prolomil dosavadní nedůvěru uživatelů v tuto technologii.

Na Evropském trhu zůstal přístroj Hilti PS1000 X-scan většinu druhého decennia jediným georadarem určeným prioritně pro diagnostiku výztuže. Na konci desetiletí se k němu připojil

přístroj GPR Live tradičního výrobce diagnostických přístrojů Proceq. Tato sonda, která byla Ústavem stavebního zkušebnictví FAST VUT v Brně rovněž testována, se v mnohém předchozím přístroji podobá a v mnohém se liší. Sonda je obdobných rozměrů, nicméně jako zobrazovacího displeje nevyužívá integrovaný displej, ale připojený Apple iPad. Disponuje pouze jednou anténou, ale multifrekvenční v rozsahu 0,9 to 3,5 GHz, umožňující hloubkový dosah až 700 mm.

Při nedávno publikovaném porovnání sond Hilti PS100 X-scan, Proceq GPR Live a obdobné kanadské sondy GSSI StructureScan Mini XT (která se na Evropském trhu nevyskytuje) [18] vyplynula hlavní výhoda přístroje Proceq, která spočívá v hloubkovém dosahu – 70 cm oproti 60 cm u GSSI a 30 cm u Hilti. Je pravda, že nebyly zvažovány aspekty uživatelské výhodnosti softwaru, a že autorem porovnání byl tým Proceq. Podobné porovnání, zahrnující i další lokálně rozšířená zařízení bylo publikováno v [19].

Pro stanovení měřících postupů a metodiky je v dalších kapitolách uvažována sonda Hilti PS100 X-scan.

## **4 DIAGNOSTIKA VYZTUŽENÍ KONSTRUKCÍ Z PŘEDPJATÉHO BETONU**

*„Vzhledem k nedávným haváriím předpjatých mostních konstrukcí v České republice i v zahraničí je v současnosti věnována mimořádná pozornost stavebně technickým průzkumům předpjatých mostních konstrukcí, s cílem stanovit nejen technický stav ale především odhadnout na jeho základě zbytkovou životnost konstrukce pro zajištění bezpečnosti při jejím využívání.*

*Je ovšem otázkou, zda současná úroveň diagnostických metod a dostupných přístrojů pro jejich realizaci odpovídá požadavkům na dokonalý průzkum konstrukce, přesněji řečeno průzkum s ideálně relevantními výsledky pro posouzení stavu konstrukce“ [20].*

### **4.1 DIAGNOSTIKA PŘEDPJATÝCH KONSTRUKCÍ**

*„Lze konstatovat, že pro stanovení celkového stavu, životnosti a užitných vlastností předpjaté konstrukce je stěžejní zejména zjištění stavu předpínací výztuže. Zde nemá smysl hovořit například o kabelech umístěných volně, mimo betonový průřez, kde je určení stavu snadné, ale jde především o předpínací dráty a kabely umístěné v kabelových kanálech. Ochrana výztuže v kabelových kanálech před korozi je do značné míry závislá na včasném a správném zainjektování kabelového kanálu vhodnou injektážní směsí. V rámci stavebně technických průzkumů předpjatých konstrukcí a dílců by tedy měla být věnována mimořádná pozornost nejen již vzniklé korozi předpínací výztuže, ale i samotné existenci správného zainjektování kabelových kanálů, kde absence injektážní směsi je vada, kterou je třeba pro snížení budoucích rizik neprodleně odstranit.*

*Pochopitelně v rámci diagnostiky předpjatých konstrukcí je věnována pozornost i ostatním parametrům, například vlastnostem betonu, ale stav předpínací výztuže, nebo její ohrožení je základním parametrem.*

*Samotnou diagnostiku stavu předpínací výztuže lze rozdělit do dvou fází. V první fázi jde o přesné určení polohy, respektive průběhu předpínacích drátů či kabelů, ve druhé fázi pak stanovení přítomnosti injektážní směsi a jejich stavu (koroze)“ [20].*

### **4.2 VYUŽITELNÉ METODY PRO STANOVENÍ POLOHY PŘEDPÍNAČÍ VÝZTUŽE V KONSTRUKCI**

*„Přestože správná poloha předpínací výztuže, respektive kabelových kanálů v předem předpjatých i dodatečně předpjatých konstrukcích a prvcích je dána výrobní dokumentací, je třeba počítat s jistými disproporcemi, vzniklými při výrobě. Určení přesné polohy a průběhu předpínacích kanálů, a tím i výztuže je tedy logicky prvním krokem v jejich diagnostice. Nutno poznamenat, že v řadě případů je kabelový kanál vymezen ocelovou chráničkou (bezešvé trubky Sandrik)“ [20].*

Vyjděme z předpokladu, že pro účely diagnostiky disponujeme čtyřmi základními metodami pro stanovení polohy výztuže v betonu, které byly popsány podrobně v kapitole 3.

Z dosavadních rozsáhlých zkušeností pracoviště autora jednoznačně vyplývá volba georadaru, jako ideální metody pro stanovení přesné polohy předpínací výztuže v konstrukci, v případech prvků, kde je výztuž pro radarové měření nedostupná by bylo nezbytné využít radiografii, ta však z obecně známých důvodů není momentálně v České republice k dispozici (radiografie Co60<sup>o</sup>) [20].

#### 4.3 NÁSLEDNÉ METODY STANOVENÍ ZAINJEKTOVÁNÍ KABELOVÝCH KANÁLŮ A STAVU KABELŮ (KOROZE)UÁLNÍ KONTROLA

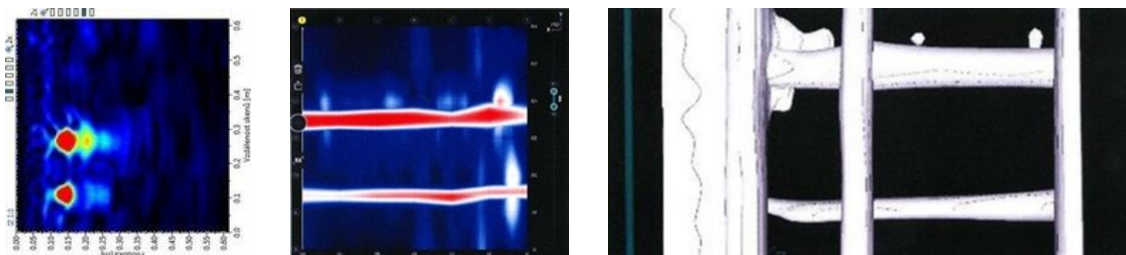
V současnosti se v rámci diagnostiky předpjatých zejména mostních konstrukcí praktikuje de facto jediná základní metoda pro stanovení správnosti zainjektování kabelových kanálků a posouzení případné koroze předpínací výztuže. Jde o metodu destruktivní spočívající ve vybraných místech v cíleném návrtu k samému okraji kabelového kanálku, či až k předpínací výztuž, a následně vizuální posouzení a konstatování požadovaných skutečností – v případě správného zainjektování je proveden i test injektážní směsi na karbonatoci roztokem fenolftaleinu.

V neposlední řadě se v posledních letech mezi odborníky rozvíjí diskuse, zda je vůbec vhodné v rámci těchto sond otevřít doposud chráněné vnitřní prostředí kabelového kanálku vnějším vlivům (ovzduší, vlhkost), tedy zda právě takto provedená diagnostika nemůže být v budoucnu příčinou vzniku koroze výztuže. Dalšími riziky je pochopitelně možnost poškození předpínací výztuže při vrtání, a obecnou nevýhodou metody je pouze bodové zjištění stavu, který může být „o pár centimetrů dál“ zcela odlišný – výsledek může být v extrémním případě zcela zavádějící, v závislosti na počtu a místech provedených sond.

Jednoznačně vhodnější metodou pro výše uvedený účel se jeví radiografie s užitím gamazářiče Co60. Vhodně zvolená konfigurace prozařování v tomto případě umožňuje zjistit provedení zainjektování kabelového kanálku bez jeho narušení, tedy bez narušení vnitřního prostředí okolí předpjaté výztuže s následnými riziky, která zde byla konstatována. V současnosti je v České republice takováto radiografie nedostupná, ale tento stav se může pod tlakem investorů (správců mostních či jiných předpjatých konstrukcí) změnit.

Vzhledem k tomu, že současné období je typické překotným vývojem nových metod, ale zejména rozšiřováním možností metod stávajících, lze předpokládat, že se v dohledné době podaří najít alternativní, ideálně čistě nedestruktivní metody a postupy pro stanovení zainjektování a koroze předpínací výztuže.

*„Na základě experimentů prováděných ve spolupráci s firmou Proceq se zdají být jednou z cest nové radarové a ultrazvukové přístroje. Na modelových blocích v areálu Fakulty stavební VUT v Brně, které obsahují i model zainjektovaného a nezainjektovaného kabelového kanálu s výztuží byly testovány radar Proceq GPR Live a ultrazvukový odrazový přístroj Proceq Pundit PL-200 PE. Předběžné výsledky na modelu naznačily možnost dalšího vývoje a vhodnost dalších experimentů v tomto směru“ [20].*



Obr. 12 Vlevo záznam lokalizace dvojice kabelových kanálů UZ sondou Proceq Pundit PL-200 PE, uprostřed a vpravo záznam plošného skenu radarem Proceq GPR Live. Výstupy naznačují patrný rozdíl mezi zainjektovaným a nezainjektovaným kanálem (nahore) a pravděpodobnou možnost využití modifikace těchto metod a zařízení (samozřejmě s ohledem např. na přítomnost ocelové chráničky a podobně) [20].

#### 4.4 KOROZE PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽE

Pro hodnocení závažnosti koroze u předpínací výztuže platí zcela jiný přístup než u výztuže betonářské [21].

Norma ČSN 73 6221 pro mostní konstrukce uvádí úbytek průřezové plochy větší než 5 % již jako havarijní stav konstrukce! Přitom jde o korozní úbytky na jednotlivých drátech předpínacího lana v řádech desítek mikrometrů. Lze tedy prakticky jakoukoli korozi předpínací výztuže s měřitelným korozním úbytkem považovat za nepřijatelnou. Tento aspekt následně formuluje požadavky na diagnostiku konstrukcí z předpjatého betonu zcela zásadním způsobem.

#### 5 DIAGNOSTIKA ROZPTÝLENÉ KOVOVÉ VÝZTUŽE

Provádění betonů s rozptýlenou výztuží patří k velmi aktuálním tématům současného betonového stavitelství. Většinou se užívá rozptýlená výztuž ve tvaru vláken, která zachycují v cementové matici lokální tahové účinky, způsobené prostorovou napjatostí mezi zrny hrubého kameniva. V případě užití ocelových vláken (drátků) hovoříme o tzv. drátkobetonu [22].

V rámci diagnostiky drátkobetonových konstrukcí je řešena i tato rozptýlená výztuž, konkrétně v rozsahu správnosti provedení z hlediska předepsané koncentrace drátků, a rovněž je podstatné jejich správné rozmísení, postrádající nežádoucí shluky drátků či místně převládající jednosměrnou orientaci drátků [23].

Doposud platné normy znají pro stanovení koncentrace drátků v zatvrdlém železobetonu jediný postup, a sice odběr vzorků jádrovým vrtáním, a po jejich rozdrčení stanovení hmotnostní koncentrace separovaných drátků [24].

Jde však o metodu destruktivní, navíc s lokálním dosahem, pro statistické zhodnocení betonu v celé konstrukci by byl rozsah poškození konstrukce zásadní a nevhodný. To je příčinou, proč v současné době řada především univerzitních týmů řeší možnosti vývoje nových technologií, zejména na elektromagnetickém principu, které by byly schopny hodnotit na NDT principu statisticky významnou část zkoumaného drátkobetonu (standardní elektromagnetické technologie – indikátory výztuže, georadar a podobně zde nefungují) [25 - 28].

Právě při vývoji těchto technologií (ale současně i v oblasti testování mechanických vlastností drátkobetonů) se setkáváme s požadavkem na vytvoření zkušebních vzorků, u nichž je nezbytné před dalšími experimenty ověřit prostorové rozmístění a orientaci drátků či případné nehomogenity. K tomuto účelu se doposud ideálně osvědčila rentgenografie, díky zobrazovacím možnostem a vysoké jakosti radiogramů. Limitní je v tomto případě prozařovaná tloušťka, technickými rentgeny není reálné prozařovat drátkobeton o tloušťce vyšší než cca 150 mm. I při využití jiného zdroje záření by při vyšších tloušťkách nebyla rozeznatelnost drátků adekvátní potřebám [29].

V odůvodněných případech lze využít pro stanovení prostorové orientace drátků technologii počítačové tomografie (CT), nicméně její provádění je dle konkrétní aparatury omezeno rozměry vzorku, a standardní provádění je limitováno vyššími náklady.

#### 6 MOŽNOSTI TESTOVÁNÍ METOD NA MODELECH

U prakticky všech metod pro stanovení polohy výztuže, přesněji u všech používaných přístrojů, je jedním ze základních aspektů úspěšné práce zkušenost a určení a pochopení reálných možností a omezení jednotlivých technologií a konkrétních aparatur. Vzhledem k dynamickému vývoji měřících zařízení, změnám jejich funkcí a možností je třeba ideálně před zahájením měření v terénu mít přesnou představu nejen o základních parametrech, jako je například hloubkový dosah, ale i o detekovatelnosti, respektive rozlišitelnosti jednotlivých prutů v závislosti na kombinaci faktorů, jako je hloubka, průměr, vzdálenost sousedních prutů, jejich vzájemné krytí (více vrstev) a podobně.

Pomineme-li testování na konstrukcích in-situ, základním předpokladem může být ověření na předem připravených modelech. Zde v plném rozsahu platí staré přísloví „těžko na cvičišti, lehký na bojišti“. Zkušební modely je možno připravit v několika zásadních podobách.

## 6.1 MODEL Y VARIABILNĚ MĚNITELNÉ

Ideální se mohou zdát modely, jejichž konfiguraci můžeme během testování přístrojů operativně měnit. V případě diagnostiky vyztužení jde o prostorové (krabicové) modely, kde je možno operativně měnit pozice, geometrii, průměry a typy výztuží, v rámci testování hranic využitelnosti metod a přístrojů. Současně je třeba respektovat fyzikální principy jednotlivých metod.

Pro testování elektromagnetických indikátorů se jeví nejjednodušším způsobem uzavřený krabicový model, v němž můžeme libovolně měnit polohu výztuží, simulovat různé hloubky pod povrchem, různé vzdálenosti prutů, průměry a typy výztuží, geometrii jejich směru, co přináší nekonečné množství variant.

Pro testování georadarových sond lze využít podobné modely, jako v předchozí části. Je však nezbytné do modelu umístit náplň, která umožní podobně jako beton vedení impulsů radarového signálu a jejich návrat. Možnou alternativu v minulosti vytvořil a publikoval RNDr. Jakub Štainbruch, Ph.D. v rámci působení ve firmě Inset s.r.o. pod označením „Fyzikální model“. Tento model měl možnost testovat i Ústav stavebního zkušebnictví VUT v Brně. Model byl vytvořen v podobě krabicového modelu větších rozměrů (1160 × 1160 × 300 mm), do modelu bylo možné umístit různé varianty výztuží, i rozměrnějších objektů, jako chrániček předpínací výztuže, trubek a podobně. Následně byl model vyplněn extrémně jemným křemičitým pískem, který umožnil průchod radarových impulsů, nicméně zde bylo třeba testované zařízení dokalibrovávat v souvislosti s odlišnými vlastnostmi vodivého média oproti betonu. Pro počáteční testování účinnosti různých radarových aparatur, zejména s ohledem na zobrazitelnost výztuží ve vrstvách nad sebou, byl velmi účelný, nicméně manipulace s jemným křemičitým pískem (nutnost odsání při změně konfigurace modelu, propad netěsnostmi v modelu) tento typ modelu poněkud deklasoval. Přesto při zavádění technologie georadaru do oblasti diagnostiky konstrukcí – stanovení polohy výztuže přinesl model množství odpovědí na řadu otázek.



Obr. 13 Testování možnosti georadaru Hilti PS1000 X-scan na fyzikálním modelu: vlevo model před naplněním pískem, uprostřed připravený pro měření a vlevo jeden z 3D výstupů testovacího měření.

## 6.2 MODEL Y STABILNÍ (NEMĚNNÉ)

Pro možnost testování prakticky všech metod pro stanovení polohy výztuže jsou ideální modely vytvořené jako železobetonová konstrukce, nebo její vybraná část, se simulovanými situacemi a variabilní geometrií umístěné výztuže. Na druhé straně jejich nevýhodou je neměnnost parametrů, při potřebě změny je nutné vyrobit nový model. Rovněž použitý materiál a rozměry mohou představovat následné potíže z hlediska umístění a manipulace. Na základě zkušeností se tyto modely jeví ideální pro počáteční testování přístrojů a technologií, před příchodem možnosti je rozsáhleji testovat na skutečných konstrukcích, a neocenitelnou pomůckou jsou při výukových demonstracích jednotlivých metod a přístrojů.



Obr. 14 Různá podoba stabilních modelů, vlevo osmitunové masivní bloky obsahující měkkou i předpínací výztuž i nehomogenity v betonu, uprostřed jednoduché desky simulující spodní částí průvlaku v konkrétním železobetonovém monolitickém skeletu, vlevo model spodní části jedné z variant předpjatého nosníku KA-73.

### 6.3 SPECIÁLNÍ MODELY PRO RADIOGRAFII

Modely pro testování radiografie, případně pro sestavování expozičních nomogramů, jsou vcelku jednoduše realizovatelné. Základem je obvykle sada desek z obyčejného prostého betonu rozměrů např.  $500 \times 400 \times 50$  mm umožňující simulaci různých tloušťek prozařovaného betonu, doplněná o totožné desky s vloženou výztuží různých průměrů a typů. Při testování lze sestavením desek a geometrií umístění zdroje záření a záznamového média (paměťových folií) vytvořit konfigurace prakticky s libovolně nastavenými parametry, tedy tloušťka betonu, ohnisková vzdálenost, výztuž – průměr, typ a poloha.

## 7 TESTOVÁNÍ GEORADARU A KOMBINACE METOD IN SITU – OPTIMÁLNÍ POSTUPY STANOVENÍ VYZTUŽENÍ NA VYBRANÝCH TYPICKÝCH PRVCÍCH ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

### 7.1 SLOUPY

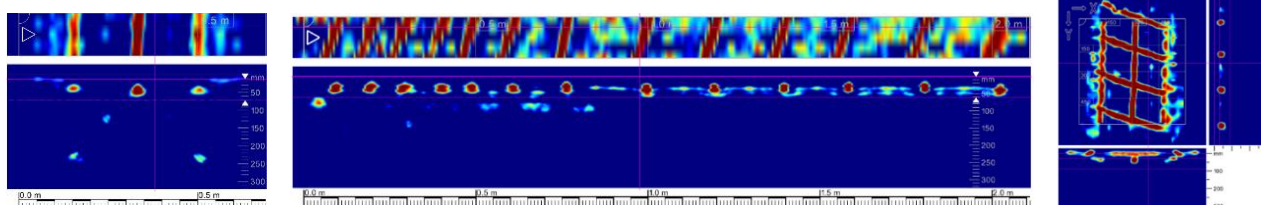
Stanovení vyztužení železobetonových sloupů patří k ve většině případů k jednodušším variantám. V praxi se v minulosti k danému účelu radiografie používala spíše výjimečně, v případech, kdy využití ostatních metod bylo zásadně kontraindikováno některou z níže uvedených příčin.

#### 7.1.1 Sloupy čtvercového a obdélníkového průřezu

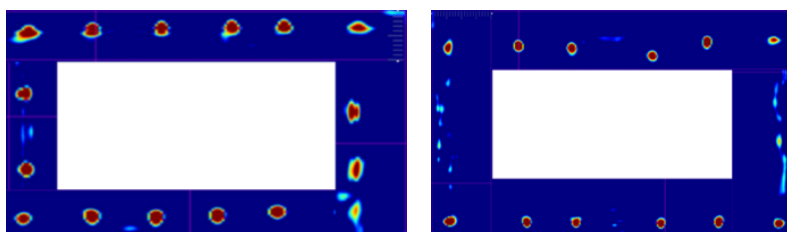
U čtyřhranných sloupů lze předpokládat polohu hlavní (svislé) nosné výztuže v rozích průřezu, a dále podél povrchu jednotlivých stěn (s patřičným krytím) dle statických požadavků na únosnost sloupu. V řadě případů je možné využití elektromagnetického indikátoru, pokud jsou hlavní výztuže alespoň v minimálních nezbytných rozestupech, pokud nejsou třmínky rozmístěny příliš nahusto, a není-li měření touto technologií komplikováno přítomností dalších prvků, které magnetický indikátor registruje, například rohové ochranné lišty z hliníku či oceli. Stejně tak může situaci komplikovat přítomnost výztuží ve větší hloubce (výztuže vytažené ze sloupu v nižším podlaží), nebo přímo extrémně velké krytí (v důsledku chybné velikosti, či excentrického umístění armokoše). Z této premisy je zjevné, že užití elektromagnetických indikátorů je sice možné a v řadě případů účelné (možnost stanovení průměru výztuže), ale při jakékoli komplikaci se jeví vhodnější metoda georadaru, která má vyšší hloubkový dosah a nemá zásadní problémy s výztuží ve více hloubkových úrovních. I v případě vhodných podmínek pro užití elektromagnetických indikátorů je přínosné použít radar k ověření (okamžitě vizualizaci) situace vyztužení a potvrzení vhodnosti využití elektromagnetického indikátoru.

### Doporučený postup při měření vyztužení sloupu radarem:

- Provedení horizontálních liniových skenů ve vhodné výšce na všech čtyřech stěnách sloupu pro detekování hlavní nosné výztuže.
- Provedení vertikálního liniového skenu od paty sloupu do potřebné výšky pro stanovení roztečí třmíneků.
- Provedení plošných skenů na dvou sousedních stěnách sloupu pro stanovení případných anomálií v průběhu třmíneků apod. (pokud nedostačuje šířka boční stěny na umístění standardního rastru pro plošný sken, je možné ji nahradit rastrem připevněným na tenké plastové desce, a tím umožnit provedení skenu ve standardním požadovaném formátu).



Obr. 15 Vlevo horizontálních sken zachycující trohici hlavních výztuží na boku sloupu, uprostřed vertikální liniový sken od paty sloupu vzhůru, zachycující třmínky, vpravo plošný radarový sken formátu 600 x 600 mm pořízený na bočním lici sloupu může odhalit například sklon třmíneků vzniklý patrně deformací armokoše při umístění do bedněni.

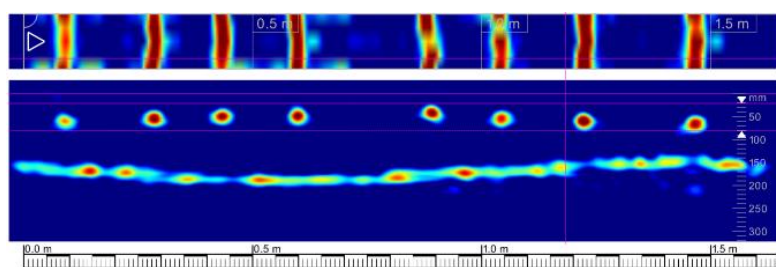


Obr. 16 Složením horizontálních liniových skenů stěn můžeme získat průřez sloupem, s dobře patrnými deformacemi či excentricitami armokoše [44 - 46].

### 7.1.2 Sloupy kruhového průřezu

U sloupů kruhového průřezu je možné postupovat obdobně, jako v případě sloupů čtyřhranných. Hlavním rozdílem je to, že místo 4 liniových skenů pro stanovení polohy hlavní nosné výztuže je možné provést jeden liniový sken po obvodu sloupu, záznam pak bude de facto rozvinutým pláštěm válce. Z hlediska výběru metody platí prakticky totéž, jako v předchozí části, věnované sloupům čtyřhranného průřezu. Je vhodné provést radarové měření jako základ, pro zjištění případných neočekávaných anomálií v rozložení výztuže, a elektromagnetický indikátor a sekanou sondu použít pro zjištění chybějících parametrů, či zpřesnění. Použití radaru je zde mimo jiné rovněž indikováno rizikem vyššího krytí, či větší hustoty výztuží, než by umožnilo relevantní elektromagnetické měření.

Přidanou hodnotou měření sloupů technologií radaru je případný záznam dalších nehomogenit v tělese sloupu. Typickým případem může být v kruhových sloupech umístění svodů srážkové vody, což bylo typické např. pro tzv. Baťovy skelety továrních objektů. Právě kovový svod uvnitř sloupu (respektive stěna svodu) může být na radarogramu velmi dobře identifikován, viz Obr. 17.



Obr. 17 Budova 33 areálu Fatra Napajedla ze 30. let 20. století (nahore) a radarový sken provedený po obvodu sloupu, obsahujícího svod srážkové vody. Sken zobrazuje 8 výztuží a pod nimi linii pláště svodu. I svod je umístěný ve sloupu excentricky, proto linie v „řezové“ části radarogramu, která zobrazuje průběh pláště svodu pod povrchem sloupu, má tvar „sinusoidy“ [50].

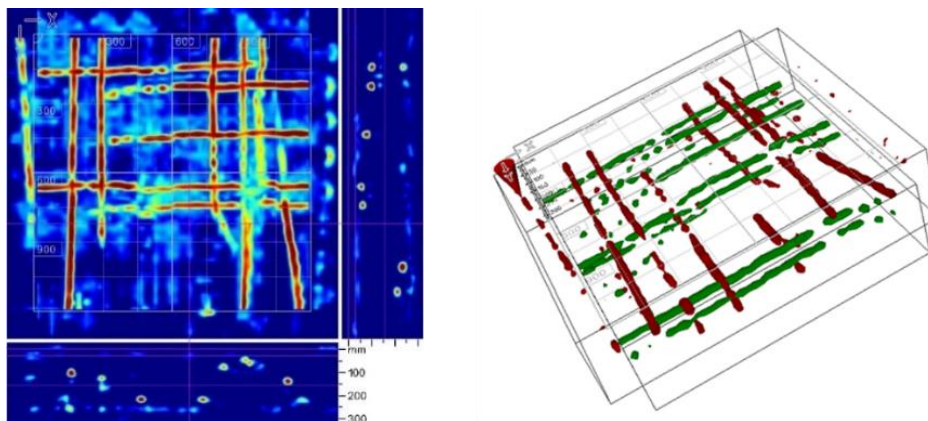
## 7.2 DESKY

V případě železobetonových, jednostranně či oboustranně armovaných desek, lze v podstatě využít všechny v minulosti či současnosti užívané NDT metody pro stanovení vyztužení. Mimo klasické desky sem můžeme počítat i různé typy železobetonových stěn, ostění tunelů, ale i prefabrikované dílce s převládajícím plošným rozměrem, jako jsou stropní panely, ale i stěny střešních vazníků a podobně. Radiografie byla v minulosti využívána v závislosti na celkové tloušťce, možnosti přístupu z jedné, či obou stran.

Stejně jako u sloupů se osvědčila metoda georadaru, jakožto vytvoření základních vizualizovaných podkladů, následně doplněná metodou elektromagnetických indikátorů, pokud výstupy z radaru ukáží její použitelnost a vhodnost, s uvážením všech omezujících podmínek. Na základě zkušeností se ukazuje, že právě v případě deskových prvků je kombinace onou těchto NDT metod velmi žádoucí, a výsledky se vhodně doplňují. V případě radaru dominuje plošná vizualizace, hloubkový dosah a možnost detekce více vrstev vyztužení, v případě elektromagnetických indikátorů pak přesnost určení krytí a možnost stanovení průměru výztuží. Pro stanovení typu je pak nezbytné provedení cílené sekané sondy. Využití radaru u železobetonových desek má ještě jeden pozitivní aspekt, pokud je dosah zařízení větší, než je tloušťka desky, je možné ve většině případů zobrazit zadní stranu desky, a tím s jistou přesností stanovit její tloušťku.

Doporučený postup při měření vyztužení desek radarem:

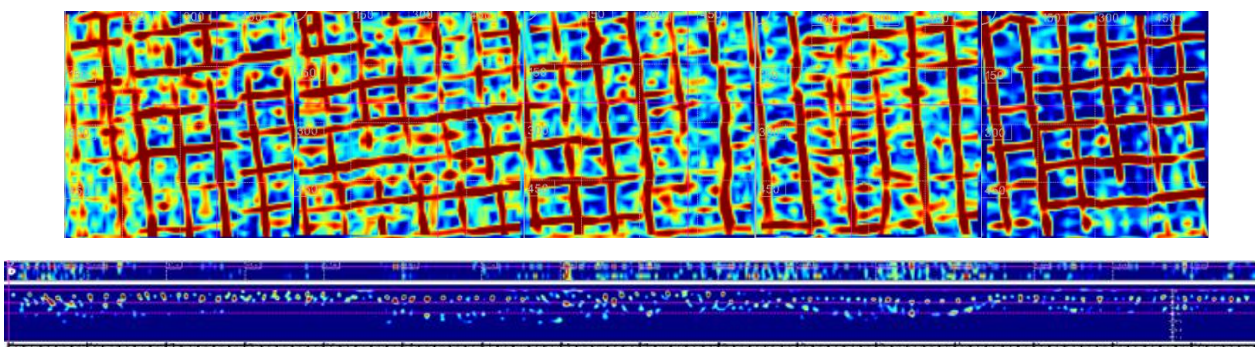
- Preference provedení plošných skenů k analýze celkového vyztužení v ploše, a možnosti analyzování 2D i 3D provedení skenů.
- Následně v potřebných místech provedení liniových skenů, například pro rozsáhlejší posouzení dodržení krytí výztuže a podobně (liniové skeny se provádí ideálně kolmo na předpokládaný směr průběhu výztuží, které chceme detekovat).
- Indikace vhodnosti cíleného využití elektromagnetického indikátoru pro případné zpřesnění měření a určení průměrů, i pro rozsáhlejší posouzení dodržení krytí výztuže a podobně (liniové skeny se provádí ideálně kolmo na předpokládaný směr průběhu výztuží, které chceme detekovat).



Obr. 18 Jako příklad poslouží radarový sken  $1200 \times 1200$  mm (nahore) pořízený z horní strany železobetonové desky nákupního centra na Vídeňské ulici v Brně. Vpravo 3D verze skenu [35].

Při měření rozsáhlých železobetonových plošných konstrukcí je výhodné pokrýt plochu buď liniovými skeny, které na sebe navazují (dle předpokládané polohy a dalších parametrů vyztužení lze alternativně použít jak georadar, tak elektromagnetický indikátor), nebo provést sérii plošných skenů, které na sebe navazují (skeny je možné složit).

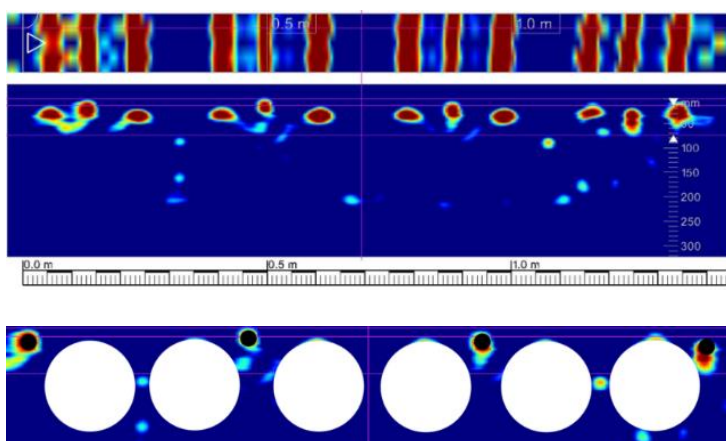




Obr. 19 Stavebně technický průzkum stěn výběhu medvědů v ZOO Brno (tzv. Kamčatská chalupa) - příklad složení plošných skenů formátu 600 × 600 mm a liniového skenu v délce 8 m, zachycující vyztužení svařovanými sítěmi, místy se překrývajícími.

### 7.2.1 Dutinové panely – speciální případ

Jak bylo řečeno výše, mezi „desky“, tedy železobetonové prvky s převládajícím plošným rozměrem, můžeme počítat i různé typy stropních panelů. Stanovení jejich vyztužení se nijak zásadně neodlišuje diagnostiky ostatních „deskových“ prvků. Poněkud odlišnou kategorií tvoří různé typy dutinových panelů. Zde musíme počítat s tím, že obě v současnosti užívané NDT metody pro výztuž, tedy elektromagnetický indikátor i georadar, zobrazí ocelovou výztuž, ale georadar navíc zareaguje na dutiny v panelu. Zde je potřeba jisté obezřetnosti, protože u radarů určených převážně pro diagnostiku výztuže má vyhodnocovací software tendenci „ze všech vrcholů odrazových hyperbol udělat výztuž“.



Obr. 20 Výškový objekt Šumavská Brno, záznam liniového skenu přístrojem PS1000 napříč stropním panelem od spodního líce. Dobře jsou patrné jednotlivé ocelové výztuže a vrcholy dutin v panelu, ne okrajích skenu jsou ještě zachyceny krajní výztuže sousedních panelů (nahore). Dole tentýž sken oříznutý na rozměr stropního panelu, se zvýrazněnými výztužemi (černá) a dutinami (bílá).

### 7.3 TRÁMY

Stanovení vyztužení železobetonových trámů (průvlaků, trámů, žeber), patří ke komplikovanějším případům. Rozsah stanovení vyztužení je diktován účelem stavebně technického průzkumu. Pokud tento slouží jako podklad pro statický přepočít únosnosti, minimální rozsah stanovení vyztužení trámu je následující:

- Hlavní nosná výztuž ve středu rozpětí u spodního líce prvku.
- Hlavní nosná výztuž u horního líce nad podporou (respektive v praxi spíše u „podpory“) – pokud není přístupný horní povrch trámu u podpory, lze do jisté míry nahradit stanovením vyztužení u podpory u spodního líce a zjištěním smykových ohybů hlavních výztuží, ale s výhradou.
- Poloha a množství smykových ohybů hlavních výztuží.
- Třmínky – rozteče a tvar, ideálně po celé délce prvku (rozdíly ve středu rozpětí a u podpory).

Právě diagnostika hlavní nosné výztuže je problematická v případech, kdy jsou výztuže umístěny v několika vrstvách (nebo obecně prostorově komplikovaně), vzdálenosti sousedních

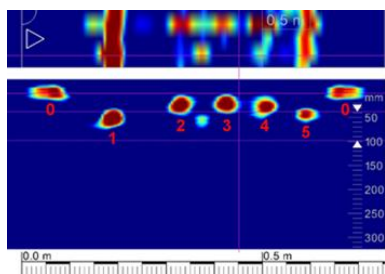
výztuží jsou minimální, výztuž je „utopená“ hluboko pod povrchem a podobně. Tyto nepříznivé případy v minulosti byly řešeny pomocí radiografie s užitím izotopu Co60.

V tomto směru dokáže kombinace ostatních metod radiografii nahradit ve většině případů, byť za cenu zvýšené nutnosti provedení rozsáhlejších sekaných sond tam, kde nedestruktivní metody selhávají díky omezením, daným jejich fyzikálními principy.

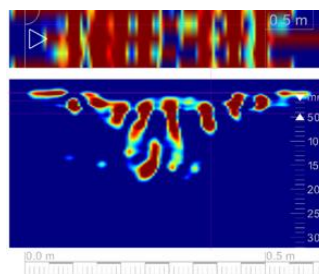
### 7.3.1 Hlavní nosná výztuž u spodního líce prvku (postup platí v modifikované podobě i pro výztuž u horního líce nad podporou)

Provedení liniových skenů napříč trámem ze spodního líce pro určení polohy hlavních výztuží – dle prostorových dispozic předpokládané polohy výztuže (krytí, počet vrstev) volíme metodu georadaru či elektromagnetického indikátoru. Optimální je kombinace obou metod a vzájemné zpřesnění výstupů. Pro měření elektromagnetickým indikátorem je vhodné předchozí určení polohy trmínek, aby měření probíhalo mezi nimi (u georadaru tato premisa neplatí). V případě předpokladu více vrstev výztuže následně realizovat svislé skeny na obou bocích trámu, vždy od spodního líce vzhůru. Georadar by měl mít takový dosah, aby při bočních skenech pokryl celou šířku trámu (tedy z každé strany by měl mít dosah přes polovinu šířky). Ve finále je nezbytné chybějící parametry stanovit sekanou sondou, či cílenými přiklepovými návrty.

V případě komplikovaného vyztužení více vrstvami nemusí být využití kombinace zmíněných NDT metod stoprocentní. Například i jinak spolehlivý georadar může mít problém s výztužemi přímo nad sebou, komplikaci tvoří v okrajové části trámu i odraz radarového signálu od bočních stěn (při měření na spodním líci – nutno počítat s tím, že na radarogramu může vzniknout v místě kraje trámu falešný odraz, který software vyhodnotí jako další výztuž u povrchu – viz Obr. 21. Rozšíření výsledků může přinést využití plošných radarových skenů na spodní, i na bočních stranách trámu, a následně studium 2D či 3D variant výstupů. Jak již bylo řečeno, více vrstev výztuže je problematické, zejména když jsou pruty umístěny přímo nad sebou, zde i technologie georadaru v řadě přístavu selhává, a polohu výztuží v horních vrstvách je možné zjistit pouze kombinací bočních skenů, a cílených přiklepových návrů mezi pruty výztuže ve spodní vrstvě.



Obr. 21 Výsledky měření hlavní výztuže přístrojem HILTI PS 1000 uprostřed rozpětí průvlaku S1-1. U spodního líce je registrováno v souladu s výkresovou dokumentací 5 prutů výztuže (značeno 1 až 5), projev odrazu radarových vln na okraji prvku je označen 0. Typ a průměr výztuží byl ověřen cílenou sekanou sondou.



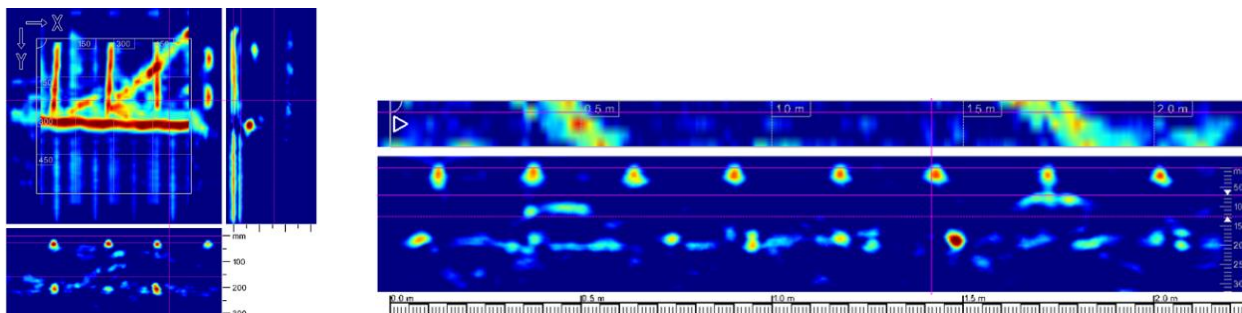
Obr. 22 Liniový radarový sken napříč průvlakem v objektu Paláce Jalta v Brně ze spodního líce, jasně patrných 8 výztuží u spodního líce, bohužel technologie radaru při tak hustém vyztužení neumožňuje zobrazení výztuží ve 2. řadě – jsou sice z části na skenu zobrazeny, ale díky malým roztečím a vzájemným zakrytím je sken téměř nevyhodnotitelný.

### 7.3.2 Smykové ohyby hlavních výztuží

Do příchodu technologie georadaru do odvětví diagnostiky konstrukcí bylo stanovení polohy smykových ohybů výztuže velmi komplikované. Většinou probíhalo formou stanovení rozdílu v počtu výztuží uprostřed rozpětí a u podpory při spodním líci, a to ideálně radiograficky izotopem Co60. Přesná poloha ohybů se mohla stanovit díky měření ve více místech staničení trámu. V extrémně důležitých případech bylo možné provést radiograficky boční prozáření, za cenu vysoké časové náročnosti (doba expozice daná ohniskovou vzdáleností a tloušťkou betonu).

S příchodem georadaru se situace radikálně změnila. V závislosti na vhodnosti podmínek (přístupnosti a rozměrech trámu) je možné detekovat smykové ohyby dvojím způsobem.

Prvním způsobem může být provedení řady plošných skenů na bočním líci trámu. Zásadou je mít možnost zmapovat celý vnitřní prostor trámu, tedy hloubkový dosah radaru musí odpovídat alespoň polovině šířky trámu (při skenování z obou bočních líců je pokryt celý vnitřní prostor). Druhou, výrazně jednodušší a rychlejší metodou lokalizace ohybů hlavních výztuží je provedení horizontálního liniového skenu po bočním líci trámu. Zde se ukazuje obrovská výhoda radaru Hilti PS1000 X-SCAN, která spočívá v osazení trojicí antén, což umožňuje i při provádění liniového skenu (de facto sonda provádí 3 liniové skeny současně) určit i pohledové části skenu sklon výztuží. Proto provedení horizontálních skenů z obou stran trámu umožní lokalizaci všech ohybů (jsou-li v hloubkovém dosahu sondy).



Obr. 23 Vlevo plošný radarový sken z boku žebra s dobře patrným ohybem hlavní výztuže, vpravo liniový radarový sken podél bočního líce žebra zobrazuje dvojici ohybů hlavní výztuže.

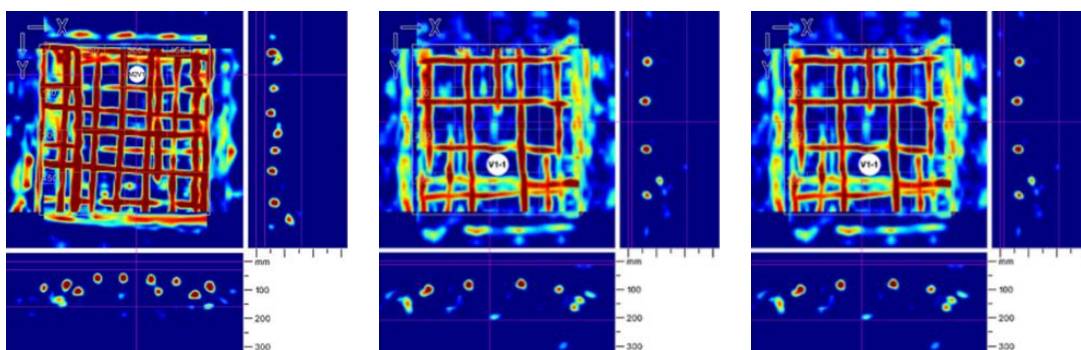
### 7.3.3 Třmínky

Relativně jednodušším úkolem v rámci stanovení vyztužení trámu je určení polohy třmínků. Vzhledem k tomu, že se nachází při povrchu prvku, je pro zjištění jejich roztečí a tvaru standardně používán elektromagnetický indikátor, nověji nahraditelný radarem. Tato náhrada však není nezbytná, jediné, čím může radar nově přispět, je při provedení plošného skenu ze spodní části trámu stanovení provedení třmínků, tedy například jsou-li dvoustřížné či čtyřstřížné, toto ale může radar určit i při bočním liniovém skenu. Standardně je poloha třmínků určována liniovými skeny rovnoběžně s osou nosníku, u podpory a ve středu rozpětí, nebo ideálně po celé délce prvku, a to buď na spodním líci, nebo pro vyloučení rušivého vlivu hlavních výztuží na bočním líci trámu. Výhodou měření elektromagnetickým indikátorem je případná možnost určení průměru prutů.

### 7.3.4 Jádrové vývrty do trámů

S vyztužením trámů souvisí ještě jeden aspekt, kdy využití georadaru výrazně přispělo ke zjednodušení provádění diagnostiky železobetonových objektů.

Již bylo řečeno, že georadar je optimálním zařízením pro výběr míst provádění jádrových vývrťů (ať již pro stanovení pevnosti betonu, nebo pro technologické průvrty), kdy je užitím radaru s dosahem odpovídajícím předpokládané hloubce vývrťu (nebo alespoň oblasti s předpokládaným výskytem vyztužení) zajištěno, že nedojde při vrtání ke kolizi, nebo dokonce převrtání výztuže. V případě železobetonových trámů (průvlaků, žeber) bylo obvyklé odebírat vývrty ve staticky příhodném místě vrtem do boku trámu, což s sebou neslo v řadě případů komplikace související s využitím výškové techniky (např. v průmyslových objektech s velkou výškou podlaží), či komplikace spojené s rizikem prašnosti a vlhkosti v užívaných interiérech. Provádění vývrťů shora do trámů přes skladbu podlahy nebylo možné z důvodu hustého vyztužení, a téměř 100% jistoty kolize s výztuží. Technologie georadaru umožňuje i v hustém vyztužení nad trámem (horní výztuž trámu, výztuž desky, horní části třmínků) najít vhodný prostor, a vhodně zvolit průměr vrtání, aby nebyla výztuž poškozena.



Obr. 24 Příklady radarových skenů stropní konstrukce pro upřesnění polohy a možného průměru jádrového vývrtu betonu průvlaku pro stanovení pevnosti betonu v tlaku. [36 - 38].

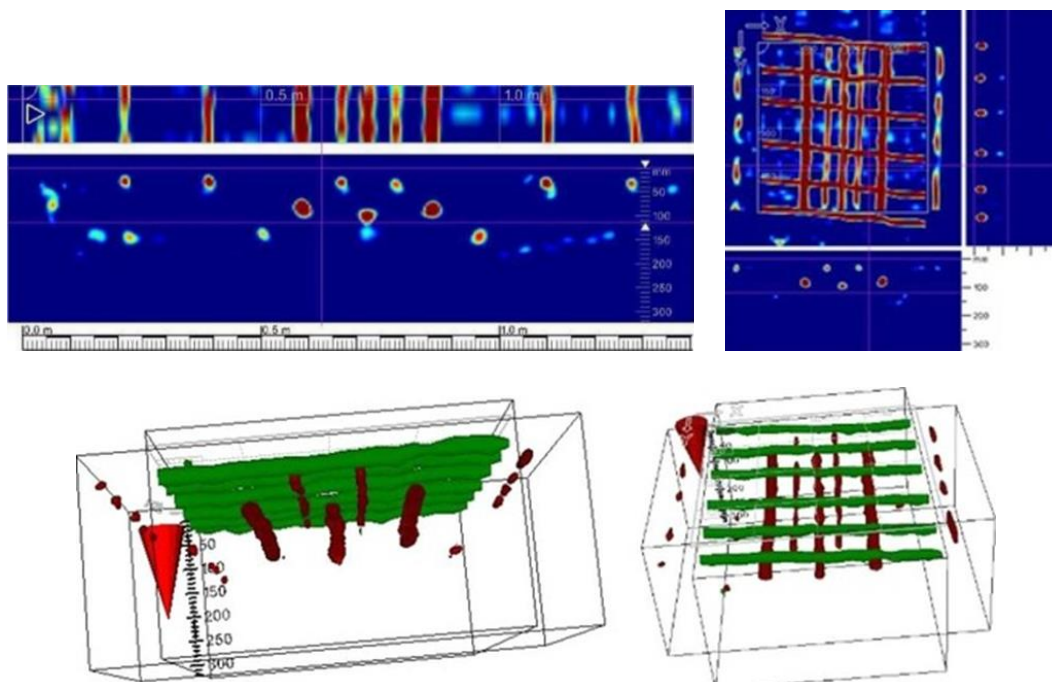
#### 7.4 PŘEDPJATÉ MOSTNÍ NOSNÍKY – LOKALIZACE PŘEDPÍNAČÍ VÝZTUŽE

Na příkladech řádově stovek předpjatých mostních nosníků řady KA, I a DS-A bylo testováno využití různých metod k lokalizaci výztuže. Bylo zjištěno, že technologie radaru je optimálním řešením pro stanovení polohy předpjaté (i betonářské) výztuže, ale zásadním omezením je tvar a přístupnost prvků, kdy část výztuže, nebo část jejího průběhu je geometricky mimo možnost dosahu jakýchkoli měřících přístrojů. To se týká i následných sond k výztuži.

Pro stanovení polohy kabelů v typových řadách nosníků KA a I byl v rámci diagnostiky zvolen následující postup skenování ze spodního líce nosníků:

- Liniový sken napříč nosníkem pro stanovení polohy předpínací výztuže i případné podélné konstrukční výztuže.
- Liniový sken v ose nosníku v délce alespoň 1 m pro stanovení polohy a roztečí třmíneků.
- Plošný sken formátu 600 × 600 mm ve středu šířky nosníku pro potvrzení výsledků liniových skenů (3D analýza, vysvětlení případných nejasností).

Tento postup se osvědčil, pro následné vyhodnocení průběhu předpínací výztuže je nezbytné zaznamenávat vzdálenost místa měření od konce nosníku. V případě komorových typů nosníků se postup modifikuje pro užití na konkrétní stěně nosníku.



Obr. 25 Vlevo liniový radarový sken ze spodního líce, zachycující spodní trojici předpínacích kabelů a všechnu podélnou měkkou výztuž v prvku, vpravo ověřovací plošný sken 600 × 600 mm v témže místě. Dole tentýž plošný radarový sken formátu 600 × 600 mm pro názornost v provedení 3D v různém naklonění. Veškerá výztuž je jasně patrná [39].

## **8 PŘÍPADOVÉ STUDIE VYUŽITÍ RADARU V KOMBINACI S OSTATNÍMI METODAMI NA ROZSÁHLEJŠÍCH KONSTRUKCÍCH – POROVNÁNÍ S MOŽNOSTÍ VYUŽITÍ RADIOGRAFIE**

V habilitační práci je uvedena řada případových studií s typickými příklady praktického provádění diagnostiky polohy výztuže s rozбором možné kombinace jednotlivých metod, a rozvahou ohledně využitelnosti radiografie. V této zkrácené verzi je z důvodu omezeného rozsahu uveden jen zlomek z nich, a i ty jsou zásadně kráceny.

### **8.1 PŘÍPADOVÁ STUDIE 1 – SROVNÁNÍ MOŽNOSTÍ STANOVENÍ MNOŽSTVÍ A PRŮBĚHU HLAVNÍ NOSNÉ VÝZTUŽE V KONSTRUKCI ŽELEZOBETONOVÉHO TRÁMOVÉHO MOSTU**

Cílem této studie se stal silniční most ev.č. 57-016 přes místní vodoteč u obce Holasovice u Opavy. Nosná konstrukce mostu je železobetonová trámová, tvořená pěti trámy o šířce 400 mm a výšce bez desky 1260 mm, spojených čtyřmi příčníky o šířce 250 mm a výšce 1040 mm. Trámy a příčníky jsou monoliticky spojeny s deskou [40].

Původ konstrukce je třeba hledat v 50. letech, kdy podle všeho nahradila mostní provizorium na místě mostu poškozeného v průběhu bojů v závěru druhé světové války.

Typickým rysem konstrukcí z dané doby je fakt, že se nedochovala původní dokumentace, a únosnost konstrukce byla běžně odhadována na základě doby vzniku a třídy komunikace, na níž se v době vzniku most nacházel. Na sklonku 80. let 20. století bylo rozhodnuto o stavebně technickém průzkumu, jehož výsledky umožní přesné určení aktuální únosnosti mostu v návaznosti na jeho technický stav a plánovanou rekonstrukci komunikace. Je zajímavé, že do doby skutečného zahájení rekonstrukce objektu (2015) byly provedeny celkem 3 stavebně technické průzkumy, na nichž lze velmi ilustrativně doložit možnosti i úskalí vybraných diagnostických metod pro stanovení vyztužení konstrukce. Tato studie je nadále detailně zaměřena na stanovení vyztužení hlavních nosných trámů.

#### **8.1.1 Stavebně technické průzkumy v minulosti**

První stavebně technický průzkum byl proveden pracovníky Technického a zkušebního ústavu v Brně v roce mezi lety 1988 až 1991. Průzkum byl proveden v běžném rozsahu, zahrnoval předběžnou prohlídku s výčtem a charakteristikou zjištěných poruch konstrukce, a dále vlastní diagnostiku konstrukce. Hlavní nosné trámy byly z hlediska vyztužení zkoumány v následujícím rozsahu:

Vnitřní trám – stanovena poloha hlavních nosných výztuží uprostřed rozpětí u spodního líce trámu, dále totéž v blízkosti opěry, následně byl proveden pokus o zjištění polohy smykových ohybů výztuží, a zjištěna průměrná rozteč třmínek. Krajní trám – poloha výztuže stanovena pouze uprostřed rozpětí.

Ke splnění požadavků na stanovení vyztužení byla využita radiografická metoda s užitím gamazářiče Co60 pro stanovení množství a polohy hlavních výztuží u spodního líce trámů.

Elektromagnetický indikátor 2. generace Profometer 2 – zjištění polohy třmínek a stanovení polohy smykových ohybů krajních hlavních výztuží. Sekané sondy – pravděpodobně doplnily údaje o průměrech výztuží. V původní zprávě bylo konstatováno, že vnitřní i krajní trám jsou vyztuženy stejně, tj. 10 pruty hlavní výztuže R45 ve dvou vrstvách, přičemž dva pruty se ohýbají nahoru ve vzdálenosti 1,07 m respektive 1,17 m od ložiska. Dále byla stanovena rozteč třmínek (Ø 8 mm) a fakt, že jsou čtyřstránné.

Při statickém přepočtu únosnosti konstrukce byla vyslovena pochybnost o skutečném počtu a průběhu výztuží v trámech mostu, nicméně vzhledem k odkladu rekonstrukce nebyla situace řešena. Příčinou pochybení byla patrně nevhodně zvolená malá ohnisková vzdálenost při volbě

parametrů radiografie, kdy nebylo počítáno s případnou třetí vrstvou výztuží, třetí vrstva výztuží byla na radiogramech již zobrazena v takové šířce zobrazení, že nebyla reálně detekovatelná. Navíc zobrazení výztuží typu Roxor (10 512) je při vyhodnocování radiogramů komplikovanější, než u výztuží kruhového průřezu.

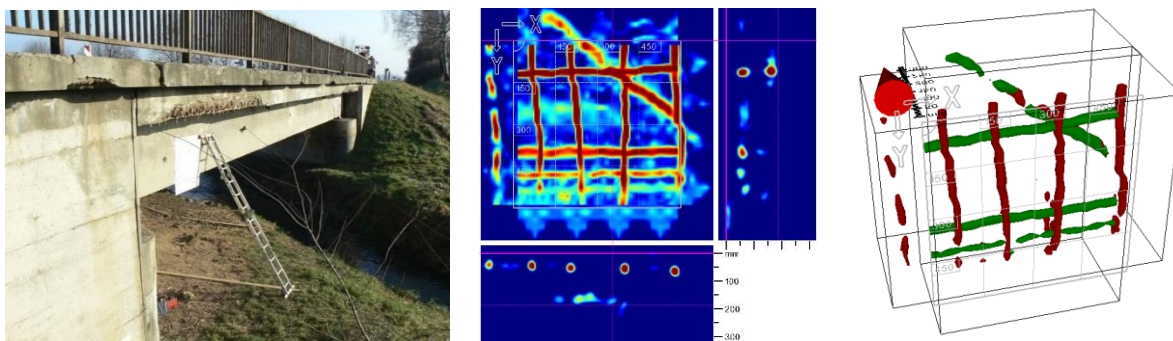
Druhý stavebně technický průzkum byl proveden pracovníky Fakulty stavební VUT v Brně v roce 2011. Jeho rozsah měl mimo jiné vyjasnit pochybnosti o vyztužení trámů. Vyztužení bylo na základě požadavku objednatele ověřeno pouze na krajním trámu – poloha výztuže stanovena pouze uprostřed rozpětí. Ke splnění požadavků na stanovení vyztužení byly využity následující metody a zařízení - radiografická metoda s užitím gamazářiče Co60 pro stanovení množství a polohy hlavních výztuží u spodního líce trámů a elektromagnetický indikátor 4. generace Profometer 4 .

Rozmístění výztuže v krajním trámu bylo určováno radiograficky. Pro stanovení polohy výztuží v daném místě bylo nutné provést celkem 4 expozice, postupně ze čtyř ohnisek, každá expozice trvala na místě cca 15 minut. V krajním trámu uprostřed rozpětí bylo nově zjištěno celkem 15 prutů hlavní výztuže R45 ve třech vrstvách, množství a poloha smykových ohybů nebyly řešeny.

Polohy a počet ohybů hlavních výztuží nebyly určovány, k danému datu byla jedinou použitelnou metodou k danému účelu radiografie, provedená vodorovným (bočním) prozařováním trámů kdy zářič by byl umístěn ve volném prostoru na jednom bočním líci trámu, a radiografické filmy na protilehlém bočním líci trámu. Při vhodně zvolené ohniskové vzdálenosti by bylo možné sice prozařovat současně na více filmů (2 – 3), nicméně tloušťka betonu 600 mm (šířka trámu) v kombinaci s vyšší ohniskovou vzdáleností by vyžadovala expozici řádově v jednotkách hodin, což bylo v kontextu bezpečnostních opatření a časové náročnosti vyloučeno.

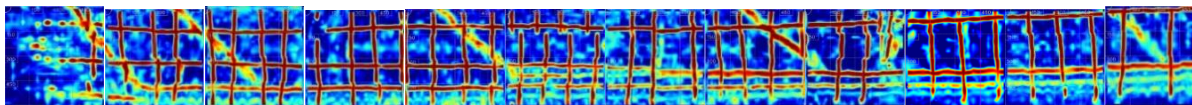
### 8.1.2 Stavebně technický průzkum s využitím radaru

Třetí stavebně technický průzkum byl proveden pracovníky Ústavu stavebního zkušebnictví Fakulty stavební VUT v Brně v roce 2014. Jeho cílem bylo nově dostupnou technologií georadaru doplnit chybějící údaje k vyztužení hlavních nosných trámů konstrukce, tedy rozsah a polohu smykových ohybů hlavní výztuže. Ke splnění požadavků na stanovení polohy ohybů hlavní výztuže byl využit Georadar Hilti PS1000 X-SCAN na jednom krajním a jednom vnitřním trámu. Na obou zkoumaných trámech mostu byly provedeny série plošných radarových skenů 600 × 600 mm z obou stran trámu vždy od okraje trámu na Holasovické straně. Vzhledem k šířce trámu 400 mm a hloubkovému dosahu zařízení 300 mm bylo zaručeno, že skenované oblasti se uvnitř trámu překrývají, a byla tedy záruka zobrazení všech ohybů smykové výztuže. Prováděné radarové skeny na sebe svými bočními okraji navazovaly. Spodní okraj skenovaných polí mírně přesahoval spodní okraj trámů. Celkem bylo provedeno na každém bočním líci trámu až 12 plošných skenů formátu 600 × 600 mm (z vnitřní strany v místech příčníků byly skeny adekvátně posunuty).

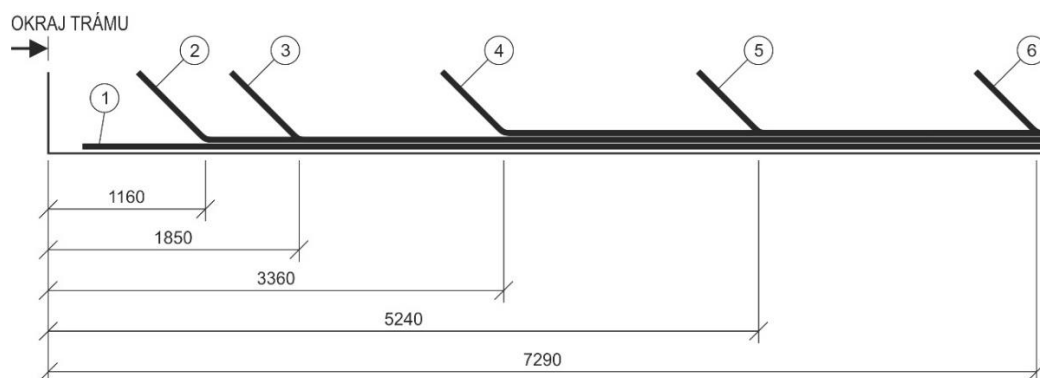


Obr. 26 Příklad provádění a vyhodnocení jednoho z radarových skenů, vlevo rastr připevněný na konstrukci pro provedení plošného skenu, uprostřed sken jasně zobrazenou polohou hlavních nosných výztuží (zde s ohybem jedné z nich), třmínků i vodorovné konstrukční výztuže, vpravo pro názornost tentýž sken v plnohodnotném 3D zobrazení s možností libovolné prostorové rotace.

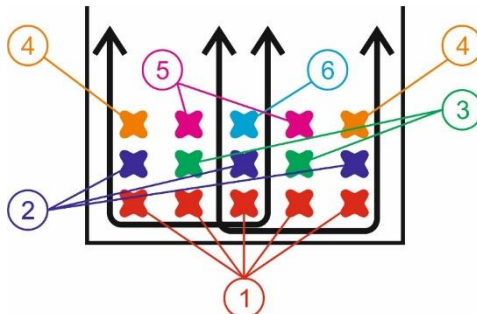
Bylo detekováno celkem 10 ohybů hlavních výztuží, de facto tedy kompletně obě horní řady. Ohyby byly sdruženy na celkem 5 jasně definovaných pozicích.



Obr. 27 Příklad výsledku složení radarových skenů na vnějším líci krajního trámu mostu, skenovaná oblast začíná 290 mm od kraje trámu. Jednoznačně je patrná jak poloha třmínek, tak ohybů smykové výztuže i vodorovné konstrukční výztuže, počty ohybů smykové výztuže v každé pozici byly následně stanoveny kombinací skenů z obou líců trámu.



Obr. 28 Schematický výkres polohy ohybů smykové výztuže v krajním trámu mostu na návodní straně z Holasovické (Krnovské) strany. Výztužím jsou přiřazena čísla odpovídající označení v řezu trámem uprostřed rozpětí v Obr. 102. 1 – pět výztuží spodní řady jdoucí přímo do podpory. 2 – trojice výztuží ohýbajících se ze střední řady (obě krajní a střední). 3 – dvojice výztuží ohýbajících se ze střední řady (druhá a čtvrtá). 4 – dvojice výztuží ohýbajících se z horní řady (obě krajní). 5 – dvojice výztuží ohýbajících se z horní řady (druhá a čtvrtá). 6 – jedna výztuž ohýbající se z horní řady (střední).



Obr. 29 Schematický řez trámem uprostřed rozpětí, jednotlivým výztužím jsou přiřazena čísla, korespondující s označením jednotlivých ohybů.

### 8.1.3 Vyhodnocení

Tento příklad dobře ukazuje možnosti, omezení i rizika jednotlivých diagnostických metod pro stanovení polohy výztuže, především radiografie a georadaru. Radiografie s užitím gamazářiče Co60 je sice pro stanovení polohy hlavní výztuže v průřezích železobetonových trámů ideální, ale i její provedení má značná rizika ve smyslu neodhalení veškeré výztuže v komplikovaně vyztužených prvcích, kde se výztuž nachází ve více vrstvách. Na druhé straně jsou zásadním omezením bezpečnostní opatření, i nárůst doby expozice v souvislosti s prozařovanou tloušťkou betonu a vyšší ohniskovou vzdáleností. To jsou faktory, které i v minulosti radiografii znemožňovaly v kontextu praktických, časových i finančních možností při realizaci stavebně technických průzkumů. Lze tedy předpokládat, že kdyby byla v současnosti radiografická metoda s využitím izotopu Co60 k dispozici, byla by z bezpečnostních a ekonomických důvodů využita nejvýše pro stanovení celkového počtu a rozložení výztuží ve vybraném průřezu trámu.

Metoda georadaru zde naopak zcela prokázala své rozsáhlé možnosti, a vysokou hodnotu danou rychlým prováděním a okamžitou vizualizací výsledků měření. Pro stanovení polohy ohybů hlavních výztuží se jeví metoda georadaru optimální, bez nutnosti využití dalších doplňkových metod. Na druhé straně pro určení základní polohy všech hlavních výztuží uprostřed rozpětí v průřezu nosníku by bylo nezbytné provést radarový sken ze spodního líce trámy, i z obou líců bočních, s rizikem, že vnitřní výztuže ve 2. a 3. vrstvě nebudou zobrazeny. Nicméně po kombinaci se skeny zachycujícími ohyby hlavních výztuží, by bylo možné celkový obraz vyztužení (tedy i počtu výztuží ve středu rozpětí u spodního líce) spolehlivě stanovit.

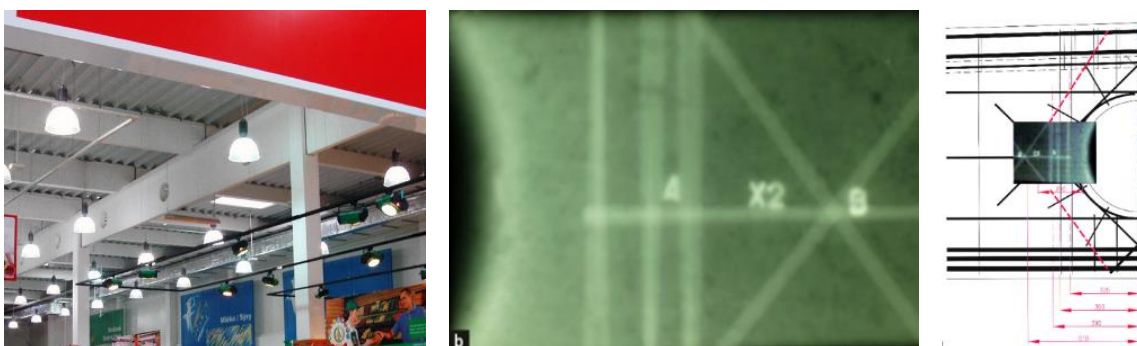
## 8.2 PŘÍPADOVÁ STUDIE 2 – VAZNÍKY MONTOVANÉHO SKELETU – POTVRZENÍ SPRÁVNÉHO VYZTUŽENÍ

Tato případová studie má za cíl přímé porovnání dvou velmi obdobných případů. Předmětnou konstrukcí byly železobetonové prefabrikované vazníky v halových objektech, u nichž se v krátké době po uvedení konstrukce do provozu vyskytly poruchy v podobě trhlin. Úkolem diagnostiky bylo stanovení příčin těchto poruch. Z tohoto důvodu bylo prioritně ověřeno vyztužení prvků a provedeno srovnání s prováděcí dokumentací. Zásadní odlišností obou případů je fakt, že první z nich byl realizován pomocí radiografie Co60, druhý v době kdy gamagrafie již nebyla k dispozici technologií georadaru. Oba příklady umožňují přímé porovnání obou metod ve velmi podobných situacích [41].

### 8.2.1 Příklad 1: Prefabrikované vazníky v obchodním centru

Typickým příkladem stanovení příčiny vzniku poruch je případ vazníků nesoucích střešní konstrukci supermarketu. Šlo o vazníky délky 12 m, opatřené trojicí otvorů určených pro případný průchod vzduchotechniky a kabeláží. Právě u těchto otvorů byly zjištěny trhliny a byla vyslovena domněnka o chybném vyztužení prvků.

V rámci diagnostiky vyztužení byla realizována gamagrafie s užitím izotopu Co60, kdy na jeden boční líc vazníku byl umístěn radiografický film a na protilehlou stranu gamazáříč. Její provádění bylo komplikováno provozem objektu. Pro realizaci radiografie bylo nezbytné uzavření objektu a vyloučením pohybu osob v okolí (vytyčení přechodného kontrolovaného pásma). Proto musela být radiografie realizována v nočních hodinách. Současně musela být zřízena v prostorách objektu mobilní fotokomora pro okamžité vyvolávání a vyhodnocení radiogramů (pro možnost plánování dalšího postupu diagnostiky). Vyhodnocení radiogramů jednoznačně prokázalo pochybení ve vyztužení vazníků, část výztuže v okolí otvorů nebyla do prvku umístěna. V tomto případě radiografie jednoznačně prokázala příčinu poruch vazníků.

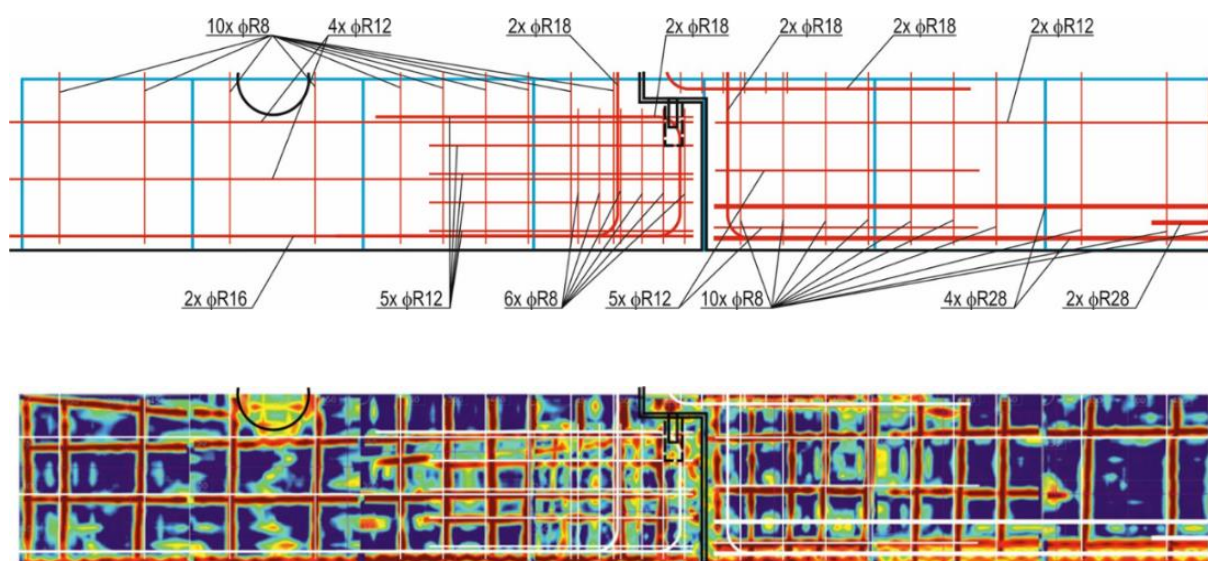


Obr. 30 Vlevo konstrukce nákupního centra s předmětnými vazníky, uprostřed jeden z radiogramů a vpravo jeho zasazení do výkresu vyztužení vazníku. Je dobře patrné, že v prvku chybí kruhové vyztužení kolem otvoru s radiálními paprsky. Naopak navíc je přidán jeden tržník.



## 8.2.2 Příklad 2: Prefabrikované vazníky v průmyslové hale

Velmi obdobný je případ, kdy byly konstatovány trhliny na systému vazníků v průmyslové hale. I zde bylo prvním krokem ověření správnosti vyztužení prvku. V tomto případě byla využita technologie georadaru. Pomocí sondy Hilti PS1000 X-scan byla na vybraných vaznících provedena z jednoho bočního líce série plošných radarových skenů  $600 \times 600$  mm (tloušťka prvku byla nižší, než hloubkový dosah radaru) a následně byly skeny spojeny a v počítači porovnány s elektronickou verzí prováděcí dokumentace. Celý proces byl sofistikovaný a relativně rychlý. Po potvrzení, že výztuž tvarově a polohově odpovídá, bylo provedeno ve vybraných místech měření elektromagnetickým indikátorem Proceq Profometer PM-630 pro určení průměrů výztuží. Poté, co i zde se prokázala shoda, byly už dále hledány příčiny poruch nikoli ve vyztužení, ale ve vlastnostech betonu.



Obr. 31 Příklad porovnání předepsaného vyztužení prvku se složenými radarovými skeny, je zjevné že prvky jsou vyztuženy poměrně přesně dle výkresů.

## 8.2.3 Vyhodnocení

Porovnáním obou případů bylo jednoznačně prokázáno, že z hlediska možných výstupů a úspěšnosti jsou v tomto případě radiografie a georadar v kombinaci s elektromagnetickým indikátorem zcela rovnocenné. Co však rovnocenné není, je časová, ekonomická a organizační náročnost, kde využití georadaru má oproti radiografii jednoznačné výhody.

## 9 PŘÍPADOVÉ STUDIE SOUČASNÉHO VYUŽITÍ RADIOGRAFIE S POMOCÍ RENTGENU

Cílem těchto případových studií bylo zjištění možností reálného využití rentgenografie pro stanovení polohy výztuže s užitím moderních technických rentgenů.

### 9.1 RADIOGRAFICKÝ PRŮZKUM PLASTIKY PIETA

Předmětem radiografického průzkumu byla plastika hudebníka nazvaná Pieta, pocházející z rozptylové loučky hřbitova v Přerově. Dle předpokladu byla plastika vyrobena z umělého kamene, či betonového kompozitu, použité kamenivo bylo neznámé. Plastika byla zjevně vyztužena ocelovými pruty čtvercového a kruhového průřezu, což bylo patrné na částech, které

byly v průběhu expozice plastiky povětrnostními vlivy poškozeny. V těchto místech došlo ke vzniku trhlin, či odpadnutí části kompozitu a obnažení výztuže. Cílem průzkumu bylo stanovení vyztužení plastiky (poloha a tvar prutů výztuže) a současně lokalizace případných vnitřních dutin objektu [42, 43]. Použitý kompozit byl podle všeho směsí cementového pojiva a drobného kameniva odhadované frakce 0 – 4 mm s vysokou objemovou hmotností (čedič), navzdory pórovitosti pojiva má cementový kompozit objemovou hmotnost ve stavu přirozeně vlhkém cca 2700 kg/m<sup>3</sup>. Tento fakt ovlivnil parametry radiografie, konkrétně zvýšil časy expozice, i nároky na volený proud a napětí na rentgence, a ve výsledku omezil možnosti prozařování v největších tloušťkách korpusu sochy, kde tloušťka byla na hranici možností prozařování rentgenem a rozeznatelnost výztuže byla omezená.

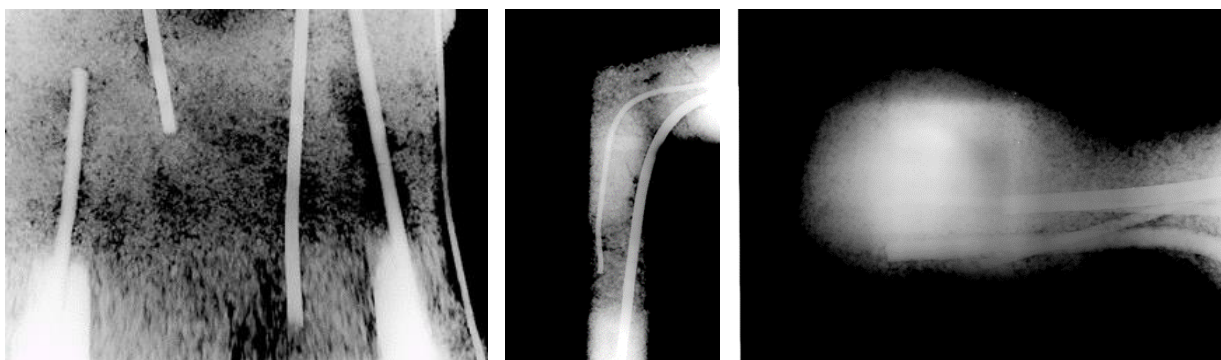
### 9.1.1 Metodika stanovení polohy výztuže

Jako zdroj rentgenového záření byl použit technický 300 kV rentgen YXLON, pro snímání prošlého a zeslabeného záření byly použity paměťové folie a skenovací systém Dürr.

Zkoumaný objekt byl prozařován v různých směrech přes klíčové části objektu. Bylo možno prozařovat postupně jen malé úseky plastiky, vždy s výrazně odlišnými expozičními parametry vhodnými pro zobrazení výztuže v dané části. Expoziční parametry rentgenu (napětí na rentgence V a proud na rentgence A) byly spolu s dobou expozice operativně měněny v závislosti na vhodné geometrii prozařování (tloušťka a ohnisková vzdálenost).

### 9.1.2 Výsledky radiografické kontroly

Na základě provedených radiografických zkoušek bylo zjištěno, že ve všech částech je kompozit homogenní a neobsahuje dutiny. Poloha výztuže byla zjištěna v jednotlivých prozařovaných částech s omezeními uvedenými v předchozí části.



Obr. 32 Dílčí radiogramy, zachycující průběh výztuže v konkrétních částech plastiky.

### 9.1.3 Vyhodnocení

Ve zkoumané plastice byl díky rentgenografii v maximálním možném rozsahu zachycen a vyhodnocen průběh vyztužení a byl orientačně posouzen použitý kompozit. Plastika je vyztužena třemi druhy výztužných prutů: čtverhranný průřez 10 × 10 mm – základní vyztužení osy hlava – trup – sokl, vyztužení rukou a nohou, kruhový průřez Ø 6 mm – vyztužení drobných partií (prsty, mandolina) a orámování soklu a trupu, výztuha patrně kruhového průřezu tloušťky (průměru) 16 mm. Zesílení základní osy trup – sokl.

Rentgenografie se k účelu stanovení vyztužení plastiky zcela osvědčila.



*Obr. 33 Předpokládaný průběh zjištěné výztuže v plastice. Červená – čtverhranný průřez  $10 \times 10$  mm, zelená – kruhový průřez  $\varnothing 6$  mm, modrá – výztuha kruhového průřezu tloušťky (průměru) cca 16 mm. Vyztužení mandoliny a prstů pomocí výztuže  $\varnothing 6$  mm není v obrázku zachyceno.*

## 9.2 RADIOGRAFICKÁ KONTROLA ROZMÍSENÍ DRÁTKŮ V DRÁTKOBETONOVÝCH DESKÁCH

Radiografie se jeví ideální nedestruktivní metodou pro stanovení polohy kovové rozptýlené výztuže (drátků) ve vzorcích drátkobetonu. Podmínkou je, aby byly vzorky, či části konstrukce dobře přístupné z obou stran, pro ideální umístění zdroje záření a záznamového zařízení, a současně aby tloušťka vzorků nepřesáhla hraniční možnosti použitého zdroje záření, konkrétně technického rentgenu, kde hovoříme o reálné limitní tloušťce cca 150 mm.

Typickým příkladem využití rentgenografie při ověřování rozptýlení drátků jsou zkoušky experimentálních desek, testovaných v rámci vývoje a testování betonů pro konstrukci ochranných prvků proti explozi vyvíjených ve spolupráci s Univerzitou obrany v Brně a ČVUT v Praze [85]. Jde zde o tři sady zkušebních desek rozměrů  $700 \times 700$  mm a tloušťce 60 mm, z různých druhů betonu (obyčejný hutný beton, UHPC), různým způsobem vyztužených (drátky Dramix RC80/60 BP v různé hustotě a betonářská výztuž).

Důvodem radiografické kontroly bylo v počáteční fázi ověření homogenity vyztužení v jednotlivých vzorcích před jejich testováním trhavinou ve VVP AČR Boletice a následně po trhacích zkouškách stanovení rozsahu trhlin ve struktuře betonu. Pro kontrolu homogenity rozptýlení drátků byla tedy zvolena radiografická metoda, jako zdroj záření byl použit rentgen YXLON SMART 300 HP, pro záznam prošlého a zeslabeného záření byly užity paměťové folie Dürr v kombinaci se Skenerem CR35 NDT Plus.

Pro radiografii desek byla nastavena ohnisková vzdálenost 1200 mm, expoziční parametry rentgenu byly určeny dle experimentálně stanoveného expozičního nomogramu a optimalizovány v hodnotách:

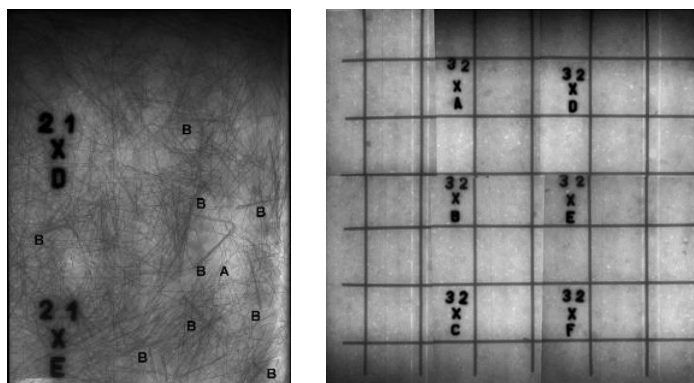
- Proud na rentgence: 3 mA.
- Napětí na rentgence: dle typu betonu 150 - 180 kV.
- Doba expozice: dle typu betonu 2,0 – 3,0 min.

Vzhledem k plošným rozměrům zkušebních desek  $700 \times 700$  mm, a rozměrům paměťových folií  $400 \times 400$  mm, byla plocha zkušební desky pokryta vždy šesti radiogramy. Pro jednoznačnou

identifikaci polohy radiogramu v rámci plochy desky byly na zadní stranu prozařovaných desek (na stranu blíže paměťové folii) umístěny olovené značky.

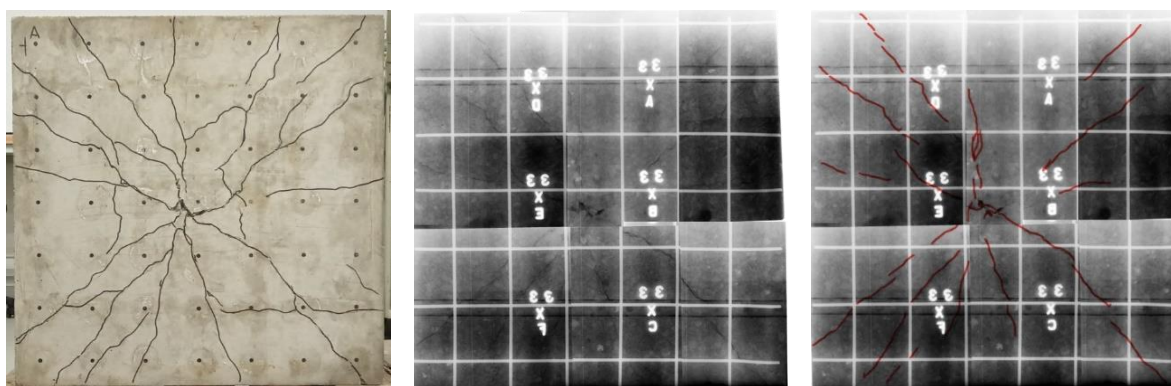
Výhodou použití paměťových folií, jako záznamového média, je kromě snadné digitální úpravy kontrastu a jasu radiogramu rovněž možnost pracovat díky možnosti invertování obrazu s pozitivem či negativem původního zobrazení. Díky tomu je možné zobrazit objekty s vyšší objemovou hmotností buď světlejší (což je obvyklé, vychází to z klasického původního principu tradičních radiografických filmů), nebo naopak tmavší, což lépe vyhovuje jakési obecné přirozené představě. Pro různé účely se hodí obě varianty, jak bude ukázáno dále.

Pro posouzení správného rozptýlení drátků byla zvolena právě druhá varianta, kdy drátky jsou v zobrazení tmavší (mají větší zčernání), než okolní beton.



Obr. 34 Při detailním studiu radiogramů je následně možné posoudit homogenitu rozmístění drátků ve vzorku. Zde na příkladu jednoho z radiogramů pořízených na desce 2-1 je například patrné místo s lokálně nižší hustotou drátků (A), a současně řada svazků drátků, které zůstaly spojeny (B) (obrázek vlevo), při složení šestice radiogramů pak získáme celkovou představu o vyztužení zkušební desky (obrázek vpravo – zde deska s betonářskou výztuží).

Stejným způsobem byla využita radiografie po zkouškách desek trhavinou. Na radiogramech se ve shodě s předpokladem jasně zobrazily trhliny zásadnějšiho charakteru, pouze vlasová poškození patrná nejsou, radiogram tedy na rozdíl od vizuálně patrné sítě vlasových trhlin na povrchu některých vzorků indikuje pouze závažnější poškození výraznější šířky. Pro ideální zobrazení trhlin bylo po testování obou možností zvoleno inverzní zobrazení radiogramů, kde se objekty s vyšší hustotou zobrazují světlejší, tedy výztuž a drátky jsou bílé, a trhliny černé.



Obr. 35 Jedna ze zkušebních desek po zkouškách trhavinou, s trhlínami patrnými vizuálně ve srovnání s významnějšími trhlínami zachycenými na radiogramu (na radiogramu jsou trhliny pro názornost zvýrazněny červeně zcela vpravo).

## 10 ZÁVĚR

Současný vývoj ve stavebnictví lze charakterizovat mimo jiné velkým zájmem o hodnocení existujících konstrukcí, zejména z důvodů rekonstrukcí či prodloužením životnosti starších objektů, a z důvodu kontroly jakosti provedení u konstrukcí nových. To platí v maximální možné míře i pro konstrukce železobetonové, či konstrukce z předpjatého betonu. Adekvátně tomu narůstá význam stavebně technických průzkumů a vlastní diagnostiky stavebních konstrukcí. V kontextu s platnými předpisy se rovněž v tomto směru zvyšuje preference nedestruktivních způsobů měření a zkoušek.

V této souvislosti je velmi pozitivním faktem, že během posledního desetiletí můžeme konstatovat oživení zájmu tradičních i nově etablovaných výrobců přístrojové techniky pro nedestruktivní zkoušky o vývoj nových a modernizaci tradičních zkušebních metod a zařízení.

V případě diagnostiky ocelové výztuže je to jednak zásadní pokrok v konstrukci elektromagnetických indikátorů, jejichž možnosti jsou dnes zcela jiné, než u předchozích generací, a zejména lze pozitivně kvitovat začlenění technologie georadaru mezi plnohodnotné metody pro diagnostiku železobetonu.

Stinnou stránkou obecného pokroku je ztráta gamagrafie v terénní diagnostice, kde hlavním důvodem je eskalace náročnosti platných bezpečnostních předpisů, která tuto metodu učinila ekonomicky a organizačně prakticky neudržitelnou.

V předchozích kapitolách bylo však jasně prokázáno, že většinu standardních požadavků, které oblast diagnostiky výztuže přináší, lze uspokojivě řešit vhodnou kombinací stávajících dostupných metod. Zde je zásadní přínos georadaru, který nejen, že pokryje v kombinaci s elektromagnetickými indikátory většinu úkolů, ale umožňuje aplikovat postupy a činnosti před jeho příchodem nedosažitelné. Gamagrafie překonává ostatní metody prakticky již jen ve dvou dílčích aspektech – v rámci stanovení polohy výztuže ve velmi komplikovaných průřezech konstrukce, s extrémní hustotou vyztužení v kombinaci s více vrstvami (železobetonové trámy), a dále při stanovení správného zainjektování předpínací výztuže. Do jisté míry i toto je příčinou, proč návrat gamagrafie do oboru nelze v dohlednu očekávat.

Na druhé straně rozvoj zobrazovacích technologií a dostupnost mobilních rentgenů umožňují dnes ve zvýšené míře ve vhodných případech využití rentgenografie.

Prakticky všechny dnes používané metody slibují navíc značné perspektivy dalšího vývoje technologie i přístrojové techniky, a tím i zvýšení jejich praktických možností. Je však nutno mít na paměti, že v oblasti detekce ocelové výztuže platí ve zvýšené míře to, co můžeme vztáhnout na celou oblast diagnostiky konstrukcí:

- Je třeba vhodně kombinovat dostupné metody, neomezit se v dané oblasti pouze na jedinou.
- Využívat moderní zařízení, které umožní využití maximálních možností dané metody.
- Nezbytná je vysoká odborná erudice personálu, provádějícího diagnostická měření, zkušenost s danými přístroji a typy konstrukcí.
- V případě nestandardních měření je žádoucí provést předchozí přípravu testy na vhodných modelech.

Takto vhodné využití optimálních postupů a technologií, ideálně využívajících NDT principu, ve výsledku zajistí kvalitní výsledky diagnostiky konstrukce a její následné adekvátní zhodnocení. Na základě současných trendů lze předpokládat další pozitivní vývoj v oboru a další rozšíření možností kvalitní diagnostiky.

## 11 SEZNAM LITERATURY A PRAMENŮ

- [1] ČSN ISO 138 22 Zásady navrhování konstrukcí – hodnocení stávajících konstrukcí. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [2] ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [3] ČSN 73 0038 Hodnocení a ověřování existujících konstrukcí – doplňující ustanovení Praha: ÚNMZ, 2019.
- [4] ČSN 42 0139 Ocel pro výztuž do betonu - Svařitelná betonářská ocel žebírková a hladká. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [5] ČSN EN ISO6892-1. Kovové materiály –Zkoušení tahem. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [6] ČSN 42 0002 Číselné označování a rozdělení ocelí ke tváření. Praha: ČNI, 1976.
- [7] CIKRLE, P., ANTON, O., DANĚK, P., KUCHARCZYKOVÁ, B., MISÁK, P. NDT zkoušení ve stavebnictví, příručka kurzu ČŽV. 18. Ústav stavebního zkušebnictví, Fakulta stavební, VUT v Brně. 2010. ISBN: 978-80-214-4-4198-9.
- [8] HOBST, L.; ANTON, O. Zásadní změny ve využívání radiografie ve stavebnictví. 18. Štiavnické dni Zborník 2017. RNDr. Bianka Horváthová. 2017. s. 24-28. ISBN: 9788097175436.
- [9] CIKRLE, P.; ANTON, O.; HEŘMÁNKOVÁ, V. Indikátory výztuže - oživení tradiční metody. Zkoušení a jakost ve stavebnictví. Brno: VUT Brno, 2014. s. 27-36. ISBN: 978-80-214-5032-5.
- [10] ANTON. O., CIKRLE, P., HEŘMÁNKOVÁ, V. Stavebně technický průzkum železobetonových stěn a stropu podchodu v areálu vápenky Mokrá. Vysoké učení technické v Brně, Ústav stavebního zkušebnictví, Brno, 2019.
- [11] CIKRLE, P.; ANTON, O.; DANĚK, P.; KUCHARCZYKOVÁ, B.; MISÁK, P., NDT Zkoušení ve stavebnictví. Příručka kurzu ČŽV., ISBN 978-80-214-4198-9, VUT v Brně FAST, Brno, 2010.
- [12] ČSN 73 2011 Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [13] ANTON, O.; CIKRLE, P.; HEŘMÁNKOVÁ, V. Zkušenosti s georadarem při stavebně technických průzkumech. TZB- info, 2014, roč. 2014, č. 5, s. 1-12. ISSN: 1801-4399.
- [14] CASSIDY, Nigel. 2008. Introduction to GPR. Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar. 21 - 24 June 2004, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- [15] KORDINA, T.; KADLECOVÁ, Z.; ANTON, O., Evaluation of the Influence of a Scanning Method on the Resulting Quality of the GPR Images, příspěvek na konferenci Proceedings of the XIII International Conference on Ground penetrating Radar Lecce (Italy), 21–25 June 2010, ISBN 978-1-4244-4605-6, 2010.
- [16] CIKRLE, P.; ANTON, O.; DANĚK, P.; KUCHARCZYKOVÁ, B.; MISÁK, P., NDT Zkoušení ve stavebnictví. Příručka kurzu ČŽV., ISBN 978-80-214-4198-9, Ústav stavebního zkušebnictví, VUT v Brně FAST, Brno, 2010.
- [17] Hilti [online]. [cit 2020-04-13]. Dostupné z: [https://www.hilti.cz/c/CLS\\_MEA\\_TOOL\\_INSERT\\_7127/CLS\\_CONCRETE\\_SCANNER\\_S\\_7127/r6436760](https://www.hilti.cz/c/CLS_MEA_TOOL_INSERT_7127/CLS_CONCRETE_SCANNER_S_7127/r6436760).
- [18] TRONCA, G., LEHNER, S., RAJ, L., TSALICOLOU, I, MEIER, J., MENNICKE, R. Looking into concrete – multiple frequency usage in radar products to detect structural parameters and defect faster and more accurately. 15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing, Singapore, 2017. Dostupné z: [https://www.ndt.net/events/APCNDT2017/app/content/Paper/274\\_Frehner.pdf](https://www.ndt.net/events/APCNDT2017/app/content/Paper/274_Frehner.pdf).
- [19] XIANG, Z., RASHIDI, A., OU, G. States of Practise and Research on Applying GF Technology for Labelling and Scanning Constructed Facilities. Journal of Performance

- of Constructed Facilities. Volume 33. Issue 5. American Society of Civil Engineers. Reston. USA 2019. Dostupné z : <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0001313>.
- [20] ANTON, O.; CIKRLE, P.; HEŘMÁNKOVÁ, V. Problematika současných možností diagnostiky předpínací výztuže v konstrukcích. Sborník recenzovaných příspěvků konference ZKOUŠENÍ A JAKOST VE STAVEBNICTVÍ 2019. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2019. s. 5-14. ISBN: 978-80-214-5750-8.
- [21] ČSN 73 6221 - Prohlídky mostů pozemních komunikací. Praha: ÚNMZ, 2018.
- [22] KRÁTKÝ, J., TRTÍK, K., VODIČKA, J.. Drátkobetonové konstrukce. ČKAIT Edice betonové stavitelství. Praha 1999. ISBN: 978-1-7281-4593-8.
- [23] ČSN P 73 2450 Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, Praha: ÚNMZ, 2015.
- [24] ČSN P 73 2452 Vláknobeton – Zkoušení zatvrdlého vláknobetonu, Praha: ÚNMZ, 2015.
- [25] ZEZULOVÁ, E.; KOMÁRKOVÁ, T.; STONIŠ, P. Experimental Detection of Fibres Concentration in Steel Fibre Reinforced Concrete by Electromagnetic Coil. In International Conference on Military Technologies (ICMT) 2019. 2019. s. 1-5. ISBN: 978-1-7281-4593-8.
- [26] HOBST, L.; BÍLEK, P. Non-destructive identification of material properties of fibre concrete: a stationary magnetic field. In ICNAAM 2015 - Proceedings. AIP conference proceedings. AIP Conference Proceedings. Melville (USA): American Institute of Physics, 2016. s. 380010-1 (380010-4 s.) ISBN: 978-0-7354-1392-4. ISSN: 0094-243X.
- [27] HOBST, L.; BÍLEK, P.; VODIČKA, J.; VALA, J. Measurement of set fibre-concrete homogeneity in finished steel fibre-concrete structure of segmental tunnel lining. Advanced Materials Research, 2015, roč. 2015, č. 1106, s. 41-44. ISSN: 1022-6680.
- [28] KOMÁRKOVÁ, T.; ANTON, O.; STONIŠ, P.; DUBEC, B. NDT Method for the Assessment of Homogeneity of Steel Fibre Reinforced Concrete. In International Conference on Military Technologies (ICMT) 2019. 2019. s. 1-4. ISBN: 978-1-7281-4593-8.
- [29] ZEZULOVÁ, E.; KOMÁRKOVÁ, T.; HASILOVÁ, K.; STONIŠ, P.; ŠTOLLER, J.; ANTON, O. NDT Methods Suitable for Evaluation the Condition of Military Fortification Construction in the Field. Applied Sciences - Basel, 2020, roč. 10, č. 22, s. 1-16. ISSN: 2076-3417.
- [30] ANTON, O., Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno. 2009.
- [31] ANTON. O. ZPRÁVA o stavebně-technickém průzkumu mostu ev. č. 50-003..2 (levý most) přes komunikaci 373 – závěrečná zpráva. Vysoké učení technické v Brně, Ústav stavebního zkušebnictví, Brno, 2018.
- [32] ANTON. O. ZPRÁVA o stavebně-technickém průzkumu mostu ev. č. 50-003..1 (pravý most) přes komunikaci 373 – závěrečná zpráva. Vysoké učení technické v Brně, Ústav stavebního zkušebnictví, Brno, 2018.
- [33] ANTON. O. Zpráva o stavebně-technickém průzkumu mostu ev. č. D1-237..2 přes řeku Svitavu – závěrečná zpráva. Vysoké učení technické v Brně, Ústav stavebního zkušebnictví, Brno, 2018.
- [34] ANTON, O., BAŽANT, Z., CIKRLE, P., HEŘMÁNKOVÁ, V. Stavební průzkum budovy 33 v areálu Fatra Napajedla – závěrečná zpráva. Vysoké učení technické v Brně, Ústav stavebního zkušebnictví, Brno, 2013.
- [35] CIKRLE, P., ANTON, O., HEŘMÁNKOVÁ, V. Stavební průzkum v objektu OC Union – závěrečná zpráva. Vysoké učení technické v Brně, Ústav stavebního zkušebnictví, Brno, 2014.
- [36] ANTON. O., CIKRLE, P., HEŘMÁNKOVÁ, V. Stavebně technický průzkum objektu č. 24 (tzv. tříetážovka) v areálu Fatra Napajedla – závěrečná zpráva. Vysoké učení technické v Brně, Ústav stavebního zkušebnictví, Brno, 2016.

- [37] ANTON, O., CIKRLE, P., HEŘMÁNKOVÁ, V. Stavebně technický průzkum objektu č. 27 (tzv. velká pětietážovka) v areálu Fatra Chropyně – závěrečná zpráva. Vysoké učení technické v Brně, Ústav stavebního zkušebnictví, Brno, 2016.
- [38] ANTON, O., CIKRLE, P., HEŘMÁNKOVÁ, V. Stavebně technický průzkum objektu B26 v areálu Fatra Chropyně – závěrečná zpráva. Vysoké učení technické v Brně, Ústav stavebního zkušebnictví, Brno, 2015.
- [39] ANTON, O.; CIKRLE, P.; HEŘMÁNKOVÁ, V. Problematika současných možností diagnostiky předpínací výztuže v konstrukcích. Sborník recenzovaných příspěvků konference
- [40] Silnice I/57 Holasovice, Most ev. č. 57-016 c – stavební část. Ing. Pavel Kurečka Mosty s.r.o., Brno 2011.
- [41] ANTON, O.; HEŘMÁNKOVÁ, V. Průkazné stanovení vyztužení železobetonové konstrukce a vhodné NDT metody. TZB-info, 2017, roč. 9, č. 2017, s. 1-6. ISSN: 1801-4399.
- [42] ANTON, O. Zpráva o radiografickém průzkumu plastiky Pieta – závěrečná zpráva. Vysoké učení technické v Brně, Ústav stavebního zkušebnictví, Brno, 2018.
- [43] ANTON, O.; VÍTEK, L.; HEŘMÁNKOVÁ, V.; KOMÁRKOVÁ, T.; CIKRLE, P. Detection of reinforcement in the non-traditional building structures – historical statues. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2018. s. 1-7. ISSN: 1757-8981.
- [44] ZEZULOVÁ, E.; KOMÁRKOVÁ, T.; HASILOVÁ, K.; STONIŠ, P.; ŠTOLLER, J.; ANTON, O. NDT Methods Suitable for Evaluation the Condition of Military Fortification Construction in the Field. Applied Sciences – Basel, 2020, vol. 10, no. 22, p. 1-16. ISSN: 2076-3417



## ABSTRAKT

Cílem práce byl rozbor řady aspektů současné situace ve specifické oblasti diagnostiky železobetonových konstrukcí a konstrukcí z předpjatého betonu, tedy v oblasti stanovení vyztužení konstrukcí. Dnešní doba je charakterizována zvýšenou četností požadavků na hodnocení stávajících konstrukcí, součástí tohoto procesu je následně diagnostika konstrukcí a stavebně technické průzkumy. Ty jsou prováděny u konstrukcí různého provedení i stáří, z různých důvodů, počínaje snahou o prodloužení životnosti a změnami účelu využívání u starých konstrukcí, až po vysvětlení poruch či odhalení vad u konstrukcí zcela nových.

Ruku v ruce s navýšením těchto požadavků naštěstí, po letech stagnace, přichází období dynamického rozvoje technologií a přístrojového vybavení zejména v oblasti nedestruktivních diagnostických metod. I v oblasti diagnostiky vyztuže dnes disponujeme jak novými generacemi přístrojů v oblasti tradičních metod, jakými je například metoda elektromagnetických indikátorů vyztuže, kde rozdíl mezi poslední a minulou generací přístrojů je doslova propastný, tak například technologií georadaru, speciálně aplikovanou pro tuto oblast diagnostiky železobetonových konstrukcí, která přinesla do oboru zcela nové obzory. Na druhé straně byla zásadně omezena možnost využití nejtradičnější a nejkompexnější metody, jakou bezesporu byla radiografie s užitím izotopu Co60.

Práce se snaží jednoznačně posoudit tuto situaci, a naznačit výhody i nevýhody jednotlivých metod, šíří možnosti jejich využití jako náhrady vybraných aspektů radiografie, a současně predikovat oblasti diagnostiky železobetonu, kde má radiografie s využitím technických rentgenů, jako alternativních zdrojů záření, stále své uplatnění.

## ABSTRACT

The aim of the work was to analyze various aspects of the current situation in the specific field of diagnostics of reinforced concrete and prestressed concrete structures, i.e. in the field of determining the reinforcement of structures. Today's time is characterized by an increased frequency of need for the evaluation of existing structures. An eventual part of this process are the diagnostics of structures and construction-technical surveys. These are performed on structures of various designs and ages, and for various reasons, from an effort to extend the service life of old structures or changes in their purpose, to an explanation or detection of defects in completely new structures.

Fortunately, hand in hand with the increase in these requirements, after years of stagnation, comes a period of dynamic development of technologies and instrumentation, especially in the field of non-destructive diagnostic methods. Even in the field of reinforcement diagnostics, we now have access to new generations of devices for both traditional methods, such as the method of electromagnetic indicators of reinforcement, where the difference between the last and previous generation of devices is literally abysmal, and i.e. the GPR technology, specially applied for this area of diagnostics of reinforced concrete structures, which has brought completely new horizons to the field. On the other hand, the possibility of using the most traditional and complex method, such as radiography using the Co-60 isotope, became fundamentally limited.

The work tries to clearly assess this situation, and outline the advantages and disadvantages of individual methods, the breadth of their use as a substitute for selected aspects of radiography, and at the same time predict areas of reinforced concrete diagnostics where radiography using technical X-rays as alternative sources of radiation still has its application.