



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**VYUŽITÍ METODY GEORADARU PRO ZJIŠŤOVÁNÍ
PORUCH KONSTRUKCÍ**

APPLICATION OF GPR METHOD FOR DETECTION OF STRUCTURAL FAILURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Křepelka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR CIKRLE, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jan Křepelka
Název	Využití metody georadaru pro zjišťování poruch konstrukcí
Vedoucí práce	doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Balayssac, Jean-Paul and Garnier, Vincent Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures ISBN: 9781785482298]

Cikrle P., Anton, O., Daněk, P., Kucharczyková, B., Misák, P. NDT zkoušení ve stavebnictví. Příručka kurzu ČŽV. 1. vydání Brno, VUT v Brně, 2010.

Cikrle, P. a kol. Diagnostické metody ve stavebnictví, modul M01. Studijní opora, VUT v Brně FAST, 2011.

Anton, O.; Steinbruch, J.; Kordina, T. Rozvoj a použití georadaru při diagnostice železobetonových konstrukcí. Beton TKS, 2011.

Hruška, J., Vilč, M. Průzkum kabelových kanálků za použití georadaru. In Mosty 2004, sborník konference, Brno, 2004.

HILTI: Návod na použití systému PS 1000 X-scan.

Proceq: GPR live sales flyer.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Úvodní část a cíle práce.

Teoretická část:

Přehled metod umožňujících detekci poruch ve struktuře betonu: impact - echo, ultrazvuk, radar, radiografie, apod.

Porovnání metod z hlediska principů a lokalizace dutin, trhlin a delaminací.

Praktická část: Provedení porovnávacího měření (metodou GPR, ultrazvukem, případně dalšími metodami) na modelu betonové konstrukce s uměle vytvořenými vadami a defekty.

Ověření metody na reálných mostních konstrukcích.

Tabelární, grafické a obrazové zpracování výsledků měření.

Zhodnocení použitých metod a přístrojů z hlediska přesnosti a citlivosti měření.

Závěr.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Práce pojednává o nedestruktivních zkouškách, umožňujících zkoumání poruch betonu v jeho vnitřní struktuře. V teoretické části jsou popsány vybrané metody z hlediska jejich principu. Z něj vychází pro každou metodu její specifické uplatnění, její možnosti, ale i limity. V praktické části se práce zaměřuje na georadar, u kterého došlo k využití nové technologie multifrekvenčního skenování. Proběhlo měření s nyní běžně používaným georadarem Hilti PS 1000 X-Scan a zároveň s nově dostupným georadarem Proceq GP8000. Porovnány byly výsledky jak z modelového tělesa, tak i z reálné mostní konstrukce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nedestruktivní zkušebnictví, georadar, betonové konstrukce, poruchy betonu, určení polohy výztuže, mostní konstrukce, modelové těleso.

ABSTRACT

This Bachelor thesis deals with the non-destructive testing, which enable's researches of failures in concrete inner structure. In the theoretical part of the thesis, selected methods are described based on their principles. Specific possibilities of use, abilities and limits are based on the method's principle. In the practical part, the thesis focuses on Ground Penetrating Radar with the usage of a new multi-frequency scanning technology. The measurements took place with commonly used Ground Penetrating Radar Hilti PS 1000 X Scan and also with newly available Ground Penetrating Radar Proceq GP8000. Not only the measurement results of model solids were compared, but also of real bridge construction.

KEYWORDS

Non-destructive testing, ground penetrating radar, concrete structures, concrete failures, reinforcement localization, bridge construction, model object.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Jan Křepelka *Využití metody georadaru pro zjišťování poruch konstrukcí*. Brno, 2020. 73 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Využití metody georadaru pro zjišťování poruch konstrukcí* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 5. 2020

Jan Křepelka
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Využití metody georadaru pro zjišťování poruch konstrukcí* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2020

Jan Křepelka
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu mé bakalářské práce, doc. Ing. Petru Cikrlovi Ph.D. za trpělivost a důvěru při jejím zpracování a hlavně za ochotu při provádění měření. Mé velké díky má Ing. Michal Janků Ph.D. za zapůjčení nového georadaru a všichni pracovníci Ústavu stavebního zkušebnictví, kteří mi pomohli s praktickými činnostmi, ať už se jedná o jádrové vývrty, či zpracování dat.

OBSAH

1. ÚVOD.....	11
2. CÍL PRÁCE	12
3. PŘEHLED METOD UMOŽŇUJÍCÍCH DETEKCI PORUCH VE STRUKTUŘE BETONU	13
3.1. Poruchy struktury betonu.....	13
3.2. Diagnostické metody	14
3.2.1. Semidestruktivní metody	14
3.2.2. Nedestruktivní metody	15
3.3. Metoda impact – echo.....	15
3.3.1. Princip metody	15
3.3.2. Frekvenční analýza	16
3.3.3. Využití metody.....	19
3.4. Radiografie.....	19
3.4.1. vybavení	20
3.4.2. Princip metody	21
3.4.3. Využití metody.....	22
3.5. Ultrazvuk.....	23
3.5.1. Průchodová ultrazvuková metoda	25
3.5.2. Odrazová ultrazvuková metoda	26
3.6. Georadar	27
3.6.1. Konstrukce radaru	27
3.6.2. Princip georadaru	27
3.6.3. Výstupní data.....	30
3.6.4. Výhody, limity.....	31
3.6.5. Multifrekvenční georadary	32
4. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	33
4.1. Přístroje.....	33
4.1.1. Proceq GP8000	33
4.1.2. Hilti PS 1000 X-Scan.....	35
4.2. Betonový blok v areálu Fakulty stavební.....	36
4.2.1. Popis bloku	36
4.2.2. Měření georadarem Proceq GP8000	39
4.2.3. Měření georadarem Hilti PS 1000 X-Scan	46

4.2.4.	Ověření skenů jádrovými vývrty.....	51
4.3.	Most 50-003..2 - Ostravská přes Bělohorskou	55
4.3.1.	Popis mostu	55
4.3.2.	Měření	57
4.4.	Zhodnocení výsledků	67
6.	BIBLIOGRAFIE.....	69
5.	ZÁVĚR.....	68
7.	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	72

1. ÚVOD

Beton, jako stavební materiál, je známý již tisíce let. Důkazy jeho využití se nám dochovaly nejen z textových pramenů, některé konstrukce můžeme navštívit i dnes. Příkladem může být Římský Pantheon s polokulovitou klenbou a na tehdejší dobou impozantním rozpětím přes 43 m. Využití tohoto stavebního materiálu pokleslo zároveň s úpadkem starověkých říší. V moderním stavebnictví se začal beton uplatňovat v 19. století, společně s rozvojem hydraulických pojiv. Brzy následovaly železobetonové konstrukce na základě patentu Josepha Moniera z roku 1867. V polovině 20. století se začal využívat beton předepjatý [1].

S novými technologiemi a postupy vznikaly konstrukce stále smělejší – mosty s velkými rozpětími a malými tloušťkami, budovy stále vyšší a štíhlejší. S náročností stavby ovšem rostly i požadavky na kvalitu stavebních materiálů a preciznost stavby. Na své důležitosti nabyla diagnostika stavebních konstrukcí a použitých materiálů.

Jedním z cílů tohoto oboru je nalezení vnitřních nehomogenit, či cizích struktur v objektu. Může se jednat například o dutiny a štěrková hnízda, která by mohla snížit pevnost konstrukce jako celku, také může být ale cílem nalezení betonářské výztuže, pro omezení jejího poškození při práci na stavbě. Z tohoto důvodu byla vyvinuta řada diagnostických metod. V devadesátých letech minulého století se začala používat impact – echo metoda, využívající odrazu vln od dutin v materiálu [2]. Ze zdravotnictví se přejala radiografie, která je založena na průchodu a zeslabování ionizačního záření zkoumaným tělesem. Uplatnění našla také ultrazvuková metoda a v neposlední řadě georadar, technologie, která byla původně určena pro geotechnický průzkum a archeologii.

Diagnostické metody a přístroje, jak převzaté z jiných odvětví, tak vyvinuté speciálně pro účely stavebnictví, se neustále vyvíjejí a zdokonalují. Příkladem pokroku může být právě georadar, jehož aplikací a novými možnostmi se zabývá tato práce.

2. CÍL PRÁCE

Cílem práce je seznámení s principy základních diagnostických metod využívaných pro lokalizaci vad betonových konstrukcí, porovnání jejich možností a omezení.

Podrobněji se práce zabývá georadarem, u něž došlo v posledních letech k využití nové technologie – „Stepped frequency GPR“, při níž radar pracuje s více frekvencemi vlny během jednoho měření. Díky tomu by mělo být umožněno přesné zaměření poruch a výztuže v blízkosti povrchu betonu a současně odhalení vad, či zadní stěny konstrukce v dostatečné vzdálenosti.

Cílem praktické části práce je odhalení detekčních možností nového zařízení na trhu – Proceq GP8000 a to jak na známých konstrukcích, tak na reálném mostním objektu. Dále porovnání nově představeného georadaru s nyní na trhu již běžně užívaným strojem – Hilti PS 1000 X-scan.

3. PŘEHLED METOD UMOŽŇUJÍCÍCH DETEKCI PORUCH VE STRUKTUŘE BETONU

3.1. Poruchy struktury betonu

Poruchami struktury betonu rozumíme oblasti, ve kterých přestává být materiál homogenní. Tyto vady přitom mohou vznikat jak při betonáži, tak v průběhu životnosti konstrukce. Rozeznáváme tyto základní poruchy:

Dutina – jedná se o oblast v betonové konstrukci či dílci, která není vyplněná požadovaným materiálem. Místo kameniva a cementu bývá vyplněna vzduchem, nebo v horším případě vodou. Vznikají při nedostatečném hutnění, či špatných vlastnostech směsi. Malé dutiny bývají popisovány jako póry (do 7 mm), velké pak jako kaverny (nad 15 cm³). Příklad dutiny je na obr. 1.

Štěrkové hnízdo – vzniká při nadměrném hutnění betonu, hrubé částice kameniva se usazují ve spodní části betonovaného prvku a jemné částice jsou naopak vyplavovány směrem vzhůru. Výsledkem je nekonzistentní struktura, jak ukazuje obr. 2.



Obrázek 1: Dutina u povrchu betonu [3].



Obrázek 2: Štěrkové hnízdo [4].

Trhlina – vzniká vlivem působení zatížení, nebo vlastním vysycháním a smršťováním betonu. Zatížení přitom může být jakéhokoliv typu, od teplotního, přes silové, až po účinky předpětí. Šířka trhliny se obvykle pohybuje od setin milimetru až jeho jednotky. Příklad trhliny je na obr. 3.

Delaminace – delaminací rozumíme odprýsknutí povrchové vrstvy betonu. Z vnějšího pozorování nemusí být tato vada patrná, většinou se dá lehce odhalit poklepáním. Odloupnutá vrstva mívá tloušťku do 3 cm, někdy až po úroveň výztuže. Příklad je vidět na obr. 4.



Obrázek 3: Trhlina při povrchu betonu [5].



Obrázek 4: Delaminace [6].

3.2. Diagnostické metody

Metody pro diagnostiku stavebních konstrukcí můžeme rozdělit dle různých kritérií, jedno ze základních dělení je dle míry poškození konstrukce. Získáváme při něm dvě kategorie – metody semidestruktivní a nedestruktivní (metody čistě destruktivní se na konstrukcích obvykle neužívají). Další možnosti dělení metod jsou například dle fyzikální podstaty zkoušky – elektromagnetické metody (georadar), radiační metody (radiografie), elektrodynamické metody (ultrazvuk), elektrické metody a další.

3.2.1. Semidestruktivní metody

Semidestruktivní metody jsou takové, při nichž dojde během provádění k zásahu do zkoumané konstrukce. Tato poškození mohou být téměř nepatrná (vrtací zkouška pro stanovení pevnosti malty ve spárách), ale i velmi výrazná (velkopřůměrové jádrové vývrty). Mezi jejich výhody patří především přímé měření požadované vlastnosti. Za nevýhody těchto metod můžeme považovat větší náročnost při provádění a s tím související cenu zkoušek. Mezi semidestruktivní metody řadíme jádrové vývrty, odtrhové zkoušky, zkoušení pomocí plochých lisů, vrtací zkoušky, brusné metody a tvrdoměrné metody vnikací [7].

3.2.2. Nedestruktivní metody

Při nedestruktivním zkoušení nedochází k poškození konstrukce, nebo je toto poškození naprosto zanedbatelné. Oproti semidestruktivním metodám nebývá měřena přímo hledaná veličina. Její hodnota je odvozena z korelačních vztahů, které vyjadřují závislost veličiny hledané na veličinách měřených. Proto hraje u některých nedestruktivních metod velkou roli využití matematické statistiky. Mezi výhody nedestruktivního zkušebnictví se řadí jednoznačně opakovatelnost zkoušek a rychlost jejich provádění. Na druhou stranu interpretace výsledků je často složitá a nemusí být jednoznačná. Některé metody totiž vycházejí z principů zkoušek materiálů a výrobků, které používali lidé od nepaměti. Dutiny odhalované poklepem, či posuzování stavu konstrukce dle vizuální kontroly prasklin. S rozvojem moderních technologií se daří míru subjektivity do značné míry minimalizovat [7], [8].

Nedestruktivních metod je celá řada, zmínit lze například ultrazvukovou metodu, vrypové metody, impakt – echo metodu, metodu akustické emise, elektromagnetickou sondu, radiografickou metodu [7]. Podrobněji se tato práce zabývá metodami, které umožňují detekci poruch ve struktuře betonu.

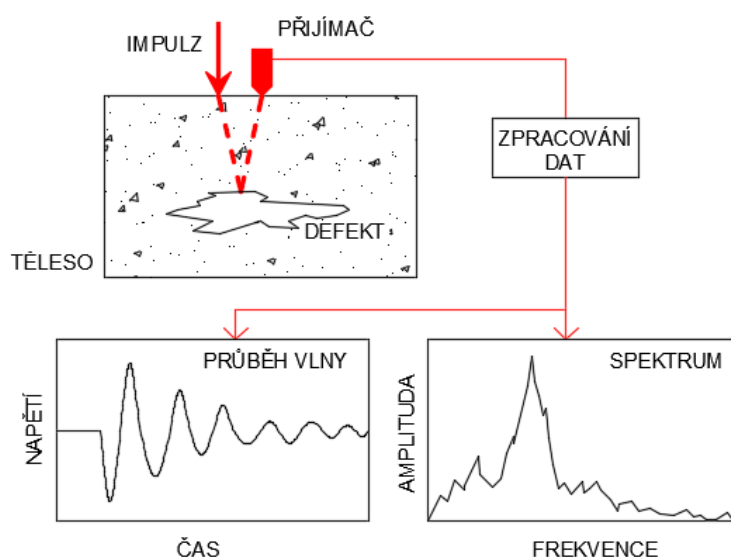
3.3. Metoda impact – echo

Metoda impact – echo je akustická metoda, vyvinutá a zkoumaná v osmdesátých a devadesátých letech v New Yorku na Cornellově univerzitě [2].

3.3.1. Princip metody

Princip vychází z jedné z nejstarších diagnostických metod vůbec. Poklepání na povrch s cílem vyhodnotit odezvu a odhalit tak defekt. Mechanicky se na povrchu vyvolá úderem tlaková vlna, která se šíří zkoumaným tělesem a po jeho povrchu. Tato vlna má frekvenci mezi 1 až 60 kHz. Na rozhraní materiálů se část vlny odrazí zpět a je zachycena přijímačem. Rozhraní přitom může být povrch objektu – například zadní strana, nebo diskontinuita. Nejvýraznějším a nejlépe odhalitelným rozhraním je beton – vzduch, obdobně jako u ultrazvuku. Přijímač odražený signál zachytí a uloží v elektronické podobě pro zpracování. Výsledkem

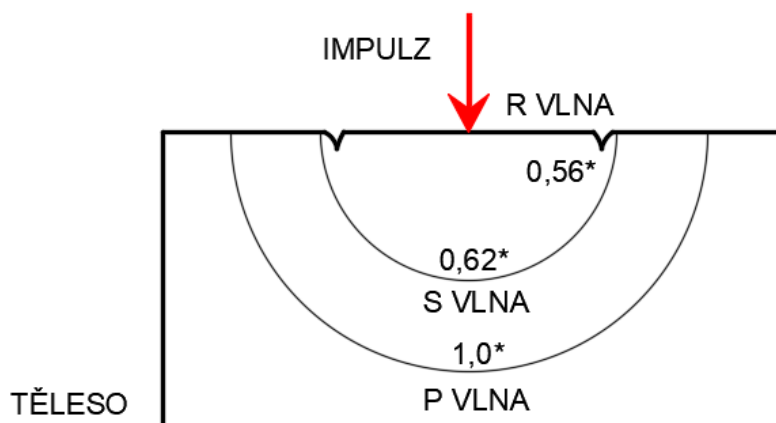
je zobrazení průběhu tlakové vlny a graf zobrazující závislost frekvence a amplitudy (spektrum). Vícenásobné odrazy od rozhraní přitom způsobují krátkodobé rezonance určitých frekvencí, které se zobrazí jako hodnoty s vysokou amplitudou [9]. Z těchto grafů je možno zhodnotit integritu betonu, případně lokalizovat poruchy. Proces je zobrazen na obr. 5. Každý betonový prvek, jako například deska, či I profil, má své typické zobrazení spektra, na principu hledání odlišností je založena lokalizace defektů.



Obrázek 5 Princip metody impact-echo. Do tělesa je vyslán mechanický impulz, ten se odráží na rozhraní materiálů s různými vlastnostmi. K Největšímu odrazu dochází u defektu – na spektru je nejvýraznější frekvence odpovídající hloubce dutiny.

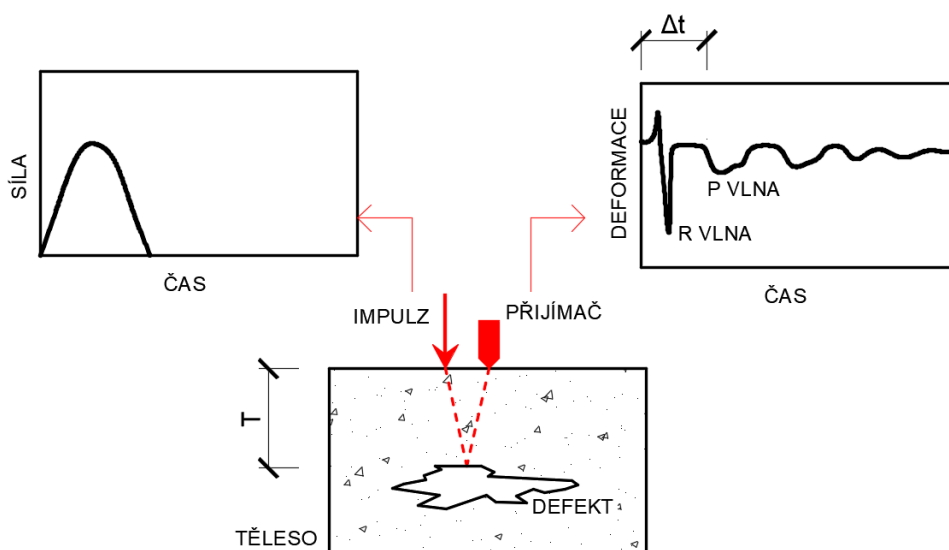
3.3.2. Frekvenční analýza

Impulz, většinou úder, vyvolá v materiálu několik typů vln. P-vlnu, která se šíří materiálem největší rychlostí, tato vlna přitom odpovídá šíření normálového napětí. S-vlnu, která souvisí s šířením smykového napětí a jejíž rychlost odpovídá 0,62násobku rychlosti vlny P. R-vlnu, která se šíří po povrchu. Vlny jsou částečně odráženy vnitřními nehomogenitami a povrchy, ke kterým proniknou. U zachycených odrazů jsou přitom dominantní signály P vlny [2]. Schéma šířících se vln je vidět na obr. 6.



Obrázek 6: Vlny šířící se prostředím tělesa, vyvolané impulzem na povrchu. Převzato a upraveno z [2]

Jak bylo zmíněno, přijímač zachytí odražené vlny. Jedna z prvních a zároveň nejvýraznější, je povrchová (R) vlna. Následuje série odrazů P vlny. Ta se opakuje v důsledku neustálého odrážení od diskontinuity a povrchu. S vlna je oproti ní nevýrazná, proto není na výstupu moc patrná. Zobrazení zachycených vln je vidět na obr. 7.



Obrázek 7: Zachycení vln pomocí přijímače. Převzato a upraveno z [2].

Rozvoj a úspěch impact echo metody byl možný díky využití frekvenční analýzy, namísto časové. To znamená, že zkoumány jsou frekvence odražených vln, namísto přiřazování typu jednotlivým vlnám dle času jejich návratu a intenzity. P vlna vyvolaná zdrojem se několikrát odrazí mezi povrchem a diskontinuitou, z tohoto důvodu má zachycený signál opakující se průběh. Pokud je přijímač v blízkosti zdroje, můžeme říct, že vzdálenost, kterou urazí vlna, je $2T$. Kde T je vzdálenost mezi přijímačem a diskontinuitou (viz obr. 7) [2]. Časový interval Δt od vyslání vlny a přijetí jejího odrazu je pak vyjádřen rovnicí:

$$\Delta t = \frac{2T}{C} \quad (1)$$

kde

C = rychlost šíření P vlny

T = vzdálenost přijímače a diskontinuity.

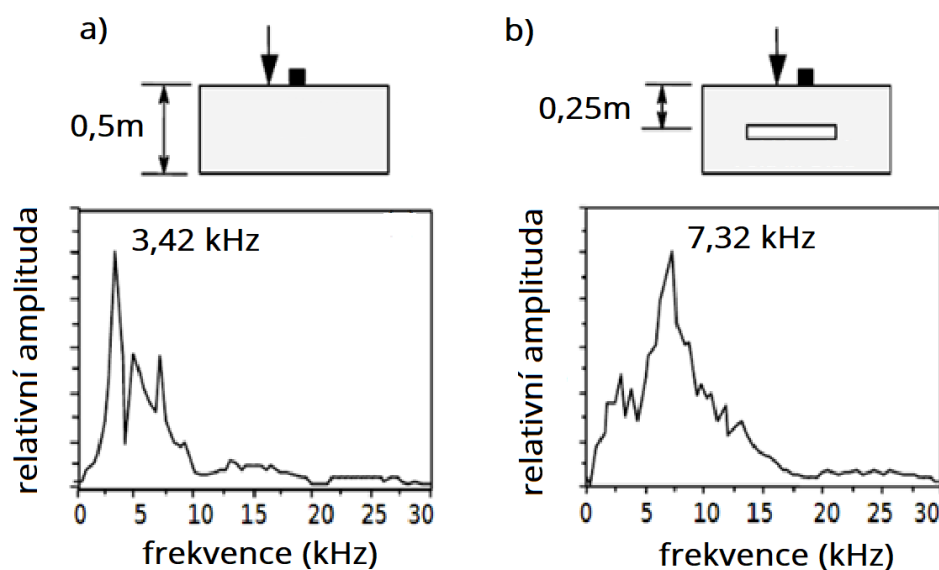
Frekvence je obrácená hodnota časového intervalu Δt :

$$f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{C}{2T} \quad (2)$$

Ve frekvenční analýze je cílem zjistit dominantní frekvence. Používá se Fourierova transformace, jejíž výsledkem je spektrum amplitud. U nepoškozených deskovitých objektů je dominantní frekvence právě ta, které odpovídá tloušťka konstrukce. Ta se dá vyjádřit ze vztahu (2) jako:

$$T = \frac{C}{2f} \quad (3)$$

Obdobným způsobem se dá spočítat pozice hledané diskontinuity. Na obr. 8 je zobrazen příklad zobrazení metody impact – echo u neporušené desky (a) a desky s dutinou (b).



Obrázek 8: Zobrazení spektra amplitud pro neporušenou deskovou konstrukci (a) a deskovou konstrukci s dutinou (b). Převzato a upraveno z [2].

3.3.3. Využití metody

Metoda impact – echo může být využita pro lokalizaci poruch betonu, jako jsou trhliny, delaminace, dutiny, či šterková hnízda a to u betonu prostého, železobetonu i předpjatého betonu. Jelikož metoda využívá mechanického vlnění, nachází nejlepší uplatnění při lokalizaci rozrání betonu a vzduchu. S velkou přesností se proto používá pro měření tloušťky konstrukcí, odchylky od skutečných hodnot se uvádějí i do 3 % [9].

3.4. Radiografie

Radioaktivní prvky přírodní, či uměle vytvořené, uvolňují do okolí ionizující záření. Na většinu organismů má devastující účinky, velké uplatnění nachází ovšem v průmyslu, a tedy i ve stavebnictví. Při průchodu prostředím se v závislosti na jeho charakteristikách záření postupně zeslabuje. Z úbytku energie lze poté odvodit vnitřní strukturu zkoumaného objektu a odhalit tak například nehomogenity, nebo betonářskou výztuž.

3.4.1. vybavení

Radiační defektoskopie využívá k lokalizaci vad betonu ionizujícího záření. Zdrojem takového záření mohou být radioizotopy, či rentgeny a urychlovače.

Radioizotopy jsou radioaktivní prvky. Může se jednat o prvky vyskytující se v přírodě, či uměle vytvořené. Dříve se obvykle využívaly přirozené radioizotopy, nejčastěji radium. V současné době se uplatňují více umělé prvky, které kromě záření alfa, beta a gama mohou vysílat i pozitrony, či být zdrojem neutronového a protonového záření. Nejčastěji používané umělé radioizotopy jsou kobalt, cesium a iridium.

Rentgeny a urychlovače se řadí mezi zdroje s přerušovanou emisí záření. Jejich provoz je závislý na dodávce elektrické energie, pomocí které jsou urychlovány elektrony. Výhodou takovýchto zařízení je jejich bezpečnost, neboť po vypnutí neemitují žádné záření.

Záření je po průchodu materiálem promítnuto na zobrazovací prostředek, ten by měl umožňovat ostrou kresbou obrazu, dostatečnou citlivost a možnost uschování zobrazení.

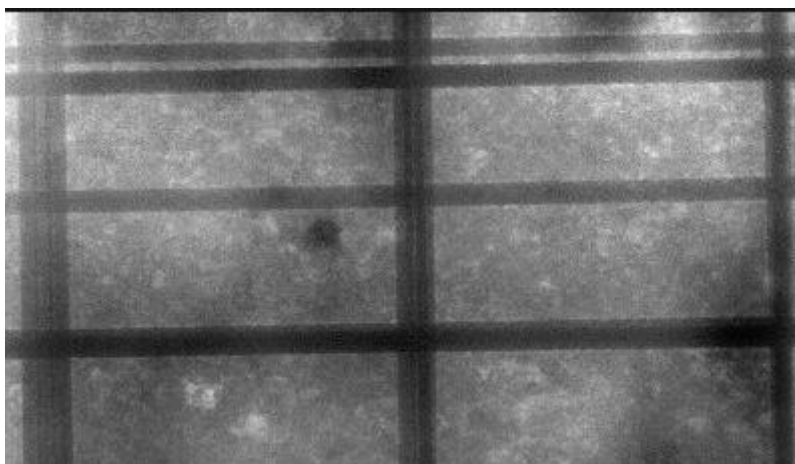
Radiografický film je nejrozšířenější způsob záznamu. Jedná se o citlivou vrstvu (např. emulze halogenidu stříbra) doplněnou ochrannými, případně zesilovacími vrstvami. Nejběžnější velikost filmu je 300 x 400 mm. Radiografický film je pro uchování třeba vyvolat a ustálit, jedná se o pracný proces, který se dnes dá urychlit použitím vyvolávacího automatu.

Polovodičové převaděče obrazu mohou být s přímou, či nepřímou konverzí. Oproti filmu se obraz ukládá přímo v digitální podobě a je možné jej rovnou upravovat. Převaděče jsou citlivá zařízení a manipulace s nimi je oproti klasickému filmu náročná [10].

Paměťové folie jsou jakousi kombinací výše zmíněných možností. Na folii je během prosvícení uložena rentgenová informace, po ukončení měření je folie vložena do speciálního rentgenu, který jej s vysokou přesností převede do digitální podoby. Dále je možné snímek jakkoliv upravovat pomocí PC [11].

3.4.2. Princip metody

Zdroj je umístěn před zkoumaný objekt a je mu umožněno emitovat záření. Toto záření prochází tělesem a na základě charakteristik použitých materiálů je různě zeslabováno. Hustota toku záření se mění s objemovou hmotností látky kterou prochází, jejím chemickým složením a tloušťkou. Míra zeslabení gama záření se projeví na zobrazovacím médiu. Z promítnutého obrazu je poté usuzováno umístění výztuže, či poruch betonu jako jsou dutiny, či praskliny. Ukázka zobrazení na radiografickém filmu je na obr. 9.



Obrázek 9: Zobrazení betonářské výztuže pomocí radiografického filmu [12].

Při vyhodnocení je třeba vzít v potaz princip metody. Získaný obraz je centrálním průmětem objektu na film, přičemž středem promítání je samotný zdroj. Obecně se ovšem nejedná o zdroj bodový, což se projeví tzv. geometrickou neostrostí [11]. Princip je zobrazen na obr. 10. Hodnota geometrické neostrosti se dá vyjádřit jako:

$$N = \frac{a_1}{a_2} O \quad (4)$$

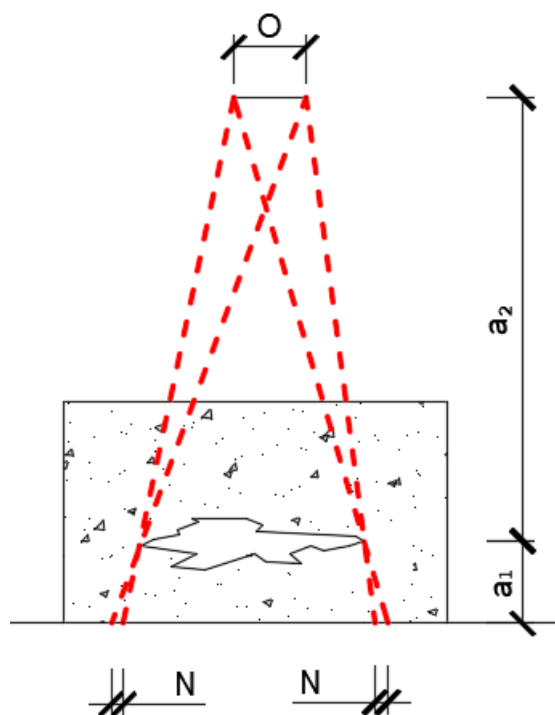
kde

N = hodnota geometrické neostrosti

a_1 = vzdálenost vady od filmu

a_2 = vzdálenost vady od ohniska

O = velikost zdroje



Obrázek 10: Princip vzniku geometrické neostrosti u prozařovaného objektu.

Mezi výhody radiografie patří možnost přesného zobrazení vnitřní struktury objektu, při vhodném zpracování lze určit i rozměry. Za nevýhody se dá považovat zdoluhavost měření, nutnost přístupu ke konstrukci z obou stran, zdravotní rizika spojená s měřením a s tím související náročná bezpečnostní opatření.

3.4.3. Využití metody

Pro běžné využití při diagnostice je radiografie velmi zdoluhavá metoda. V dnešní době je také její použití velmi limitováno předpisy. Metoda pracuje s nebezpečným zářením, které by mohlo člověka ohrozit na zdraví. Velké uplatnění ovšem nachází při speciálních požadavcích a projektech, díky možnostem, které dosud nenabízejí žádné jiné metody. Jedná se především o přesné zobrazení polohy výztuže včetně určení průměru, nebo precizní odhalení dutin.

3.5. Ultrazvuk

Ultrazvukem se rozumí akustické vlnění s frekvencí vyšší, než dokáže zaznamenat lidské ucho, tedy přibližně 20 kHz. Pro diagnostické metody ve stavebnictví se běžně používají frekvence 20–150 kHz, výjimečně hodnoty až 500 kHz. Tato metoda je běžně užívána pro určení kvality betonu a zjištění jeho mechanicko-fyzikálních charakteristik. Dá se ovšem využít i pro lokalizaci defektů a jejich popis.

V ultrazvukové defektoskopii se dají využít dvě metody vysílání:

Spojité vysílání vlnění – tato možnost se využívá například ve strojírenství, pro kontinuální testy materiálů či spojů. Ve stavebnictví se běžně nepoužívá.

Impulzové vysílání vlnění – budič vysílá krátké svazky mechanického kmitání. Tento typ signálu se využívá ve stavební diagnostice a je také jedinou možností při použití jen jedné sondy.

Metody můžeme také rozdělit podle počtu použitých sond:

Jedna sonda – slouží jako budič ultrazvukového vlnění, který se po vyslání impulzu přepne do přijímacího režimu a zachycuje odražený signál. Jedna sonda se používá například pro kontrolu materiálu ve strojírenství, jelikož se nehodí do nedostatečně homogenních materiálů, jako je beton. Také není vhodná pro tenké konstrukce [11].

Dvě sondy – jedna funguje jako vysílač vlnění do prostředí a druhá jako přijímač. Výhodou je různé umístění sond, které umožňuje měření skrze konstrukci, nebo v různé vzdálenosti na jedné ploše. Různé rozmístění bude popsáno podrobněji v následujícím odstavci.

Více sond – toto uspořádání používají moderní přístroje (například Pundit 250 Array od firmy Proceq na obr. 11). Jedná se často o jediné zařízení, které na sobě má osazeno velké množství sond, které se střídají ve funkci budič – snímač [8].



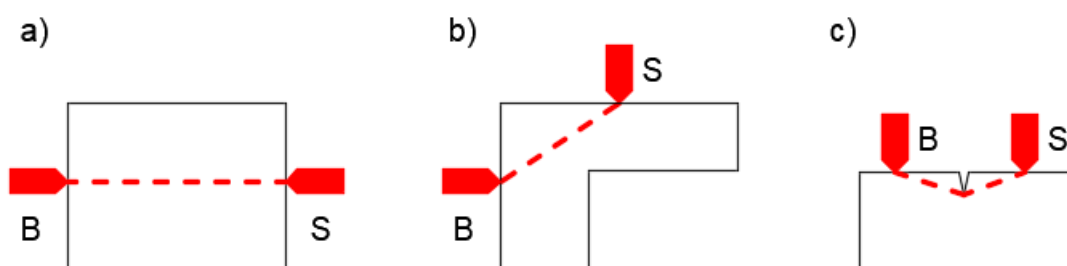
Obrázek 11: Příklad ultrazvukového přístroje s více sondami, zde konkrétně Pundit 250 Array od firmy Proceq s celkem 24 sondami [13].

Při užití dvou sond lze dosahovat různých výsledků měření různým umístěním budiče a snímače. Volba jejich polohy se odvíjí nejčastěji od tvaru konstrukce a její přístupnosti, případně od požadavků měření. Rozeznáváme následující způsoby prozvučování:

Protilehlé – budič se nachází na opačné straně konstrukce než přijímač. Obr. 12 a).

Boční – sondy jsou umístěny na sousedních stěnách, či na stěně a stropu. Obr. 12 b).

Povrchové – obě sondy se přikládají na stejnou plochu. Obr. 12 c).



Obrázek 12 Různé způsoby prozvučování konstrukce. B jako budič, S jako snímač. a) protilehlé b) boční přes roh c) povrchové přes trhlinu

Při ultrazvukové defektoskopii je stěžejní kvalitní přenos vlnění do zkoušeného materiálu a přesné měření času. Průchod vlnění z budiče do objektu je zprostředkován vazebným prostředkem, který je před měřením nanesen na povrch. Může se jednat o gely, plastelínu, či jiný materiál zabezpečující spojení s minimálním výskytem nehomogenit. Časový interval, který potřebuje vlnění pro průchod vazebným prostředkem se označuje jako „mrtvý čas“ t_{kor} . Je potřeba jej při měření odčítat od časů naměřených t_n , aby výsledkem byla skutečná hodnota, kterou se vlnění pohybuje zkoušeným tělesem, viz rovnice 5. Mrtvý čas se měří na dodávaném etalonu – tělese, u kterého je známý skutečný čas průchodu vlnění.

$$t = t_n - t_{kor} \quad (5)$$

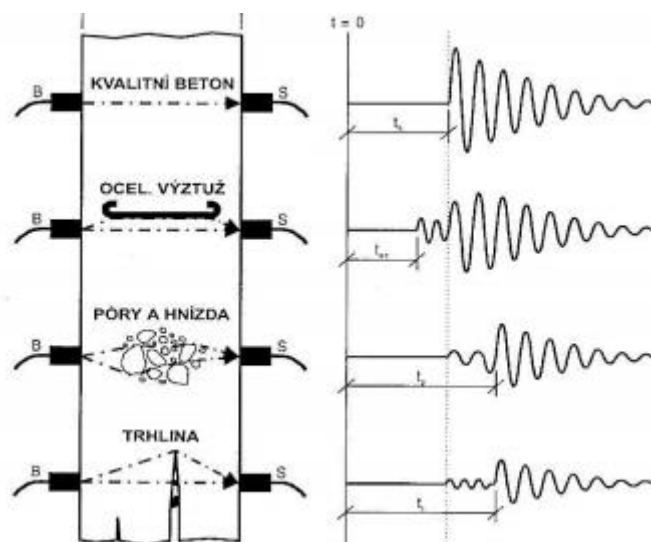
3.5.1. Průchodová ultrazvuková metoda

Průchodová metoda se využívá nejčastěji pro zkoušení jakosti materiálu, nebo zjišťování jeho mechanicko-fyzikálních charakteristik. Používají se dvě sondy a jakýkoliv typ prozvučování. Z budiče je vyslán signál, který projde materiálem a je zachycen snímačem, zároveň je změřen čas od vyslání po přijetí vlny. Od naměřeného času se odečte „mrtvý čas“, čímž se získá skutečný časový úsek t , který byl nezbytný pro překonání tloušťky materiálu L . Rychlost šíření ultrazvuku se pak vyjádří ze vztahu:

$$v = \frac{L}{t} \quad (6)$$

Obecně platí, že v kvalitnějších betonech je rychlost vyšší, zatím co u betonů nekvalitních, pórovitých, či poškozených bývá rychlost nižší. Kromě kvality betonu obecně lze z tvaru přijaté křivky usoudit přítomnost defektů, či výztuže. Příklady získaných tvarů ultrazvuku po průchodu betonem s poškozenou strukturou či s přítomností výztuže, jsou zobrazeny na obr. 13.

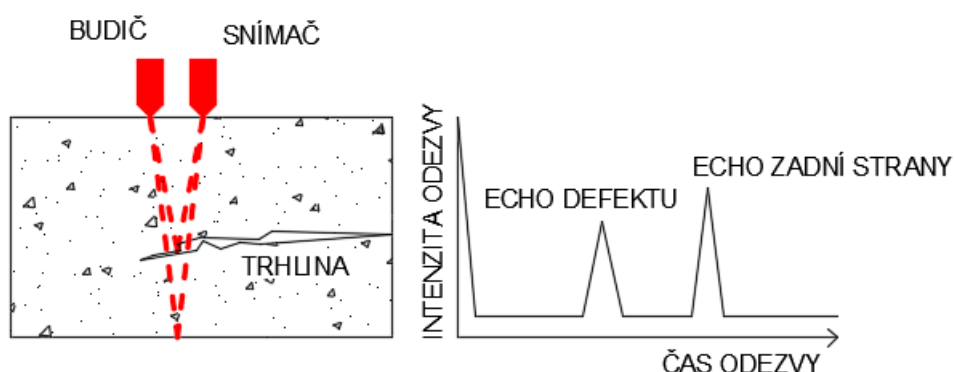
Přesnost měření se dá ovlivnit zvolenou frekvencí ultrazvuku. S vyššími frekvencemi roste jeho rozlišovací schopnost. Takové vlnění je ale při průchodu mnohem více tlumeno, takže se snižuje dosah měření [7].



Obrázek 13: Příklady tvaru přijaté křivky po průchodu různými poruchami [14].

3.5.2. Odrazová ultrazvuková metoda

Při odrazové metodě nezachytává snímač signál přímý, ale odražený. K odrazu vlnění přitom dochází na jakémkoliv rozhraní materiálů, například na rozhraní beton – vzduch. Díky této skutečnosti je metoda hojně využívána pro zkoušení tloušťky konstrukce, nebo pro zjišťování jejích defektů. Schéma šíření signálu při odrazové metodě je zobrazeno na obr. 14. Výstup ultrazvuku se liší podle zkoumaného defektu a pozice budiče a snímače. Viditelné může být pouze echo defektu, několikanásobné echo defektu, echo zadní strany, nebo jejich kombinace. Interpretace výsledků pak závisí především na zkušenostech diagnostika.



Obrázek 14: Ultrazvuková odrazová metoda při zjišťování trhliny v betonu a příklad možného čtení odezvy na zobrazovacím zařízení.

3.6. Georadar

Georadar je jedna z diagnostických nedestruktivních metod. Využívá šíření elektromagnetických impulzů prostředím a jejich odrazů od rozhraní materiálů. Vzhledem k nedávnému rychlému vývoji v oblasti softwaru i hardwaru se řadí k nejprogresivnějším defektoskopickým metodám [15]. V počátcích stavební diagnostiky byla metoda využívána pro lokalizaci potrubí, postupně se rozšířilo využití i na detekci dutin, určení tloušťky konstrukce, hledání prasklin a výztuže. V současné době se jedná o metodu s vysokou pestrostí využití [16].

3.6.1. Konstrukce radaru

Georadar vychází principiálně z radarů vyvinutých během války pro lokalizaci letounů, proto má i obdobnou konstrukci. Obecně se skládá z anténního systému – vysílače, přijímače, dále počítače pro zpracování signálu, zobrazovací jednotky a dalších doplňujících systémů pro uložení, či jiné upravení naměřených dat. Pokud má radar jedinou anténu, sloužící pro vysílání i přijímání signálu, jedná se o monostatickou konstrukci. V opačném případě se hovoří o konstrukci bistatické. Dále lze radary rozdělit dle způsobu šíření vlnění na zařízení impulzní, nebo se stálou vlnou. Georadary jsou běžně monostatické s impulzním vysíláním.

3.6.2. Princip georadaru

Anténa vysílá do zkoumaného prostředí – v diagnostice nejčastěji betonu, krátké svazky elektromagnetického vlnění. Tyto svazky, jinak nazývané též impulzy, trvají obvykle jen několik nanosekund. Frekvence vlnění využívaného georadary pro průzkum betonů se běžně pohybuje od 500 MHz do 3 GHz. Na rozhraní materiálů s různými elektrickými a magnetickými vlastnostmi se část energie impulzu odrazí a druhá část postupuje následujícím materiálem, kde může docházet k dalším odrazům. Mezi fyzikální veličiny ovlivňující šíření elektromagnetického vlnění patří permitivita prostředí, vodivost a magnetická permeabilita. Vracející se impulzy anténa zachytí a následuje jejich počítačové zpracování a zobrazení.

Odhalení jistých znaků a závislostí je klíčové ke správné interpretaci výsledků. Mezi tyto znaky patří čas zachycení signálu od vyslání vlny, jeho polarita, zeslabení a tvar radogramů. Vyvodit se dají rychlosti šíření vlnění prostředím a s nimi související charakteristiky betonu, dále pak informace o vnitřních

rozhraní s jinými materiály, ze kterých plyne například poloha výztuže, či typ poruchy struktury betonu [15].

Síla odrazu – u elektromagnetického vlnění dochází na rozhraní materiálů s různými relativními permitivitami k částečnému odrazu. Hodnota odražené energie je závislá na rozdílu těchto materiálových konstant. Koeficient odrazu R vyjadřuje „odrazivost“ rozhraní materiálů, vyjádřit jej můžeme jako:

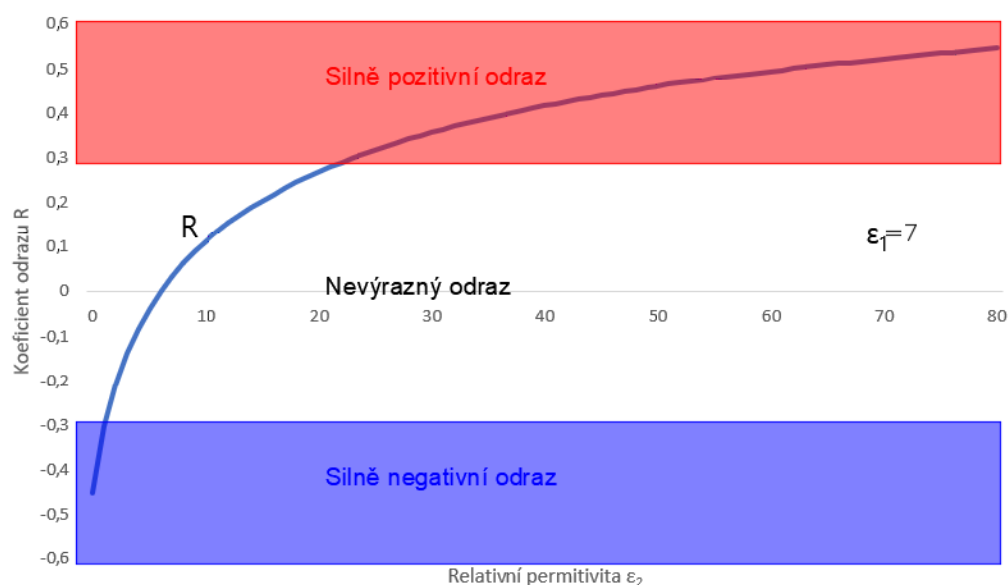
$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}} \quad (7)$$

kde:

ε_1 = relativní permitivita vrstvy 1

ε_2 = relativní permitivita vrstvy 2

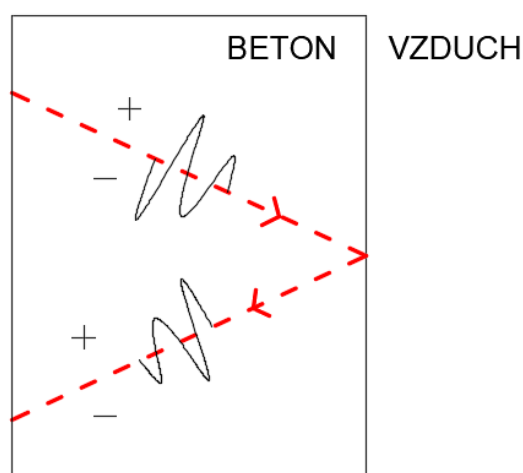
Čím je rozdíl těchto hodnot větší, tím větší část energie je na rozhraní odražena. Typická hodnota relativní permitivity pro beton je uváděna 7. Na obr. 15 jsou zobrazeny hodnoty koeficientu R v závislosti na různých hodnotách relativní permitivity ε_2 (vodorovná osa). Z grafu je patrné, že u materiálů s podobnou relativní permitivitou jako beton (např. písk $\varepsilon = 5$), je koeficient R blízký nule. Na takovém rozhraní je pak odraz vlnění velmi malý a georadarem téměř neregistrovatelný. Oproti tomu materiály s relativní permitivitou blíží se 1, nebo vyšší než 20 budou v betonu georadarem velmi dobře rozpoznatelné [15].



Obrázek 15: Závislost koeficientu R při průchodu vlnění z betonu do jiného materiálu na relativní permitivitě tohoto materiálu. Převzato a upraveno z [15].

Relativní permitivitou rozumíme podíl permitivity daného materiálu ku permitivitě vakua, přičemž samotná permitivita materiálu vyjadřuje míru odporu, vůči vytváření elektrického pole.

Polarita odrazu – v závislosti na hodnotě koeficientu R se jedná o pozitivní, či negativní odraz. Je-li koeficient záporný, dojde na rozhraní materiálů ke změně polarizace vlny. Průběh je patrný na obr. 16. K tomuto jevu dojde, pokud je relativní permitivita první vrstvy větší než vrstvy druhé. Jako příklad můžeme uvést vlnu šířící se z betonu ($\epsilon = 7$) do kaverny naplněné vzduchem ($\epsilon = 1$). Naopak kladná polarita nastane při šíření z betonu ($\epsilon = 7$) do kaverny naplněné vodou ($\epsilon = 81$).



Obrázek 16: Změna polarizace vlny na rozhraní beton – vzduch. U odražené části vlnění došlo ke změně polarizace.

Čas – vlnění vycházející z antény trvá čas t , než projde materiálem o tloušťce d , odrazí se na rozhraní a je opět zachyceno anténou. Známe-li tloušťku konstrukce, například u kalibračního vzorku, můžeme vyvodit rychlost šíření vlnění betonem z rovnice:

$$v = \frac{2d}{t} \quad (8)$$

V nekovových materiálech lze rychlost šíření vlny vyjádřit také vztahem:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (9)$$

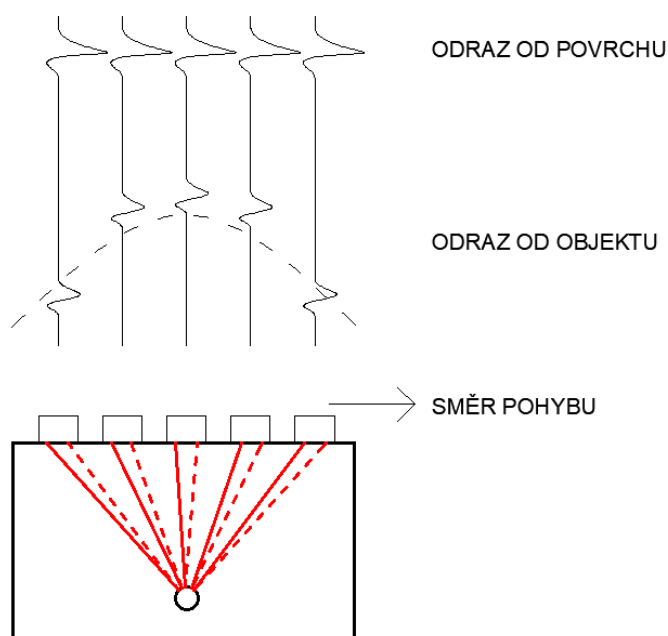
Kde:

c = rychlost šíření světla ve vakuu

ϵ = relativní permitivita daného prostředí

Ze vztahů 8 a 9 lze poté vyjádřit a vyčíslit hodnotu relativní permitivity materiálu, známe-li čas průchodu vlnění. Není-li možnost kalibrace na vzorku, berou se obvykle tabelární hodnoty permitivit. Naopak známe-li rychlost šíření betonem, můžeme ze vztahu 8 snadno vyjádřit vzorec pro tloušťku konstrukce [15].

Tvar odrazu – ze zdroje se vlnění šíří v rozptylovém úhlu 60-90°. Při přibližování k dutině, či výztuži ležící kolmo k rovině skenování, se vzdálenost, kterou urazí odražený impuls zkracuje. Díky tomu vzniká část hyperboly, přímo nad objektem se vykreslí její vrchol a při vzdalování se dráha opět prodlužuje, čímž vznikne druhá část hyperboly [15]. Vznik tvaru hyperboly při liniovém skenu je naznačen na obr. 17. Naopak rozhraní, která leží souběžně se směrem skenování, se zobrazí jako linie.

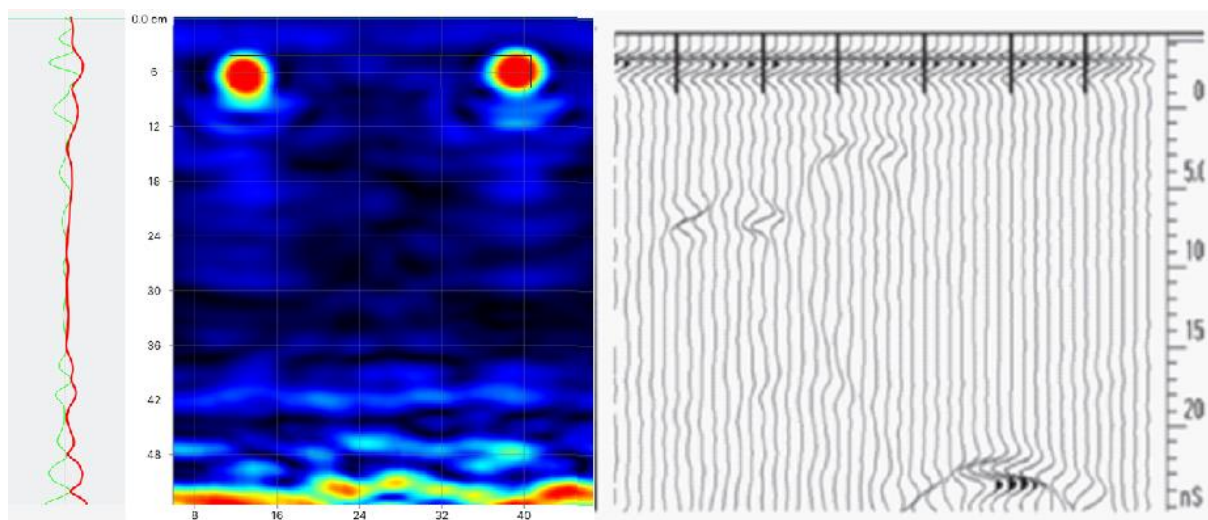


Obrázek 17: Vznik hyperboly při liniovém skenování. Při pohybu se radar od objektu vzdaluje, čímž se prodlužuje dráha kterou musí impuls urazit, při zobrazení se tak vytváří charakteristický tvar.

3.6.3. Výstupní data

Odražená vlna je zaregistrována anténou a zpracována počítačovou jednotkou. Výstup pro uživatele může mít mnoho podob. Jedna z možností je například zobrazení samotného průběhu vlny, to je patrné na obr. 18 vlevo, jedná se o tzv. A scan. Svislá osa přitom může reprezentovat čas, nebo po přepočtu hloubku v konstrukci. Při liniovém skenu lze z naměřených hodnot vykreslit plošný

graf – radogram. Svislá osa připadá opět času, respektive hloubce, vodorovná pak odpovídá vzdálenosti na skenovanému povrchu objektu. Takové zobrazení se nazývá B scan. Příklad je na obr. 18 uprostřed. Kombinací těchto přístupů lze získat „Wiggle plot“ – plošný graf, do nějž je po pevně daných intervalech vynáší jednotlivé průběhy vln [16]. Zobrazen je na obr. 18 vpravo.



Obrázek 18: Typy zobrazení naměřených dat – zleva: A scan, B scan, Wiggle plot. Wiggle plot převzat z [16].

S rozvojem technologií se vyvíjejí i zobrazovací metody, mimo liniové skeny se ve velké míře uplatňují skeny plošné. Zobrazit lze díky nim řezy v libovolné rovině, ale i 3D pohled do konstrukce. Vyhodnocení a čtení dat přitom probíhá buď na PC, po stažení dat z georadaru, nebo během diagnostiky na zobrazovacím zařízení radaru – monitoru přímo na zařízení, nebo na jiném médiu připojeném kabelem, či i bezdrátově. V poslední době se experimentuje i s atraktivními moderními technologiemi, například rozšířenou realitou – pomocí tabletu připojeného na naměřená data z radaru si může diagnostik prohlížet „vnitřní strukturu“ přímo na místě.

3.6.4. Výhody, limity

Klasické radary mají v diagnostice velmi dobré postavení, díky celé řadě výhod. Pro porovnání s ostatními metodami je jich dobré několik zmínit. Georadar je velmi rychlá metoda – na měření je potřeba minimální příprava, pomocí liniových skenů se dá naměřit mnohametrový prvek za několik minut. Oproti

metodám, které využívají tlakových vln, má georadar dobrou prostupnost vzduchem. Elektromagnetické vlnění se sice na rozhraní beton – vzduch odráží, nikoliv ovšem v tak velké míře jako vlny tlakové. V praxi to znamená, že lze odhalit defekty například i za rozsáhlou delaminací. Vzhledem k různým elektromagnetickým vlastnostem je tato metoda citlivá i na vlhkost v betonu, přítomnost chloridů, či většího množství pórů. Jako každý přístroj, i georadar má své limity a nevýhody. Vzhledem k vysoké relativní permitivitě klasické betonářské výztuže u ní dochází k téměř totálnímu odrazu vlnění. V důsledku toho je registrace poruch pod výztuží velmi obtížná, někdy i nemožná. Zvláště při malé osové vzdálenosti výztuží, při které dochází ke slučování jednotlivých odrazových hyperbol. Díky malému odrazu energie na rozhraní se vzduchem může být problematické nalezení prasklin, či menších dutin. V takovém případě je výhodnější, jsou-li defekty vyplněny vodou. Jako u většiny metod, i u radaru záleží ve velké míře na zkušenostech diagnostika. Jako poslední bod je třeba zmínit dosah radaru. Přístroj Hilti PS 1000 X-Scan uvádí maximální hloubku pro detekci objektů pod povrchem 30 cm. Záleží přitom na vlastnostech betonu a frekvenci vysílaného vlnění. Obecně lze říct, že s vyšší frekvencí roste rozlišovací schopnost radaru, klesá ovšem jeho dosah. Ideální by bylo měřit každý objekt více frekvencemi, aby bylo dosaženo obojího – vysoké přesnosti měření s dostatečnou hloubkou skenu. Vyřešení tohoto nedostatku by mohlo vyřešit vícefrekvenční skenování.

3.6.5. Multifrekvenční georadary

Pro odstranění limitu nedostatečné přesnosti při velkém dosahu a naopak, lze využít skenování s více frekvencemi. Běžný georadar vysílá krátké impulzy vlnění, čím je impulz kratší, tím ostřejší je výsledný scan. Multifrekvenční georadary využívají naopak spojitě vlnění s velkým množstvím frkevencí. Přechod mezi frekvencemi přitom může být dynamický, nebo skokový. Jedna z metod je „SFCW“, neboli „Stepped Frequency Continuous Wave“. Jedná se tedy o spojitou vlnu se skokovou změnou frekvence. U nového přístroje Proceq GP8000 Live se např. frekvenční rozmezí pohybuje mezi 0,2 – 4,0 GHz. Nižší a vyšší frekvence jsou možné, ale u betonu byly vyloučeny pro zanášené chyby [17]. Díky více frekvencím by mělo dojít k částečnému odstranění nevýhody radaru popsané výše a georadar by se měl stát univerzálnějším, s ostřejšími výsledky.

4. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Cílem experimentálního měření bylo především otestovat možnosti nového georadaru od firmy Proceq – GP8000. K tomuto účelu se nejlépe hodilo využití masivních betonových bloků, vyrobených v roce 2007 pro potřeby Ústavu stavebního zkušebnictví. Dále byl přístroj použit na reálný mostní objekt v Brně, na mimoúrovňové křižovatce ulic Ostravská a Bělohorská.

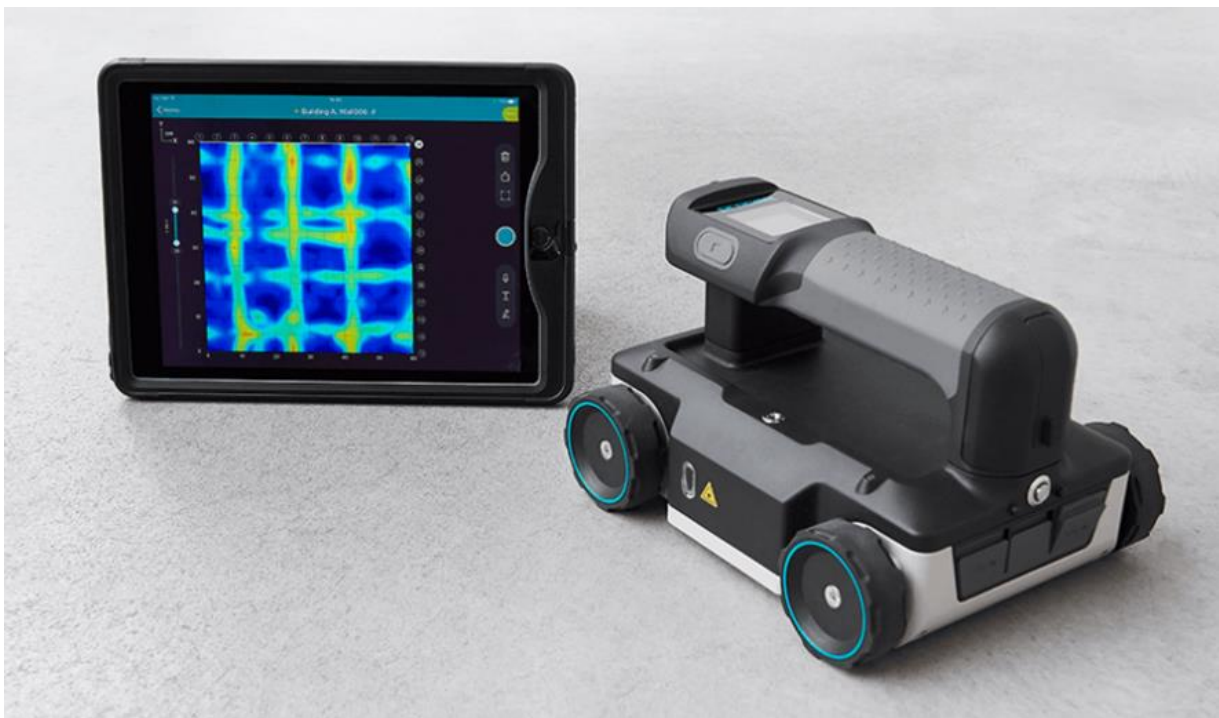
4.1. Přístroje

Při experimentálním měření bylo použito relativně nové vybavení – Proceq GP8000. Pro srovnání technologického vybavení byla naměřená data porovnána s výstupy přístroje Hilti PS 1000 X-Scan. U zkušebního bloku se zachovala pečlivě popsaná dokumentace jeho výroby, výsledky se tak mohly porovnat se skutečným provedením bloku. Pro upřesnění bylo provedeno i několik jádrových vývrtů. U mostního objektu proběhlo vzájemné srovnání výsledků z obou přístrojů, stejně jako porovnání s dostupnými daty o konstrukci.

4.1.1. Proceq GP8000

Tento georadar byl představen v roce 2017 firmou Proceq. Velký technologický posun slibuje nejen ve schopnosti rozpoznat vnitřní strukturu betonu i v obtížných podmínkách, ale i v jednoduchosti ovládání, či zpracování naměřených dat. Převrat v pohledu do nitra betonu má zajistit patentovaná technologie „Stepped-Frequency Continuous-Wave“. Velký důraz značka klade i na vizuální stránku a moderní design. Výsledkem je tak relativně lehký přístroj, s laserovým naváděním pro přesnější vedení při skenování a celou škálou možností zobrazení naměřených dat. Mezi ty patří běžné plošné skeny, jejich řezy a A-scany, zobrazení ve 3D, nebo třeba v rozšířené realitě.

Uživatelské rozhraní: Na obr. 19 je zobrazen georadar zároveň se zobrazovacím zařízením, iPadem od firmy Apple. Přístroje jsou spolu spárovány pomocí Wi-Fi připojení. Veškeré naměřené údaje se přenášejí v reálném čase z georadaru a promítají se na obrazovce iPadu. Data je tak možné zpracovávat při samotném měření (např. přidávat popisky k jednotlivým odrazovým hyperbolám), nebo i po ukončení – např. po jejich stažení na jiné médium. Zpětně je možné zobrazit jednotlivé A-scany (scan jednoho bodu-průběh vlny), B-scany (liniové scany), ale i celkové plošné skeny včetně zobrazení v rozšířené realitě.



Obrázek 19: Proceq GP8000 se zobrazovacím zařízením (Apple iPad) [18].

Technologické řešení: Nejvýraznější změnou oproti doposud běžně využívaným georadarům je využití více frekvencí při jediném měření. Proceq GP8000 využívá frekvence v rozmezí od 0,2 do 4 GHz, což by mělo zajistit jak přesnou detekci objektů v menších hloubkách, tak alespoň informativní zobrazení objektů ve větších hloubkách. Jak bylo zmíněno výše, s vyšší frekvencí roste rozlišovací schopnost, ale klesá dosah radaru. Princip je zobrazen na obr. 20. Frekvence klesá směrem doprava a zároveň se zvětšuje hloubka dosahu a velikost detekovatelného objektu. Hloubka ani objekty zde nejsou číselně popsány, jelikož záleží ve velké míře na konkrétních podmínkách při měření. Vlastnostech betonu, materiálu předmětu, či tvaru diskontinuity. Elektrickou energii zajišťuje přístroji osm AA baterií, které jsou kdekoli běžně dostupné.



Obrázek 20: Důvod využití více frekvencí u georadaru - se snižující se frekvencí roste dosah radaru, ovšem klesá rozlišovací schopnost [18].

4.1.2. Hilti PS 1000 X-Scan

Jedná se o georadar, vyvinutý přímo pro diagnostiku železobetonových konstrukcí. V době svého představení, tedy v roce 2012, se jednalo o revoluční technologii a velký posun. Jedná se o klasický impulzní georadar.



Obrázek 21: Georadar Hilti PS 1000 X-Scan, zobrazovací zařízení je umístěno přímo na konstrukci radaru [19].

Uživatelské rozhraní: Na obr. 21 je zobrazen georadar Hilti PS 1000 X-scan. Oproti radaru od firmy Proceq má monitor pro zobrazování výsledků v reálném čase umístěn přímo na své konstrukci. Data se po dokončení měření dají zobrazovat jak

na přístroji, tak stažená na PC – zde se upravují v dodávaném softwaru. Zobrazit jde jak plošné scany, tak i dílčí B scany, či A scany. Také je možné naměřená data promítnout ve 3D. Připojení k radaru je zajištěno kabelem, přístroj váží přibližně 3 kg. Energii zajišťuje radaru vyměnitelný akumulátor s dobou výdrže maximálně čtyři hodiny [19].

Technologické řešení: Jedná se o georadar s impulzním vysíláním. Střední hodnota vysílané frekvence je 2,0 GHz, rozsah frekvencí se pohybuje od 1 GHz do 4,3 GHz. Radar obsahuje 3 antény a umožňuje tři módy skenování. Jedná se o „Imagescan“, který umožňuje skenování ploch, nebo o „Quickscan“, pro skenování linií. Ten může být s možností uložení dat, nebo jen pro rychlou lokalizaci vnitřní nehomogenity. Skenovaná plocha přitom může mít rozměry 600 x 600 cm, nebo 1200 x 1200 cm. Rychlost pohybu a ujetou dráhu při měření detekují postranní kolečka.

4.2. Betonový blok v areálu Fakulty stavební

4.2.1. Popis bloku

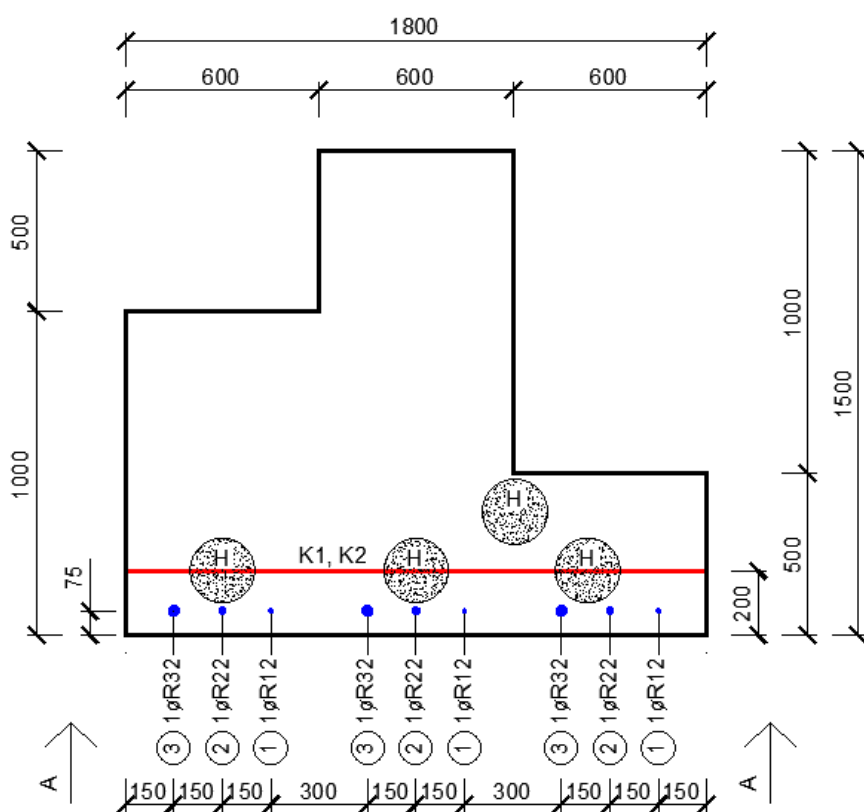
V roce 2007 byly vyrobeny dva betonové bloky pro potřeby Ústavu stavebního zkušebnictví. Do bloku 2 byly při výrobě umístěny pruty ocelové výztuže různých průměrů, simulace kabelu předpínací výztuže a simulace štěrkových hnízd.

Ocelová výztuž: Do bloku byly umístěny 3 sady výztuží, vzdálené od sebe 300 mm, každá sada obsahovala 3 různé pruty. Osová vzdálenost prutů byla 150 mm. V každé sadě byla výztuž (1) o průměru 12 mm, výztuž (2) o průměru 22 mm a výztuž (3) o průměru 32 mm. V půdoryse (obr. 22) a čelním pohledu (obr. 23) je betonářská výztuž vyznačena modře.

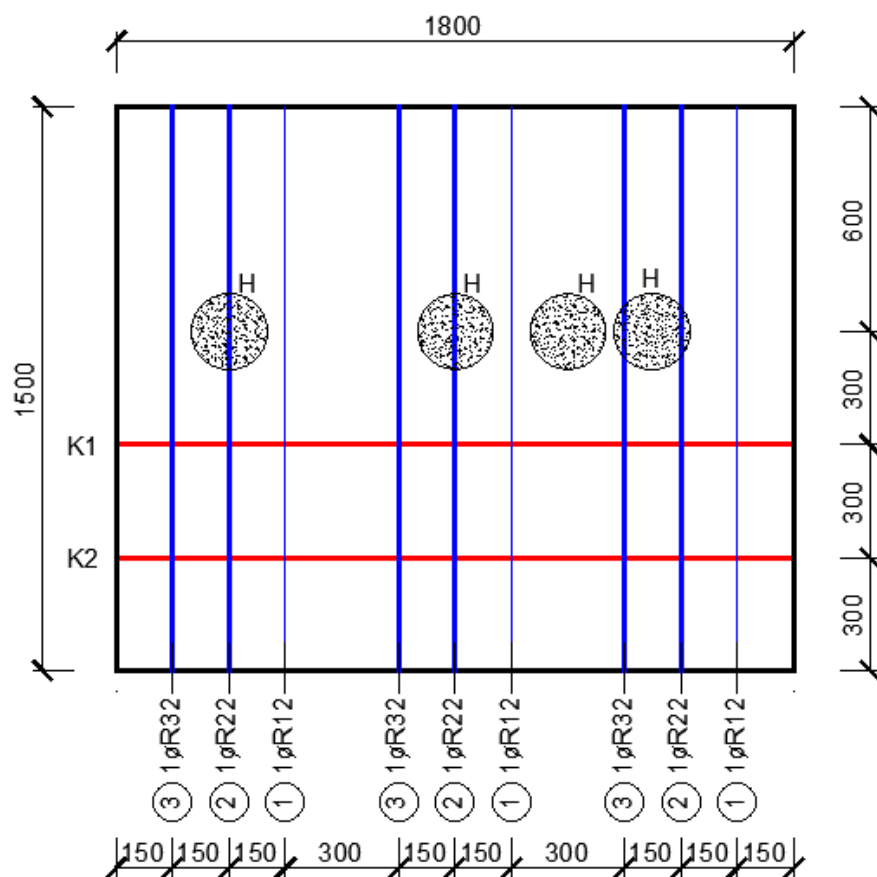
Simulace kabelů předpínací výztuže: V bloku se nacházejí dvě simulace předpínacích kabelů v plastových chráničkách, každý je složen z jednoho sedmidrátového lana. První kabel označený K2 je navázán na betonářskou výztuž 300 mm od spodní hrany bloku. Tato chránička by měla být vyplněna cementovým tmelem. Druhý kabel, označený K1 je navázán na betonářskou výztuž 600 mm od spodní hrany bloku a měl by simulovat nezainjektovanou chráničku. V půdoryse a čelním pohledu jsou simulace předpínacích kabelů označeny červeně.

Štěrková hnízda: Za každou sérií výztuží se nachází simulace štěrkového hnízda. Jedná se o kamenivo hrubé frakce zabalené do sítě. Navázané na betonářskou výztuž jsou v úrovni 600 mm od horní hrany bloku. Čtvrté štěrkové hnízdo bylo umístěno k lici zadní stěny pravé části bloku, mezi sérií výztuží. V půdoryse a čelním pohledu jsou štěrková hnízda označena černě a písmeny H.

Pohled na vnitřní strukturu bloku je na obr. 22. Svislé jsou pruty betonářské výztuže, vodorovně jsou na nich navázány simulace kanálků s předpínacími lany. Štěrková hnízda byla navazována až v průběhu betonáže a proto zde nejsou vidět.



Obrázek 22: Půdorys měřeného bloku 2. Modře jsou vyznačeny betonářské výztuže, červeně simulace předpínací výztuže a černě simulace štěrkových hnízd. Při provedení byly kanálky navázány na svislou výztuž.



Obrázek 23: Čelní pohled (pohled A) na měřený blok 2.



Obrázek 24: Pohled do vnitřní struktury betonového bloku 2. Svislá je betonářská výztuž různých průměrů, vodorovné simulace kanálků pro předpínací lana. Štěrková hnízda ještě nejsou navázána.

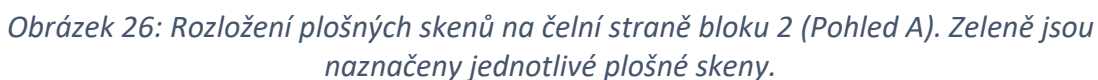


Obrázek 25: Pohled na blok 2 umístěný v areálu Fakulty stavební s mřížkou pro plošný sken georadarem.

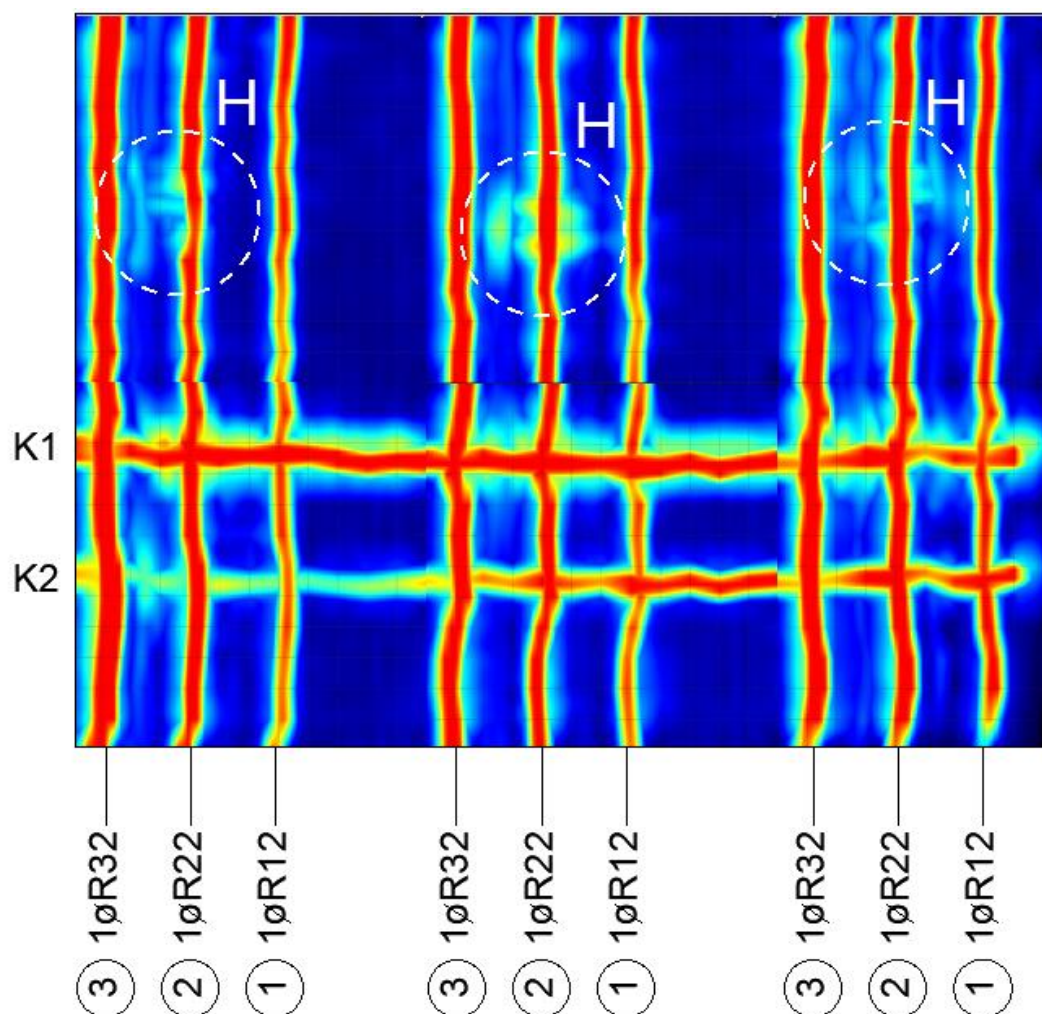
4.2.2. Měření georadarem Proceq GP8000

Na bloku 2 bylo provedeno několik měření – plošný sken z čelního pohledu (pohled A), čtyři vodorovné liniové skeny – 30, 40, 50 a 60 cm od horního okraje bloku a čtyři svislé liniové skeny – 20, 40, 50 a 130 cm od levého okraje bloku. Data byla zpracována na místě pomocí bezdrátově připojeného iPadu s dodaným softwarem.

Plošný sken (pohled A): Cílem měření bylo odhalit svislé betonářské výztuže, předpínací výztuže (nezainjektovanou i zainjektovanou) a v ideálním případě i tři štěrková hnízda umístěná za svislými výztužemi. Provedlo se celkem šest plošných skenů, které na sebe plynule navazovaly. Základní použitý rastr byl čtverec o rozměrech 60 x 60 cm, přičemž linie skenu se posouvala vždy po 5 cm. První plošný sken byl umístěn 10 cm od levé hrany bloku a 15 cm od horní hrany bloku z důvodu jednoduššího provádění. Boční skeny 3 a 6 proto nemají základní tvar čtverce, ale jsou zkráceny na obdélník. Schéma rozložení plošných skenů je na obr. 26.

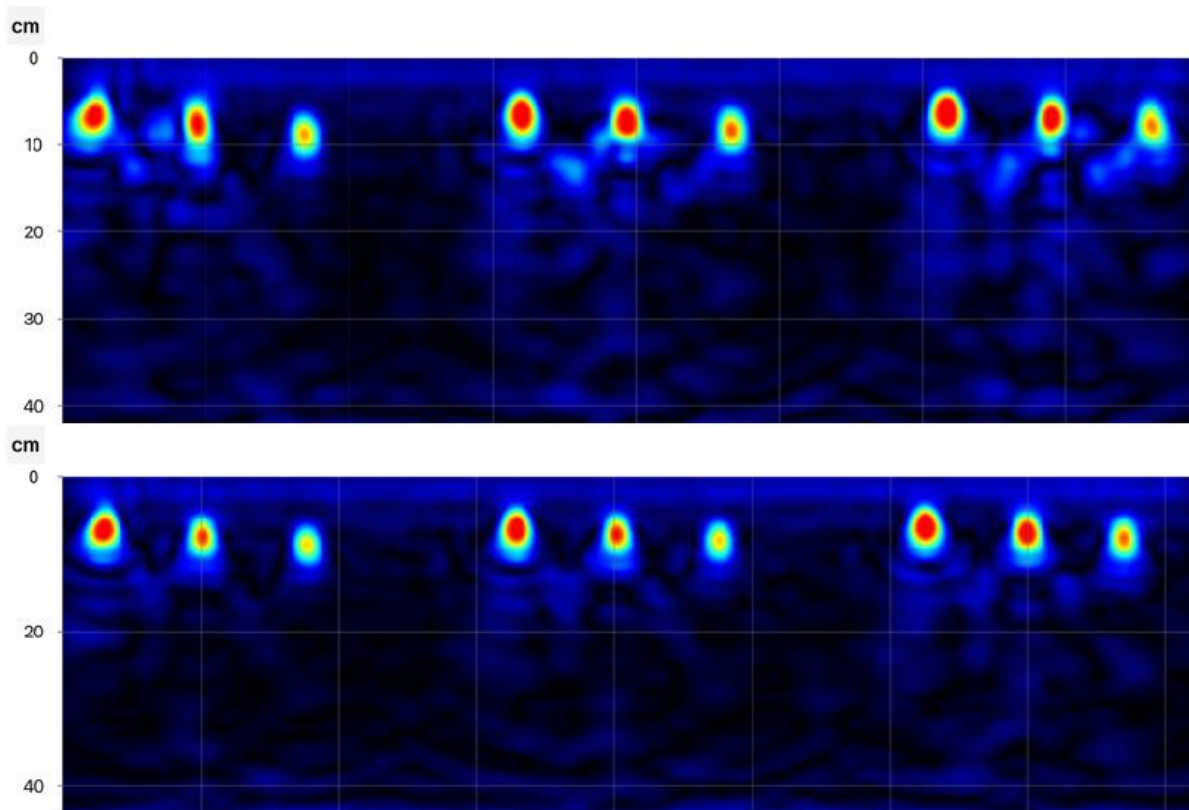


Velmi výrazný je nezainjektovaný kanálek, označený jako K1, nacházející se za výztuží. Kanálek K2, vyplněný cementovým tmelem, je v pravé části stejně výrazný jako kanálek K1. Poukazuje to na možnost, že simulace injektáže nemusela být provedena dostatečně kvalitně. Pokud by měl kanálek v této části například vzduchové bubliny, odrážel by elektromagnetické vlnění lépe než kanálek s tmelem a výztuží. V levé části kanálku K2 nedošlo k natolik výrazné reflexi vlnění, přesto je zde jasně patrná trajektorie kanálku. Pro upřesnění výsledků byly provedeny jádrové vývrty skrze kanálky.



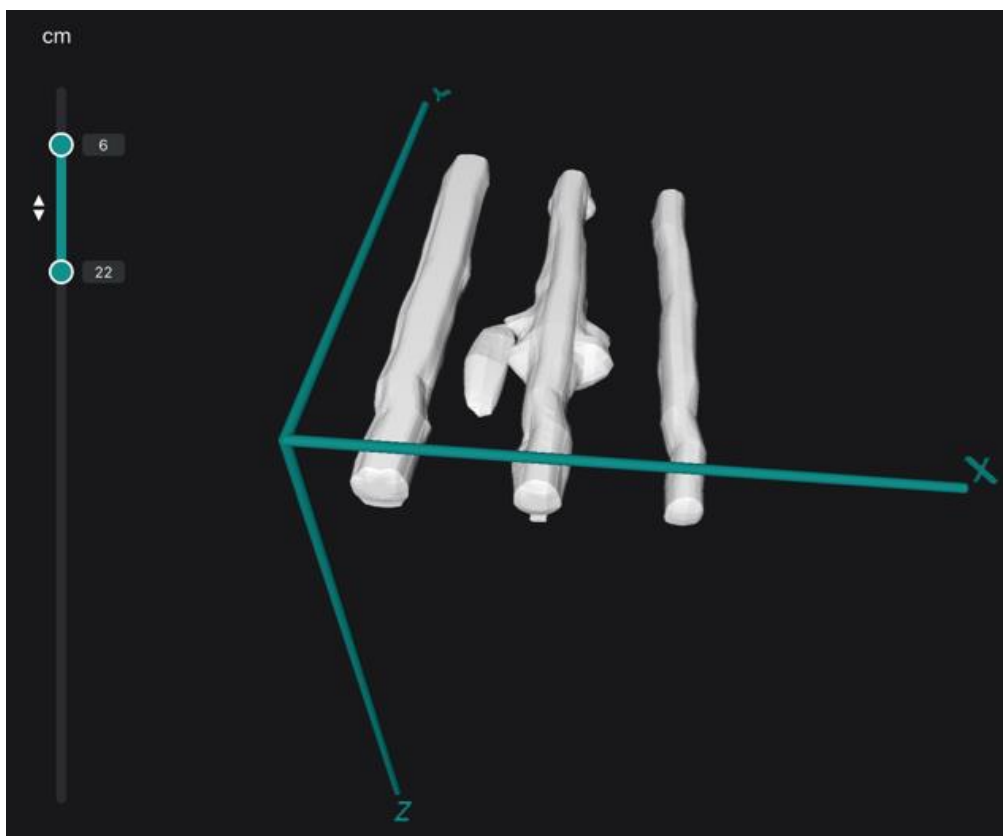
Obrázek 27: Výsledný pohled A, složený ze šesti dílčích plošných skenů. Jsou patrné svislé betonářské výztuže různých průměrů, vodorovné simulace předpínacích kabelů i štěrková hnízda ukrytá za betonářskou výztuží.

Štěrková hnízda byla umístěna přímo za vrstvou výztuže, v hloubce minimálně 80 mm. Obecně jsou objekty za vrstvou výztuže špatně rozeznatelné, jelikož kov odráží téměř veškeré elektromagnetické vlnění. Nejvýrazněji je rozlišitelné hnízdo za prostřední sérií výztuží. Krajní mají reflexi velmi slabou a bez znalosti jejich umístění by se dala lehce přehlédnout. Čtvrté hnízdo, nacházející se v hloubce 300–400 mm zaznamenáno nebylo. Na obr. 28 je porovnání liniových skenů nad hnízdy a v oblasti kvalitního betonu. V horní části je zobrazen sken, který byl proveden 500 mm od horní hrany bloku – v úrovni štěrkových hnízd. Ve spodní části je liniový sken 300 mm od horní hrany bloku, tedy v oblasti bez vad. V úrovni výztuže a její blízkosti jsou patrné reflexe vlnění od nehomogenit, ve větší hloubce dochází k zastínění výztuží a rozdíl je již minimální.

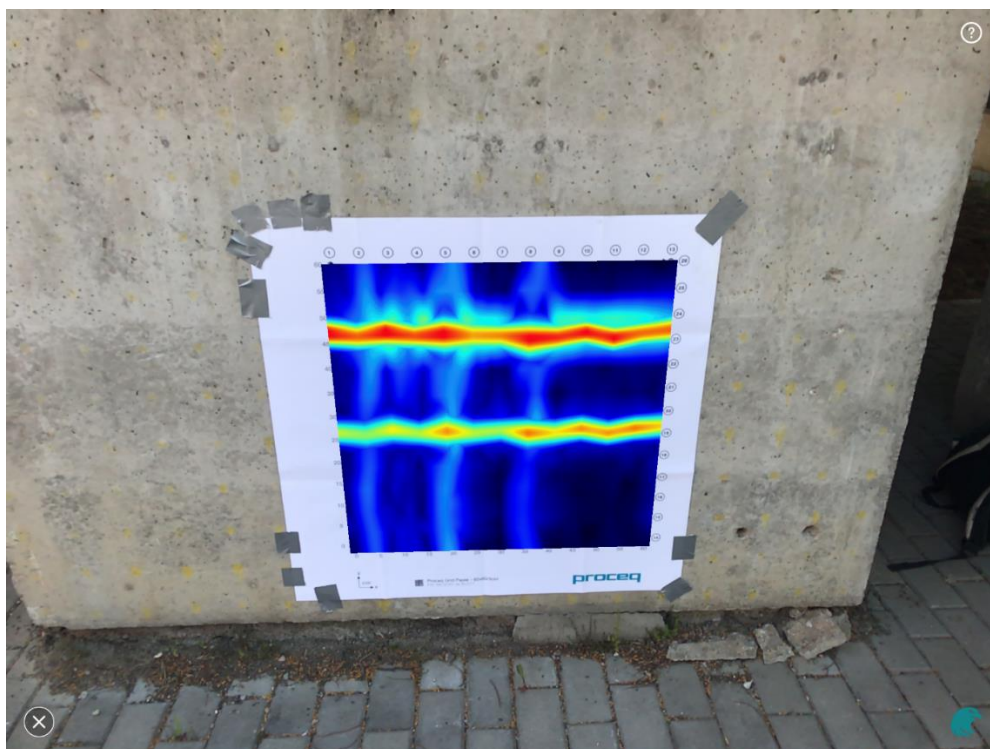


Obrázek 28: V horní části liniový sken v úrovni štěrkových hnízd. Spodní liniový sken je v úrovni betonu bez vad.

Proceq GP8000 nabízí celou řadu zobrazení na připojeném iPad zařízení, pro různé aplikace a problémy se hodí různá zobrazení. Pro určení hloubky je vhodný B scan. Pro zobrazení nehomogenity nebo výztuže s cílem určení tvaru je vhodné 3D zobrazení a to buď na zobrazovacím prostředku, nebo v módu rozšířené reality. Na obr. 29 je 3D zobrazení plošného skenu 2. Viditelné jsou tři pruty výztuže a náznak štěrkového hnízda. Určit průměr výztuží není možné, jelikož nastavení zobrazení je ve velké míře ovlivněno uživatelem a jeho cítem pro zvýraznění problému. 3D pohled je možné jakkoliv natáčet a přibližovat. Důležité je nastavení zobrazení množství hmoty, tedy citlivosti na intenzitu odrazu vlnění. Štěrkové hnízdo je patrné, není ale zobrazeno do hloubky. S větším množstvím zobrazené hmoty hnízdo vynikne více, objekty se ovšem začnou „slévat“ a přestávají být rozpoznatelné. Pro dobrý popis nehomogenity je proto vhodné kombinovat více přístupů a zobrazení.



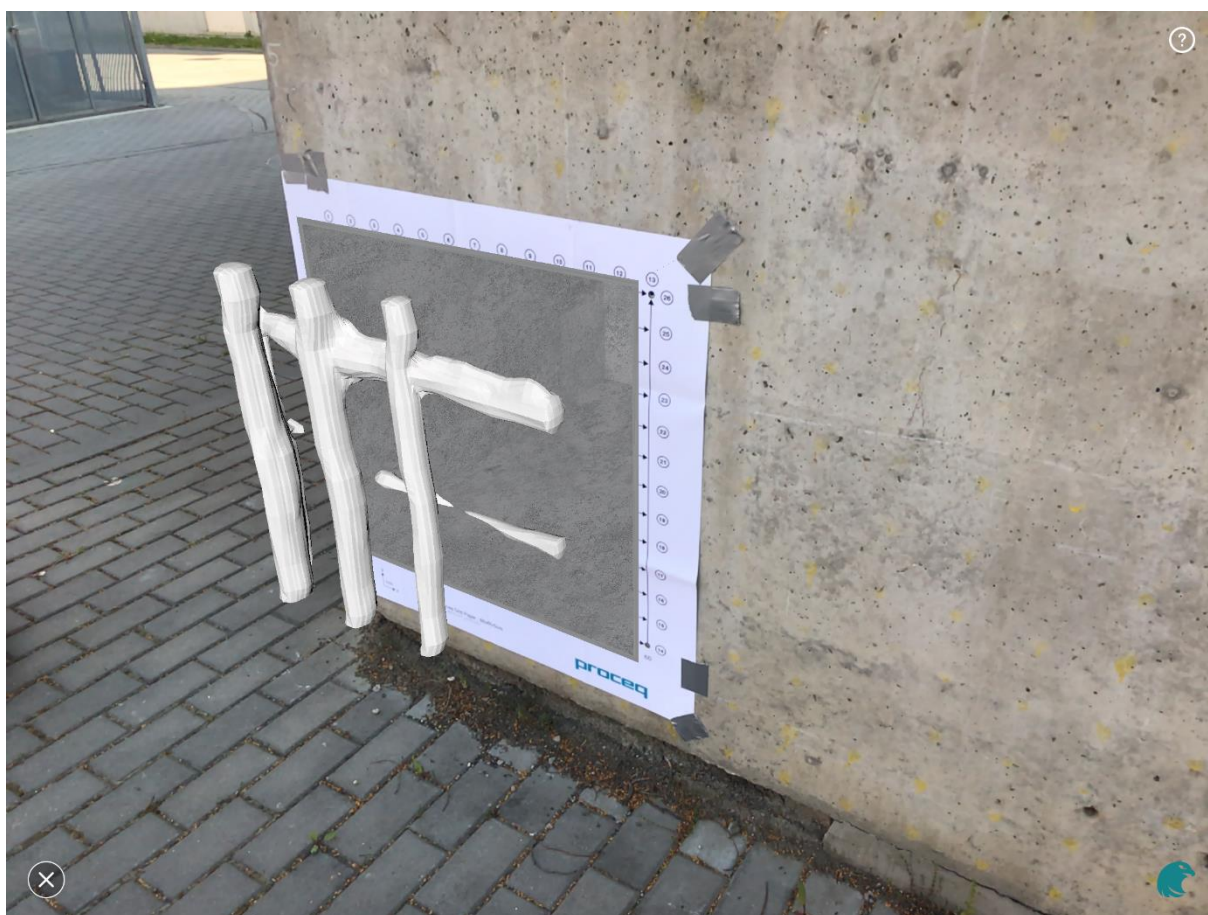
Obrázek 29: 3D zobrazení prvního plošného skenu. Patrný je relativní rozdíl v průměrech výztuže a náznak šterkového hnízda.



Obrázek 30: Mód rozšířené reality promítá na blok naměřená data, zde dvě vodorovné simulace předpínací výztuže.

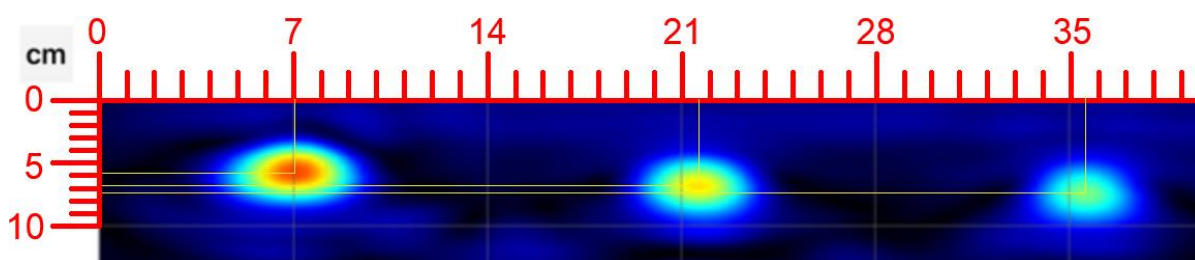
Na příkladu plošného skenu je možné prezentovat zřejmě nejsilnější stránku přístroje Proceq GP8000 – grafické zobrazení a jednoduchost ovládání. Na obr. 30 lze vidět mód rozšířené reality – spárovaný iPad zobrazuje přímo na blok naměřené výsledky, v tomto případě plošný sken č. 5 se zvýrazněním hloubky podélných simulací předpínací výztuže.

Další možností využití rozšířené reality je kombinace výše zmíněných zobrazení. 3D pohled se pomocí spárovaného iPadu zobrazí na zkoumaný objekt. Pohled je ovlivněn přímo posouváním a natáčením zařízení, které je fixováno k referenčním bodům na měřicím rastru. Vnitřní struktura se dá objektu „vysouvat“ pro lepší viditelnost. Stejně jako u běžného 3D zobrazení je možné měnit množství zobrazované hmoty. Příklad zobrazení je na obr. 31. Jedná se o screenshot z iPadu. Vyobrazen je čtvrtý plošný sken. Patrné jsou svislé betonářské výztuže různých průměrů a kanálky s předpínacími lany. Vnitřní struktura je částečně vytažena před měřený blok.



Obrázek 31: 3D zobrazení v rozšířené realitě na iPadu. Jedná se o čtvrtý plošný sken se svislou výztuží a vodorovnými kanálky s předpínacími lany.

Z jednotlivých plošných skenů lze získat i dílčí B scany (jednotlivé linie skenu georadaru), či A scany (konkrétní body měření a průběh vlny v daném místě). Příklad B scanu je na obr. 32. Jedná se o vodorovný pojezd ve třetím plošném skenu. Zobrazeny jsou tři svislé betonářské výztuže. Výztuž vlevo má průměr 32 mm, uprostřed 22 mm a vpravo 12 mm. Tyto hodnoty georadar není schopen určit s dostatečnou přesností (při odměření z obrazu lze získat hodnoty cca 40 mm, 30 mm a 20 mm, záleží ovšem na diagnostikovi a konkrétním zobrazení, jak hodnoty změří), je ovšem patrný relativní rozdíl v průměru výztuží. Osová vzdálenost výztuží je 150 mm, shoduje se tedy s hodnotou naměřenou radarem. Výztuž je umístěna osově 75 mm pod povrchem, což koresponduje s naměřenými daty. Nejpřesněji byla hloubka naměřena u nejmenšího profilu, přesně 75 mm. U největšího profilu byla naměřena hodnota 59 mm, tedy odchylka 16 mm. Jedná se o zkreslení vlivem parabolického tvaru odrazu.



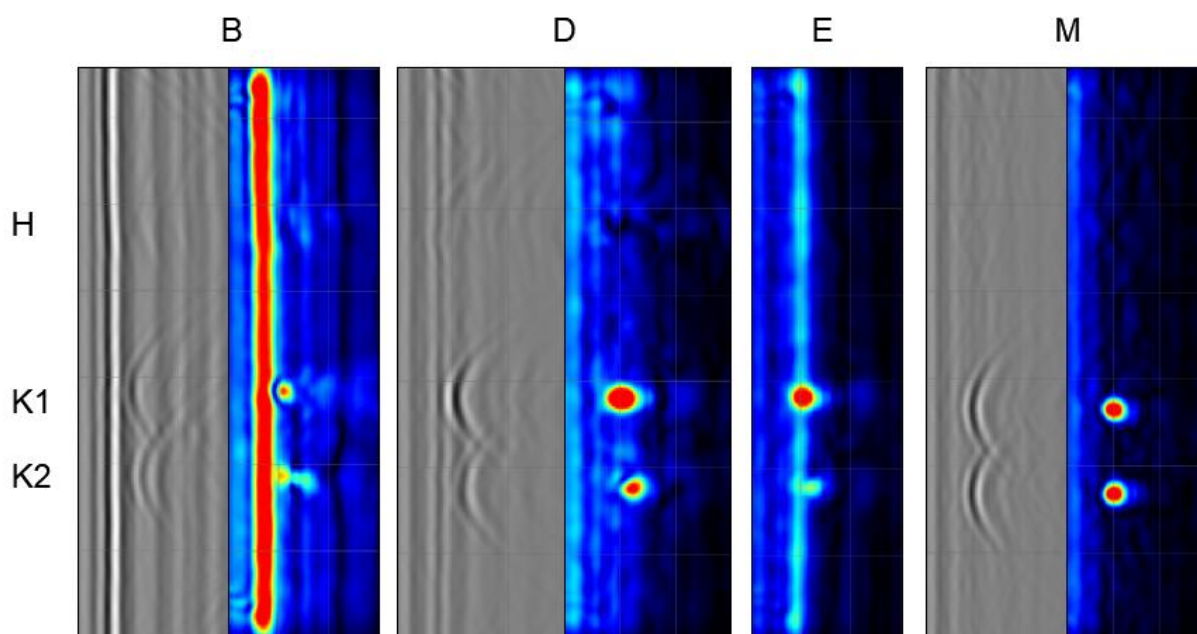
Obrázek 32 Dílčí B scan třetího plošného skenu. Svislá osa značí hloubku, vodorovná vzdálenost. Patrné jsou tři svislé betonářské výztuže o průměrech 32, 22 a 12 mm.

Liniové skeny: V rámci měření bylo provedeno několik liniových skenů vodorovných i svislých. Cílem bylo doplnit plošný sken, zejména se pokusit detekovat echo zadní stěny, dále pak upřesnit naměřená data o výztužích a simulacích kabelů.

Vodorovné skeny byly provedeny na linii 3, 4, 5 a 6. Přičemž linie jsou odstupňovány vždy po 10 cm od horního okraje bloku. Na žádném vodorovném skenu nebylo zaznamenáno echo zadní stěny, hloubka dosahu georadaru byla v tomto případě zřejmě silně ovlivněna výztuží pod povrchem. Patrné byly svislé betonářské výztuže a relativní rozdíl v jejich průměrech. Na skenu v úrovni line 5,

tedy 50 cm od horní hrany bloku byly navíc patrné slabé odrazy od simulací štěrkových hnízd. Podrobněji je tento sken popsán na str. 42.

Svislé liniové skeny byly provedeny na liniích B, D, E a M, přičemž linie B je umístěna 20 cm od levého okraje bloku, linie D 40 cm, linie E 50 cm a linie M 130 cm. Nejlépe patrné byly na těchto skenech simulace předpínacích kabelů, jelikož jsou umístěny kolmo k liniím skenů. Cílem bylo ověřit zobrazení kanálku K2, který na plošném skenu poukazoval na možnou chybu injektáže. Jednotlivé skeny jsou složeny na obr. 33 i s ukázanými rozdílnými odrazovými hyperbolami. Patrné jsou změny zobrazení spodního kanálku K2, ukazuje na jeho nehomogenitu. Na řezu B je viditelná svislá betonářská výztuž. Řezy B a D se nacházely nad štěrkovým hnízdem. Oproti betonu zde docházelo k lehkému odrazu vlnění.



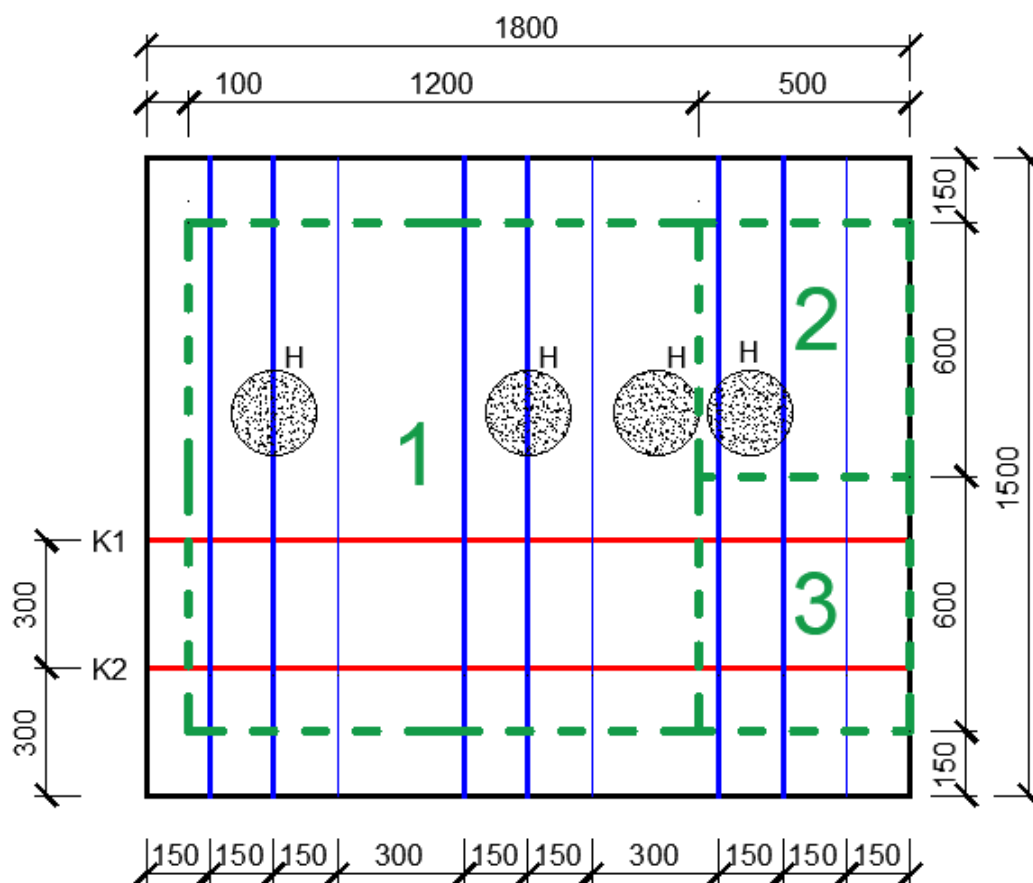
Obrázek 33: Svislé liniové skeny.

4.2.3. Měření georadarem Hilti PS 1000 X-Scan

Na bloku č. 2 bylo provedeno měření georadarem Hilti PS 1000 X-Scan. Pro srovnání byl proveden plošný sken z čelní strany bloku (pohled A) a liniové skeny ve stejných úrovních jako přístrojem Proceq GP8000. Při měření byly stejné podmínky. Data byla zpracována na PC po dokončení měření.

Plošný sken (pohled A): Skenovaná plocha byla totožná s plochou měřenou přístrojem GP8000. Georadar od firmy Hilti umožňuje použití rastru velikosti 1200 x 1200 mm, pro pokrytí bloku tak stačily tři plošné skeny. Jejich rozmístění je

zobrazeno na obr. 34. Sken je odsazen o 150 mm od horní hrany a 100 mm od levé hrany bloku. Dva krajní skeny o rozměru 600 x 600 mm přesahují blok o 100 mm. Jelikož radar neumožňuje ukončení linie před dosažením okraje rastru, mohou být krajní data zkreslená.

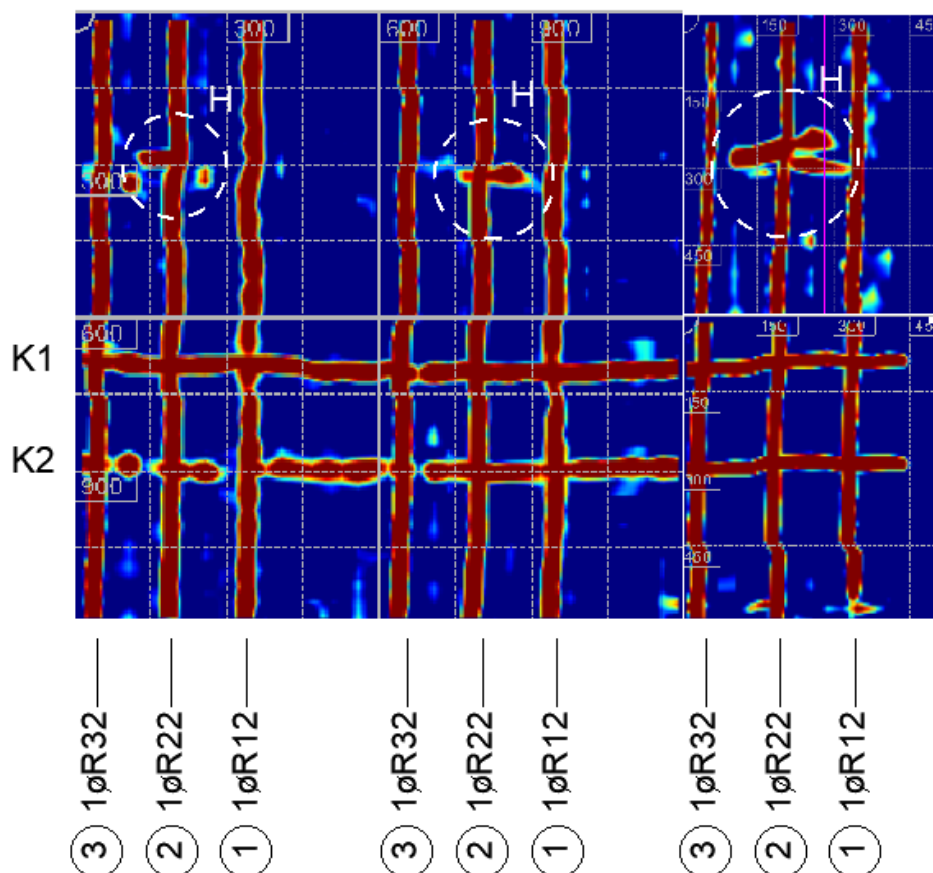


Obrázek 34: Rozložení rastrů pro plošné skeny přístrojem Hilti PS 1000 X-Scan.

Osová vzdálenost linií skenů je na použitých rastrech 100 mm. Výsledný pohled, složený ze tří skenů je zobrazen na obr. 35. Jasně rozpoznatelná je svislá betonářská výztuž různých průměrů. Na skenu se jeví všechny výztuže stejně, bez ohledu na jejich průměr. Z čelního pohledu lze určit rozteč výztuží, ta byla stanovena na 150 mm, což odpovídá skutečnosti.

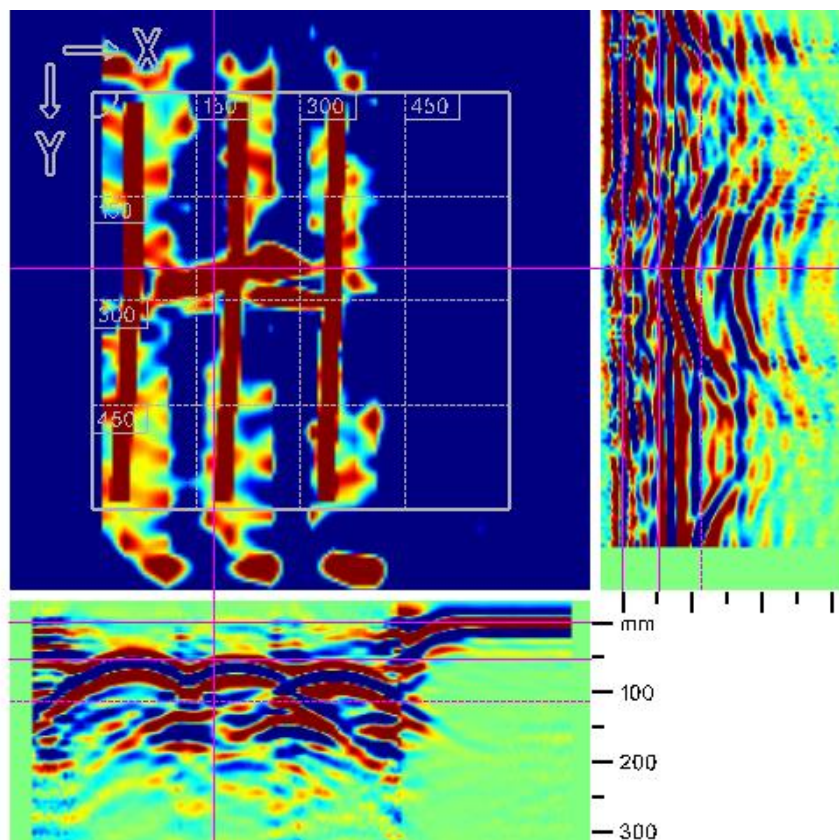
Nezainjektovaný kanálek K1 je výrazný po celé své délce, což odpovídá předpokladu. Kanálek K2, který by měl být zalit cementovým tmelem, se v pravé části podobá kanálku nezainjektovanému. Odraz je zde velmi jasný. V levé části je jeho obraz nekonzistentní. Tyto výsledky korespondují s daty naměřenými georadarem GP8000. Podobnost záznamu může být způsobena i charakterem

umístěné simulace. U plastové chráničky, ani cementového tmelu nedojde k tak výraznému odrazu jako u kovové výztuže umístěné vevnitř.



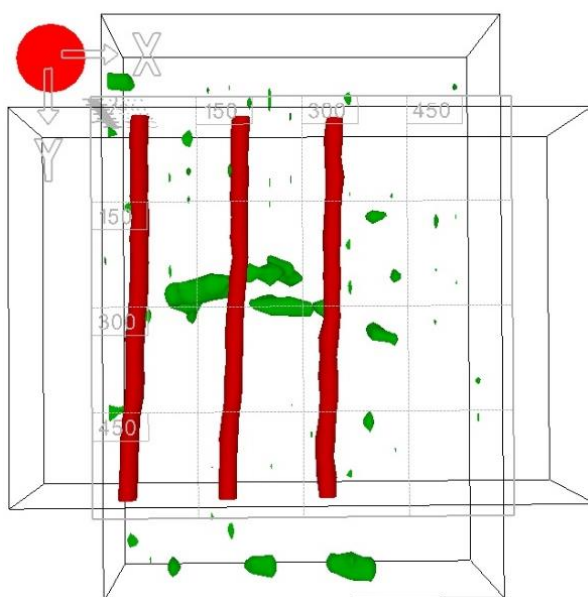
Obrázek 35: Výsledný pohled A složený ze tří plošných skenů, štěrková hnízda jsou zvýrazněna.

Štěrková hnízda jsou na obr. 35 zvýrazněna čárkovanými kruhy. Jejich zachycení je zde mnohem výraznější než u přístroje GP8000. Vzhledem k zachycenému tvaru lze ovšem předpokládat, že je zobrazen vázací drát, kterým byla hnízda připevněna k výztuži. Pro vyhodnocení se lépe hodí dílčí plošný sken 2, s nejvýraznějším zobrazením hnízda. Na obr. 36 je tento sken v detailu se svislým a vodorovným řezem v úrovni vady (fialový kříž). Z vodorovného B scanu lze odečíst, že prostřední výztuž se nachází v hloubce 50 mm. Ze svislého scanu je patrná vzdálenost od povrchu nalezeného vodorovného objektu – také přibližně 50 mm. Jelikož štěrková hnízda se nacházejí až za výztuží a zobrazovaný objekt je přibližně vodorovný, jedná se s největší pravděpodobností o vázací drát. Ke stejné detekci došlo i u ostatních simulací hnízd.



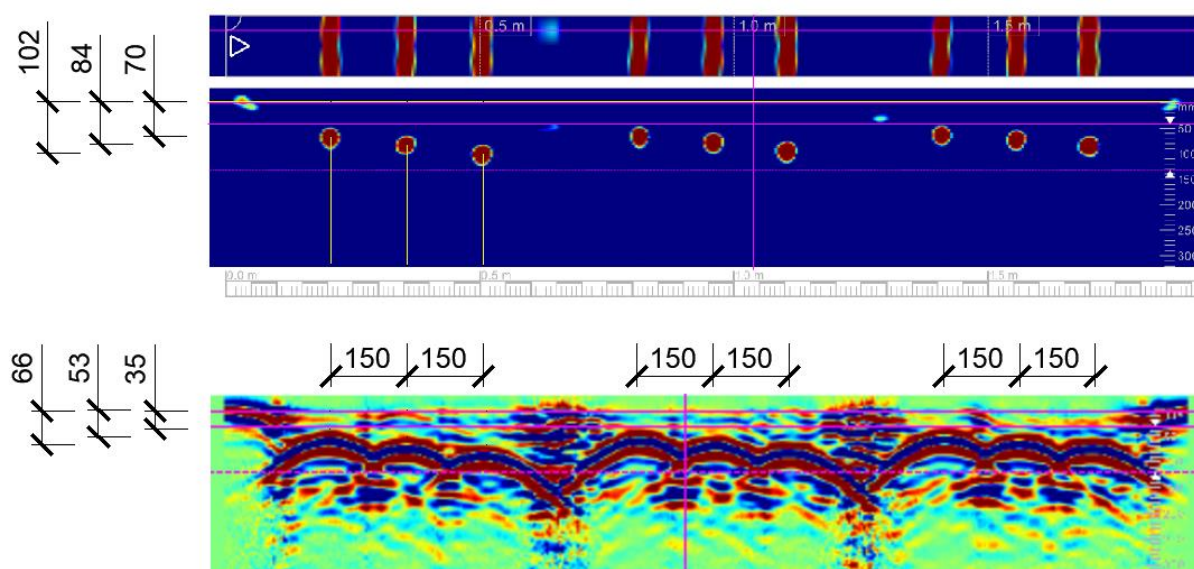
Obrázek 36: Plošný sken 2 nad štěrkovým hnízdem.

I georadar Hilti nabízí možnost 3D vizualizace problému pro zobrazení tvaru vad a objektů v betonu. Ukázka je na obr. 37, jedná se o plošný sken č. 2. Zobrazeny jsou svislé betonářské výztuže (červeně) a další objekty (zeleně). Ani na 3D pohledu nejsou patrné rozdíly v průměru výztuže.



Obrázek 37: 3D vizualizace plošného skenu č. 2.

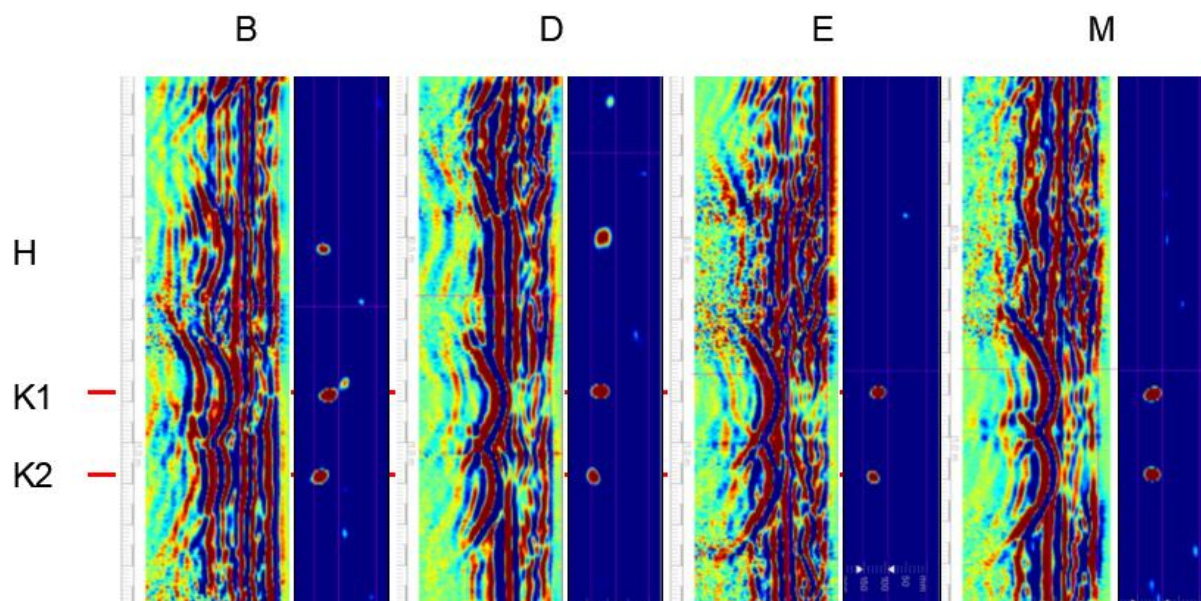
Pomocí **liniových skenů** byla určena rozteč výztuží a hloubka jejich uložení. Osová vzdálenost byla stanovena přesně na 150 mm, což koresponduje se skutečným provedením bloku. Hloubka uložení od povrchu bloku k ose výztuže je zakótována na obr. 38 vlevo. Odrazové hyperboly jsou zakótovány od povrchu k vrcholu. Reálná hodnota osového uložení je 75 mm. Naměřené hodnoty se značně liší pro jednotlivá zobrazení i výztuže.



Obrázek 38: Liniový vodorovný sken pro lokalizaci výztuže, určení hloubky uložení a rozteče.

Při žádném z liniových skenů nebylo zaznamenáno echo zadní stěny. Ze svislých skenů byla stanovena hloubka uložení simulací kanálků s předpínacími lany na 90 mm. Tato hodnota odpovídá provedení $(75 + 32/2) = 91$ mm.

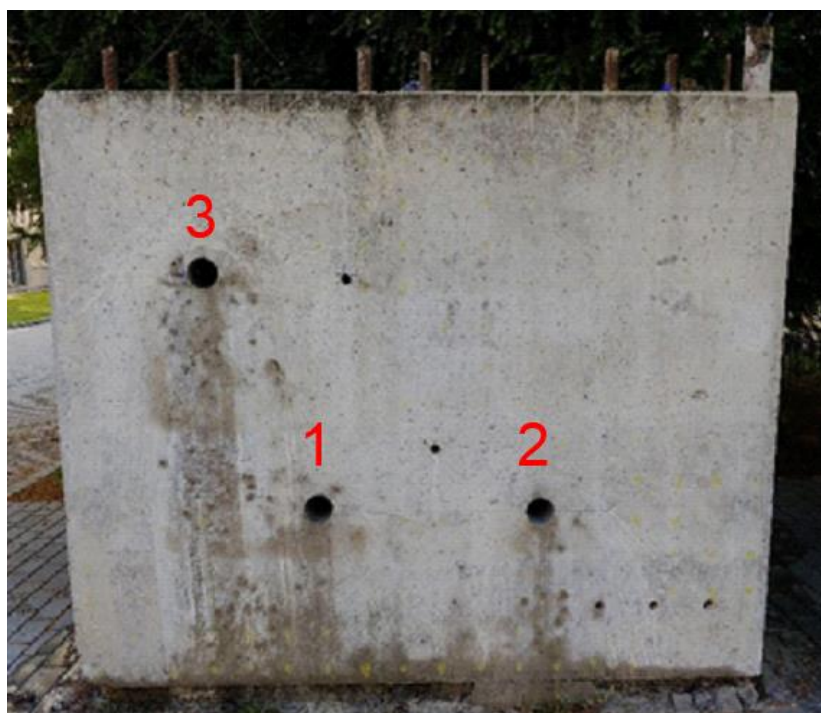
Svislé skeny byly provedeny na liniích B, D, E a M, tedy 20, 40, 50 a 130 cm od levého okraje bloku. Linie B a D se nachází nad prvním štěrkovým hnízdem, linie E a M jsou nad betonem bez vad. Spodní, zainjektovaný kanálek má nepatrně slabší zobrazení. Liniové skeny u něj nezobrazují žádnou výraznou nehomogenitu. V úrovni štěrkových hnízd jsou u prvních dvou skenů patrné odrazové hyperboly. Jelikož je hyperbolické zobrazení typické pro objekty kolmé k linii skenování, lze usuzovat že je zobrazen především vázací drát. Odrazy od samotného štěrkového hnízda jsou oproti kovovým objektům příliš slabé. Jednotlivé skeny jsou zobrazeny na obr. 39.



Obrázek 39: Liniové svislé skeny.

4.2.4. Ověření skenů jádrovými vývrtý

Pro ověření dat naměřených pomocí georadarů byly provedeny tři jádrové vývrtý. Dva v úrovni kabelu K2, u nějž měření poukazovalo na možnou odchylku od dokumentace a jeden skrze štěrkové hnízdo, pro ověření jeho stavu. Rozložení vrtů je patrné z obr. 40.



Obrázek 40: Blok č. 2 po provedení jádrových vývrtů.

Kanálek K2: Dle dokumentace se jedná o plastovou chráničku s jedním sedmidrátovým předpínacím lanem. Chránička by měla být kompletně vyplněná cementovým tmelem. Pravá část byla oběma georadary zaznamenána velmi jasně, stejně jako nezainjektovaný kabel K1. V levé části docházelo u georadaru GP8000 k mnohem slabšímu odrazu, u přístroje PS 1000 X-Scan nebyl rozdíl natolik patrný. Pro ověření byly provedeny dva jádrové vývrty mezi sériemi výztuží. Vývrt č. 1 obsahuje celý průřez chráničky a je zobrazen na obr. 41. V konstrukci se předpínací lano nachází ve spodní části, blíže čelní straně. K poškození došlo v průběhu vrtání a vytahování vývrtu. Při pohledu do prostoru po vývrtu (obr. 42) je zřejmé, že se zde nenacházely žádné trhliny ani nehomogenity.



Obrázek 41: Jádrový vývrt č. 1 (levá část kabelu). Čelní strana dole, spodní strana vlevo.



Obrázek 42: Pohled do prostoru po jádrovém vývrtu č. 1. Na cementovém tmelu nejsou žádné poruchy ani nehomogenity.

Jádrový vývrt č. 2 byl proveden v pravé části bloku, kde radary zachytili výrazný odraz, stejně jako u nezainjektované chráničky. Při vrtání nebyla vyjmuta celá chránička, byla převrtána v horní části. Na obr. 43 je jádrový vývrt č. 2. Čelní strana vrtu se nachází dole, spodní strana vlevo. K poškození došlo opět až při vrtání, pohled do prostoru po jádrovém vývrtu je na obr. 44. Cementový tmel je celistvý, bez defektů.

Ani pomocí destruktivní metody a přímého pozorování kanálku K2 nebylo možné objasnit příčinu rozdílného zobrazení v levé a pravé části bloku.



Obrázek 43: Jádrový vývrt č. 2. Čelní strana se nachází dole, spodní vlevo.



Obrázek 44: Prostor po jádrovém vývrtu č. 2. Výplň chráničky v konstrukci je nepoškozená.

Štěrkové hnízdo: Jelikož na žádném z provedených skenů nebylo štěrkové hnízdo výrazně patrné, byl proveden jádrový vývrt pro ověření jeho stavu. Kamenivo bylo umístěné v jemné síti, při betonáži mohl tmel protéct sítí a simulaci znehodnotit. Při vrtání byla zachycena spodní část simulace, celistvá část vývrtu je na obr. 45. Sítí proteklo pouze malé množství pojiva, ve větší hloubce se nacházelo pouze kamenivo, které nebylo nijak spojeno (obr. 46).



Obrázek 45: Jádrový vývrt č. 3. Nahoře je patrný vázací drát.



Obrázek 46: Kamenivo ze štěrkového hnízda zasaženého vrtem č. 3.

Při provádění jádrového vývrtu č. 3 byl zachycen vázací drát, kterým bylo hnízdo uchyceno k výztuži. Vzhledem k jeho velké tloušťce mohl ovlivnit měření georadarem. Štěrková hnízda byla navíc špatně rozeznatelná z důvodu umístění za výztuží a z důvodu své struktury. Samotné kamenivo je pro georadar v betonu téměř nerozeznatelné, kvůli podobným vlastnostem. V případě použitých simulací byly vzduchové mezery relativně malé. Kombinací těchto faktorů došlo k nevýraznému, téměř minimálnímu, zobrazení.

4.3. Most 50-003..2 - Ostravská přes Bělohorskou

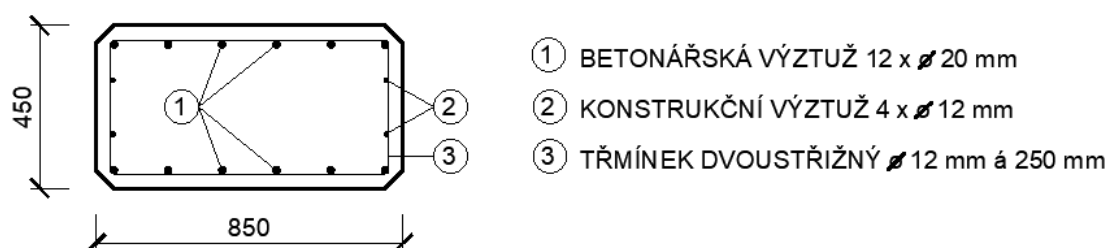
4.3.1. Popis mostu

Most s evidenčním číslem 50-003..2 se nachází ve východní části Brna a převádí ulici Ostravská přes ulici Bělohorská. Stavba byla dokončena v roce 1980. Na mostní konstrukci jsou patrné poruchy – odpadající sanační vrstva, obnažená korodující výztuž, vápenné výluhy. Na obr. 47 je most s upevněnou provizorní sítí, zřízenou kvůli opadu sanační a krycí vrstvy.



Obrázek 47: Most 50-003..2 Ostravská přes Bělohorskou. Ve předu trám č. 1, vlevo opěra č. 1.

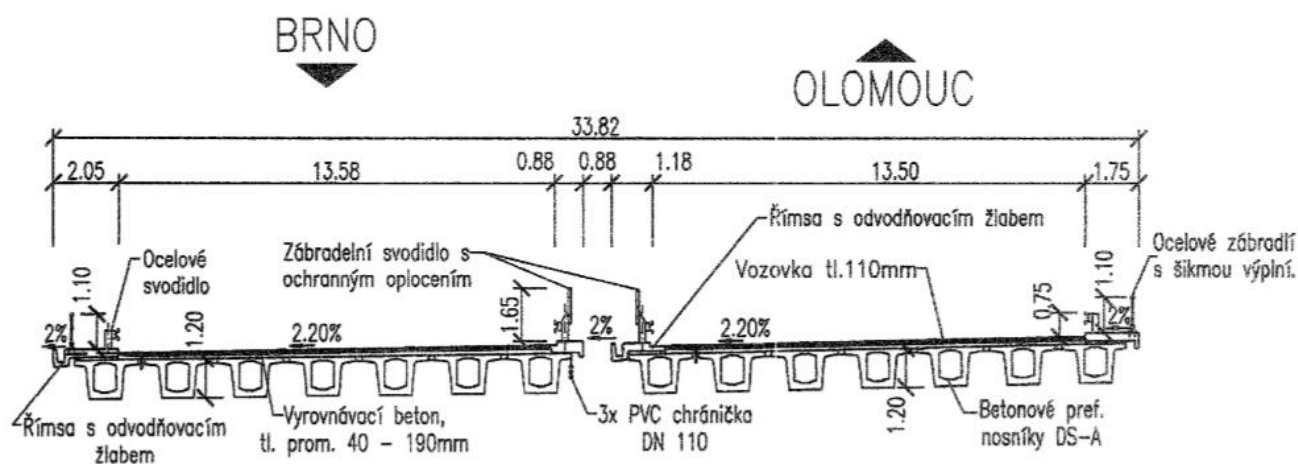
Spodní stavba: Krajní opěry tvoří prefabrikovaná předpjatá táhla, vynášející koncový příčník. Mezilehlé podpěry jsou členěné, tvořené šikmými prefabrikovanými vzpěrami. Založeny jsou na základových pasech a pilotách. Podpěry jsou ze železobetonu, s proměnnou délkou 0,60 – 0,95 m, šířkou 0,45 m a výškou 8,80 m [20]. Schéma měřené stojky č. 3 včetně vyztužení je na obr. 48.



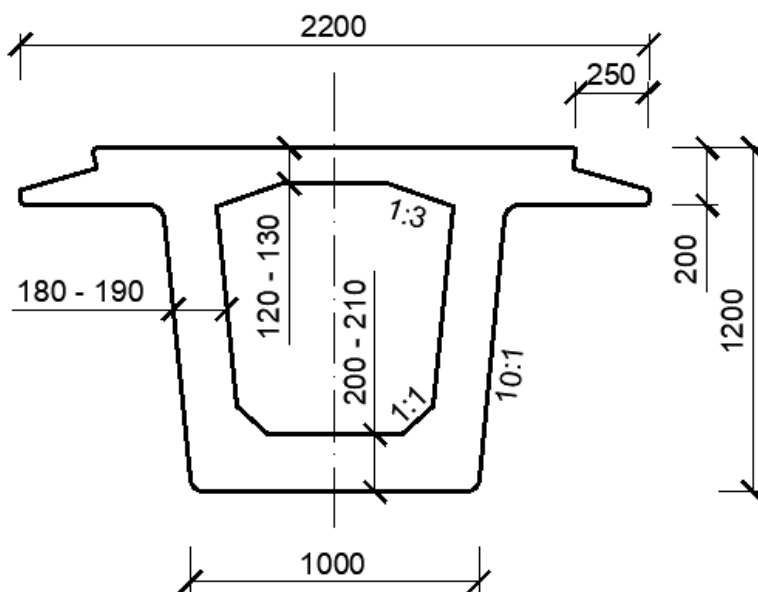
Obrázek 48: Schéma měřené stojky č.3 dle dohledané stavební dokumentace [21].

Osová vzdálenost betonářské výztuže se liší dle délky stojky. Při zachování krytí 40 mm vychází rozteč výztuží u měřené stojky č. 3 přibližně 155 mm.

Nosná konstrukce: Jedná se o most o třech polích, s délkou nosné konstrukce 60,8 m a celkovou šířkou 16,5 m. Tvoří ji 7 prefabrikovaných předpjatých nosníků DS-A. Konstrukce je vzpěradlová, vyztužená koncovými příčníky. Zmonolitnění proběhlo dobetonováním spar. Konstrukční výška nosníků je 1,20 m. Na obr. 49 je schématický příčný řez dle mostního listu. Most s evidenčním číslem 50-003..2 je zobrazen v levé části [20]. Na obr. 50 je řez typickým nosníkem DS-A.

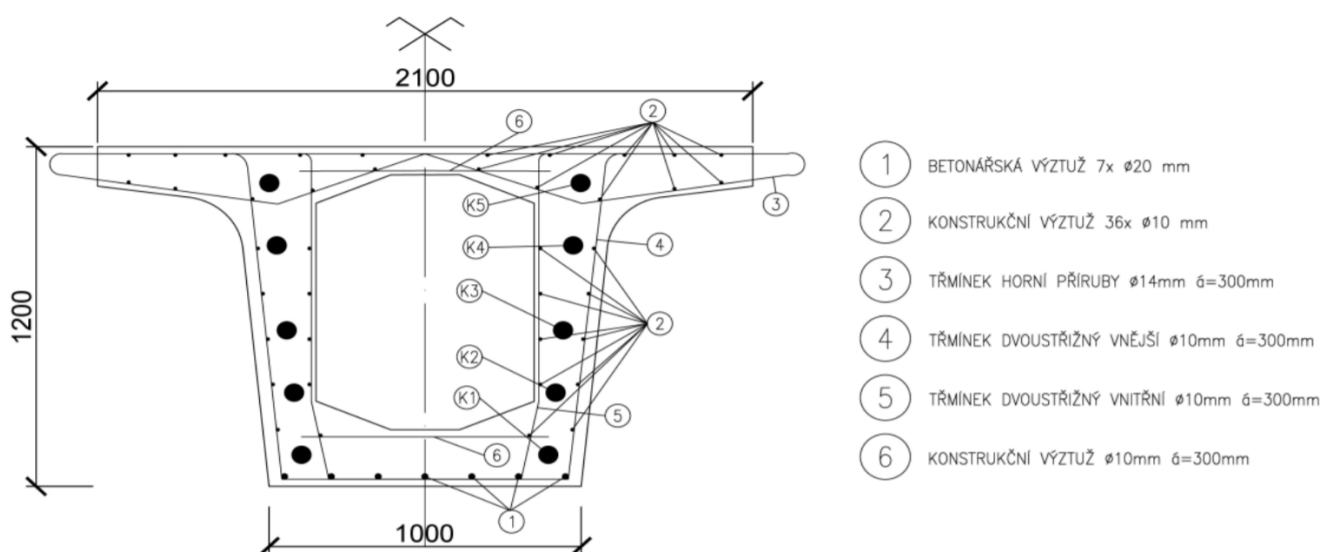


Obrázek 49: Schématický příčný řez. Vlevo most 50-003..2, vpravo 50-003..1 [20]. Nosníky i stojky jsou číslovány zleva, pohled od opěry č. 2.



Obrázek 50: Řez typickým nosníkem DS-A [22].

Dle dohledané projektové dokumentace je v každém nosníku deset předpínacích lan, umístěných symetricky dle svislé osy. Ve stěně nosníku se nachází konstrukční výztuž průměru 10 mm a dvoustřížné třmínky průměru 10 mm s osovou vzdáleností 300 mm. Minimální krytí na bočních stranách nosníku by mělo být 20 mm. Přesné rozmístění výztuží ani lan není známo, na obr. 51 je rozmístění výztuže v krajním poli v blízkosti opěry dle dohledané stavební dokumentace [21]. Tloušťky jednotlivých částí nosníku nejsou zakótovány. Po přeměření byla nejmenší tloušťka stěny nosníku stanovena na 180 mm (u kanálku K2), u počátku horního zaoblení (u kanálku K4) na 240 mm.



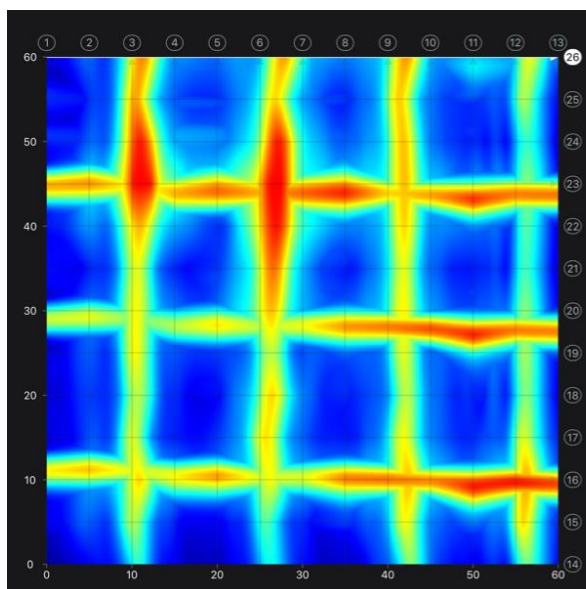
Obrázek 51: Rozmístění výztuže a předpínacích kabelů na nosníku DS-A v krajním poli v blízkosti opěry, dle dohledané dokumentace [21].

4.3.2. Měření

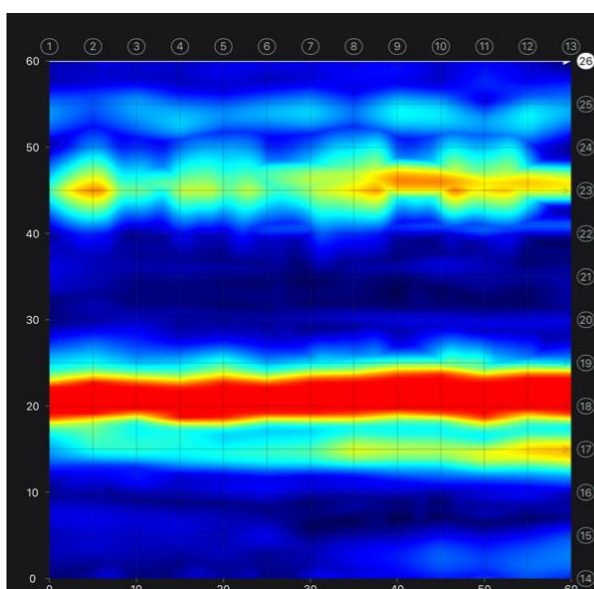
Na mostním objektu proběhlo měření georadarem Proceq GP8000 a to na dvou nosnících a jedné podpěře. Nosníky jsou číslovány ze směru Židenice. Opěra 1 je označena opěra směr Ostrava, opěra 2 směr Brno. Naměřená data byla porovnána s průzkumem provedeným v roce 2019 v rámci bakalářské práce Davidem Řezáčem. Při tomto měření byl využit georadar Hilti PS 1000 X-Scan.

Nosník 1: Na nosníku 1 proběhlo měření u opěry 1 i 2, cílem bylo zjistit polohu betonářské výztuže, kanálků s předpínacími kabely, změřit tloušťku konstrukce a odhalit případné poruchy ve struktuře betonu.

U **opěry č. 1** byl proveden plošný sken 60 x 60 cm s osovou vzdáleností linií 5 cm. Spodní linie skenu je přibližně 25 cm od spodního líce nosníku, levá linie skenu přibližně 2 m od opěry. Při zobrazení plošného skenu v hloubce 0 – 4 cm lze rozpoznat podélnou i svislou výztuž (obr. 52). Odečíst lze osovou vzdálenost, která činí 150 mm u svislých třmínků a přibližně 170 mm u podélné výztuže. Průměr výztuže odhadnout nelze. Při odfiltrování prvních výškových centimetrů skenu došlo ke zvýraznění kanálků s předpínacími lany (obr. 53). Horní kanálek se nachází za betonářskou výztuží, jeho odraz je tedy zkreslený. Ze skenu nebyly patrné žádné poruchy struktury betonu.

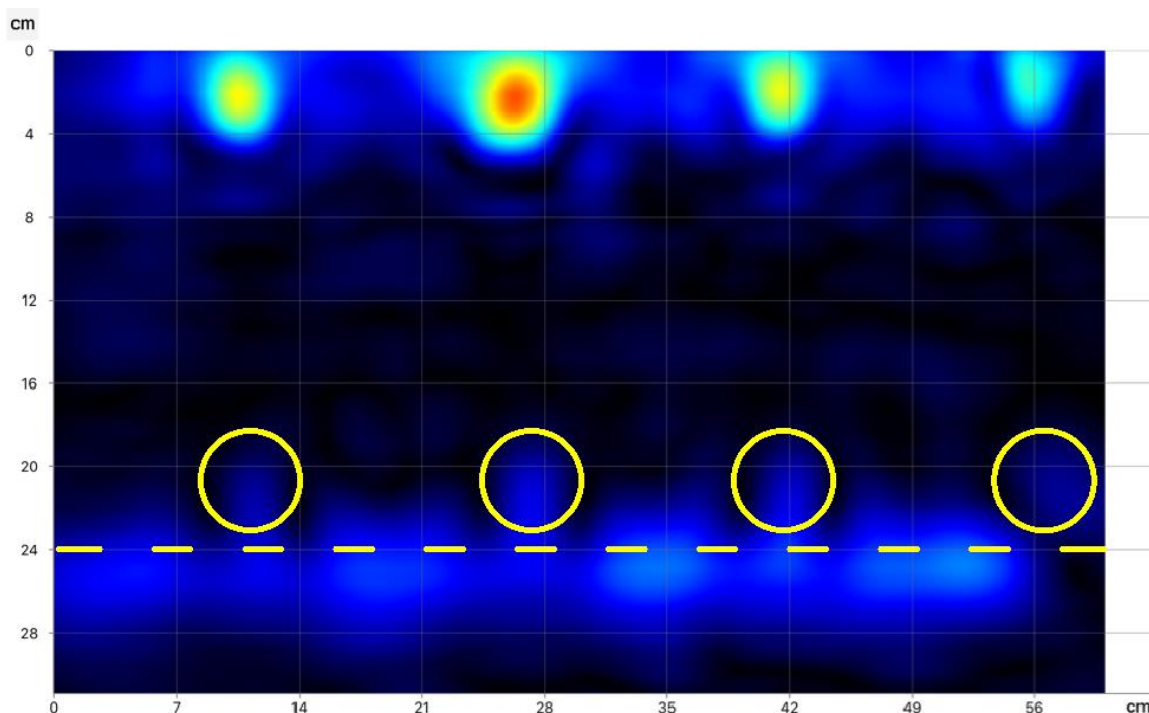


Obrázek 52 Trám 1 u opěry č. 1. Zobrazení svislé i vodorovné výztuže v hloubce 4 cm.



Obrázek 53 Trám 1 u opěry č. 1. Zobrazení plošného skenu v hloubce 7 cm, patrné jsou kanálky pro předpínací výztuž.

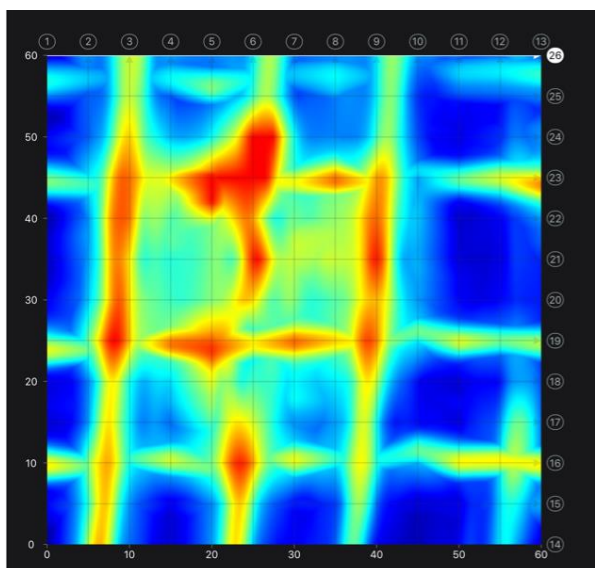
Při zobrazení B scanu (linie 24) ve směru osy X (podélný směr, obr. 54) lze odečíst hloubku uložení třmínků, která je zde velmi malá, 10–15 mm pod povrchem. Velmi lehce jsou zobrazeny třmínky u zadní stěny prvku (na obr. 54 zvýrazněny žlutými kruhy), jejich polohu lze odhalit díky přibližně známému řezu nosníkem. Dobře patrné je echo zadní stěny, zvýrazněné žlutou čárkovanou čarou, nacházející se v hloubce 24 cm. Tato hloubka přesně odpovídá tloušťce prvku v daném místě odhadnuté z dokumentace.



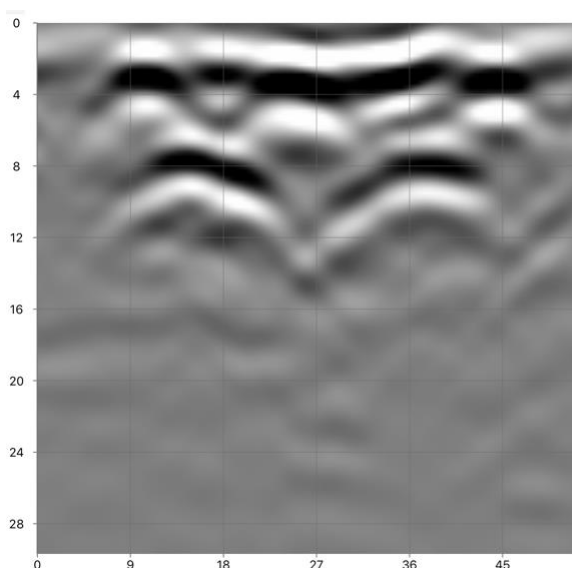
Obrázek 54: Linie skenu 24 (v podélném směru). V horní části 4 třmínky, jejich druhý stříh je naznačen žlutými kruhy u zadní stěny, ta je zvýrazněna čárkovanou čarou v hloubce 24 cm.

Z B scanu ve směru osy Y (svislý směr) lze odečíst hloubku uložení podélné výztuže. Ta činí u betonářské výztuže 20 mm a u předpínacích lan přibližně 60 mm.

U **opěry č. 2** byl primárně využit plošný sken 60 x 60 cm s osovou vzdáleností linií 5 cm. Spodní linie skenu byla umístěna přibližně 25 cm od spodního líce nosníku, pravá linie asi 2 m od opěry. Vyztužení bylo zjištěno obdobné jako u opěry č. 1. Osová vzdálenost svislých prutů byla stanovena na 150 mm, u podélné výztuže je průměrná rozteč přibližně 170 mm. Za betonářskou výztuží se nacházejí dva kanálky s předpínací výztuží. Ze skenů byly patrné reflexe přibližně uprostřed plošného skenu. K odrazům vlnění docházelo již v prvních centimetrech hloubky, tedy ještě před výztuží. Vzhledem ke stavu sanační vrstvy, která odpadala po celé délce nosníku se zřejmě jedná o delaminaci. Díky ní došlo ke zkreslení měření. Na obr. 55 je zobrazen plošný sken nad delaminací. Jelikož elektromagnetické vlnění prostupuje lehce vzduchem, byla zaznamenána jak měkká výztuž, tak i výztuž předpínací. Hloubka uložení podélné betonářské výztuže tak mohla být stanovena na 20 – 25 mm, předpínací výztuže na 70 mm a třmínků na 15 – 20 mm, což odpovídá dokumentaci. V podélném B scanu bylo zaznamenáno echo zadní stěny v hloubce 240 mm.

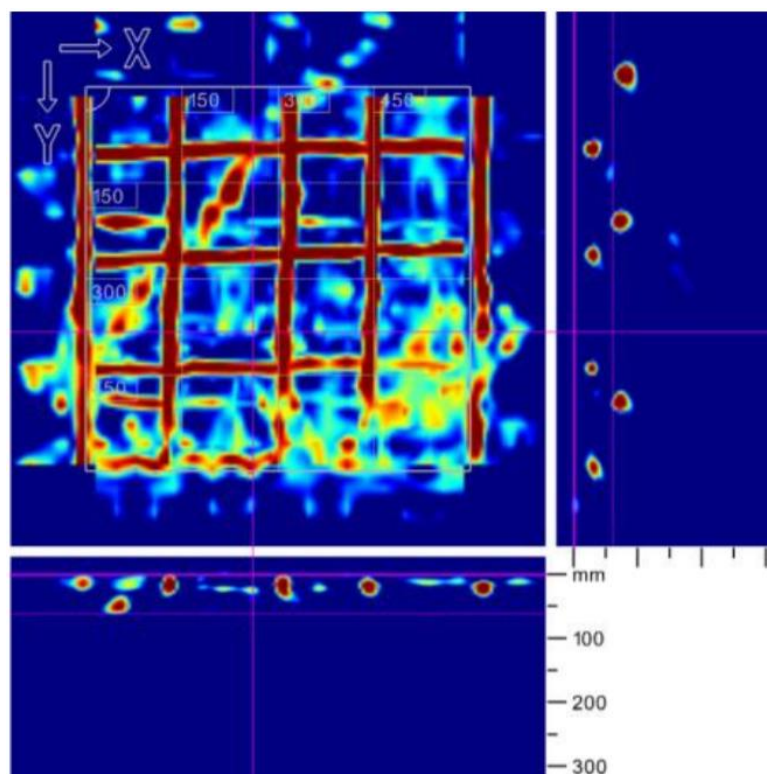


Obrázek 55 Nosník 1 u opěry č. 2. Mezi výztuží dochází k výrazným reflexím vlnění, což indikuje poruchu struktury betonu.

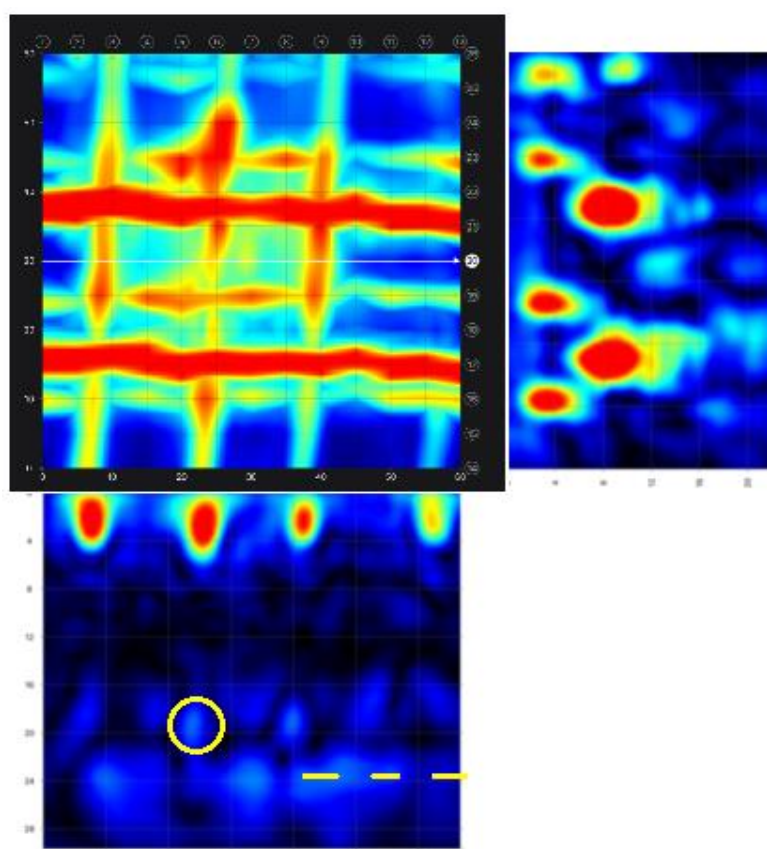


Obrázek 56 Sken v příčném směru nad detekovanou vadou. Z tvaru lze usuzovat na projev delaminace. Spodní hyperboly jsou způsobeny kanálky.

Na nosníku č.1 bylo proběhlo měření i v roce 2019 georadarem Hilti PS 1000 X-Scan. Pro porovnání jsou použita data ze sondy označené jako 2N4 – nosník č. 1 u opěry č. 2 (Brno). Byly provedeny liniové skeny po obvodu nosníku a plošný sken z boku nosníku. Plošný sken měl rozměry 600 x 600 mm, spodní okraj skenu byl umístěn cca 200 mm od spodní hrany nosníku. Skeny byly provedeny asi 2 m od koncového příčnicku, tedy přibližně ve stejném místě jako skeny provedené v roce 2020. Při liniovém skenu boční stěny byla nalezena podélná betonářská výztuž, jejíž osová vzdálenost byla stanovena na 170 mm a krytí na 20 mm. Dále byly zaznamenány kanálky s předpínací výztuží v hloubce 65 – 70 mm. Tento výsledek skvěle koresponduje s daty naměřenými radarem GP8000. U plošného skenu zachytil georadar Hilti třmínky a jejich rozteč byla stanovena na 155 mm. Navíc byl zaznamenán šikmý prut konstrukční výztuže [21]. Při měření v roce 2020 šikmé pruty zachyceny nebyly, zřejmě kvůli lehce odlišné volbě místa skenování. Na plošném skenu je také patrná delaminace. Nebylo zaznamenáno echo zadní stěny, ani výztuž v její blízkosti.

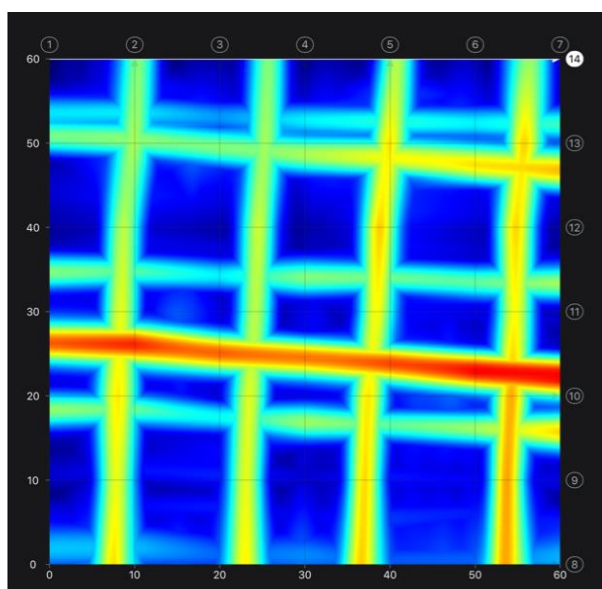


Obrázek 57: Sken provedený v roce 2019 georadarem Hilti PS 1000 X-Scan. Data korespondují s měřením GP8000, zaznamenána nebyla zadní stěna prvku ani výztuž v její blízkosti [21].

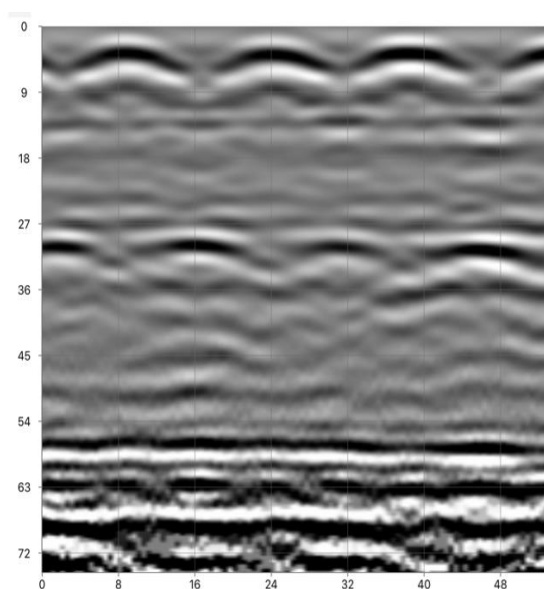


Obrázek 58: Sken provedený v roce 2020 georadarem GP8000 na stejném nosníku. Žlutým kruhem naznačena výztuž u zadní stěny, čárkovanou čarou echo zadní stěny.

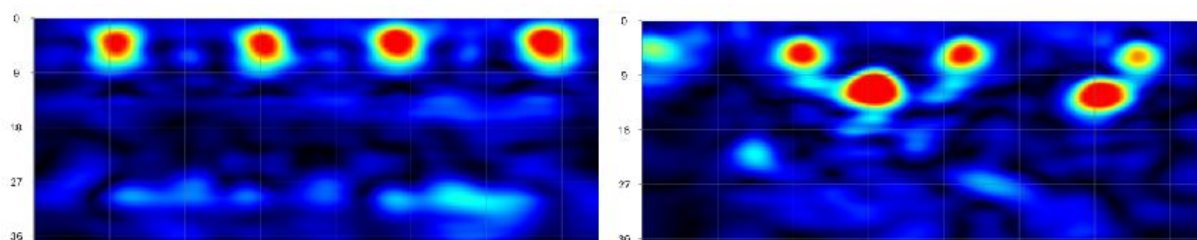
Nosník 2: Byl proveden jeden plošný sken u **opěry č. 2** o velikosti 60 x 60 cm s osovou vzdáleností linií skenu 10 cm. Spodní linie skenu byla umístěna přibližně 20 cm od spodního líce nosníku, pravá přibližně 2 m od opěry. Na plošném skenu, zobrazeném na obr. 59, je jasně patrná betonářská výztuž i kanálky s předpínací výztuží. Osová vzdálenost výztuže v podélném i příčném směru koresponduje s prvním trámem, tedy 150 mm. V oblasti nebyly zaznamenány žádné nehomogenity, i díky tomu byl naopak na řezu v podélném směru patrný odraz zadní stěny. Z dílčích B scanů lze odměřit hloubku uložení výztuže, která činí u svislých třmínků 20 – 25 mm, u podélných 30 mm a u kanálků s předpínacími lany 90 mm. Odraz od zadní stěny je registrovatelný v hloubce přibližně 280 mm, jak ukazuje obr. 60.



Obrázek 59 Trám č. 2 u opěry č. 2. Zobrazení plošného skenu s podélnou i svislou betonářskou výztuží a kanálky s předpínacími kabely.



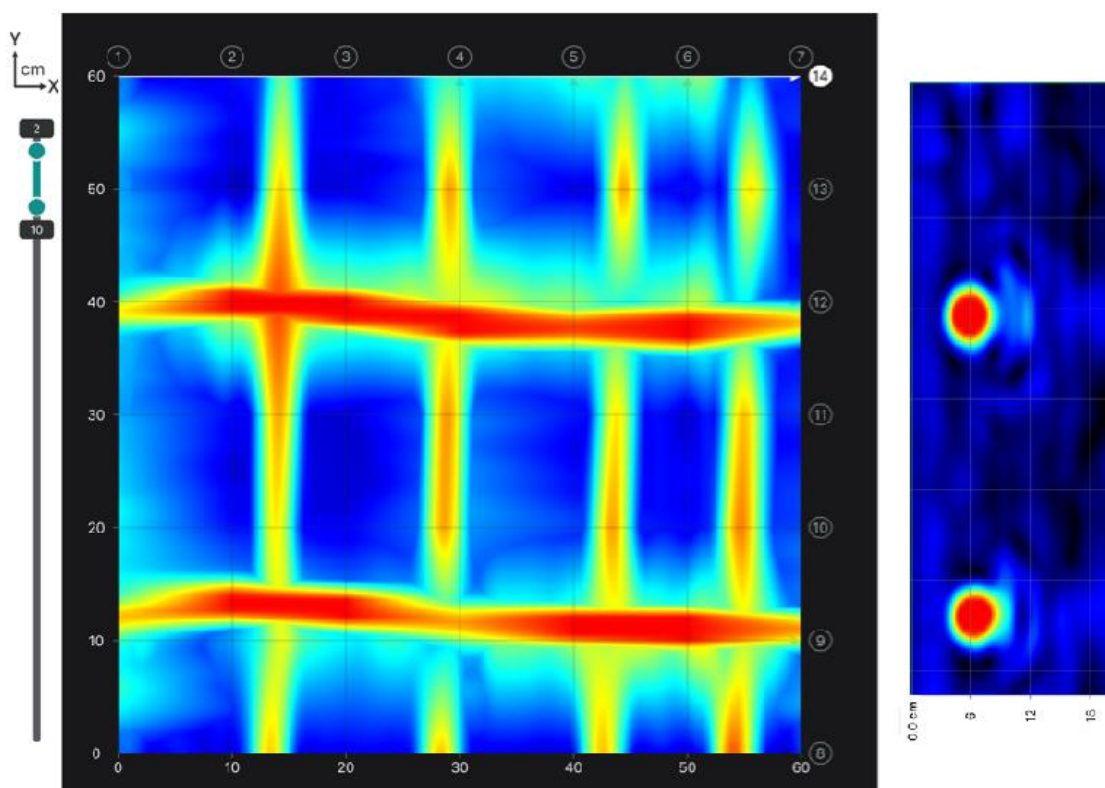
Obrázek 60 Trám č. 2 u opěry č. 2. Dílčí B scan s hyperbolami od příčné betonářské výztuže a odrazů zadní stěny.



Obrázek 61: B Scan vodorovnou rovinou (vlevo) a svislou rovinou (vpravo). Patrné echo zadní stěny, betonářská i předpínací výztuž.

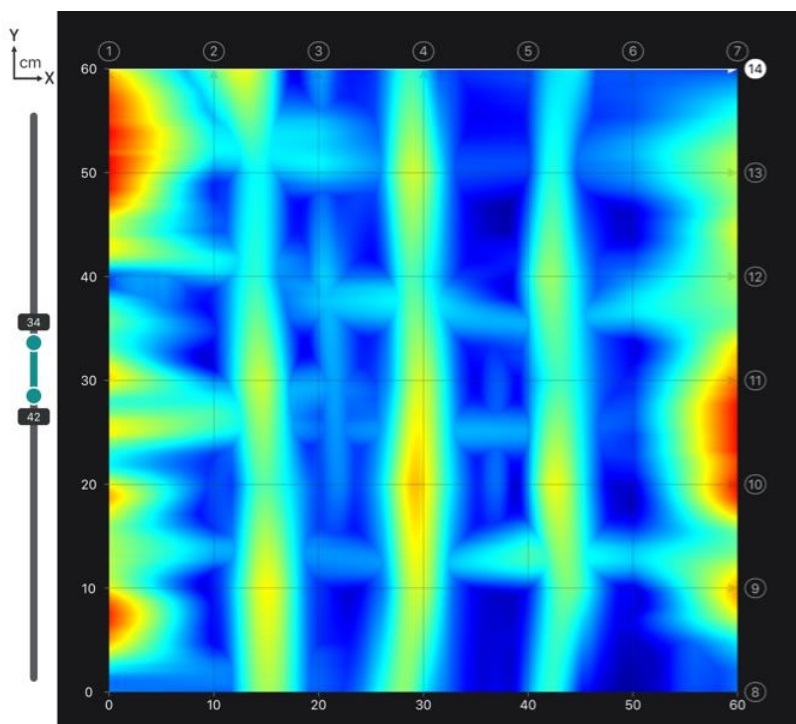
Stojka: Měření proběhlo na stojce pod třetím trámem u opěry č. 2, tedy směr Brno. Byl použit plošný sken o rozměrech 60 x 60 cm, s osovou vzdáleností linií 10 cm. Rastr byl umístěn ze strany od opěry, přibližně 50 cm od terénu. Stojka má reálné rozměry 85 x 45 cm. Dle projektové dokumentace je stojka vyztužena 12 pruty (6 na každé straně) s průměrem 20 mm. Dvoustřížné třmínky mají osovou vzdálenost 250 mm a průměr 12 mm. Krytí mělo mít minimální hodnotu 40 mm [21]. Od měření se očekávala lokalizace hlavní svislé výztuže a třmínků s rozpoznatelnou osovou vzdáleností a hloubkou uložení prutů. Dále pak zachycení odrazu zadní stěny a odhalení případných nehomogenit.

Při měření byly zaznamenány obě vrstvy výztuže i zadní stěna stojky. Nebyly nalezeny žádné nehomogenity. První vrstva výztuže je patrná na obr. 62, na kterém se zobrazuje konstrukce v hloubce 2–10 cm. Jsou zde výrazné jak svislé pruty, tak vodorovné třmínky. Osová vzdálenost svislých prutů byla stanovena na 150 mm, osová vzdálenost třmínků na 250 mm, hodnoty odpovídají stavební dokumentaci. Krytí třmínků bylo naměřeno 40 mm, což také koresponduje s podklady.



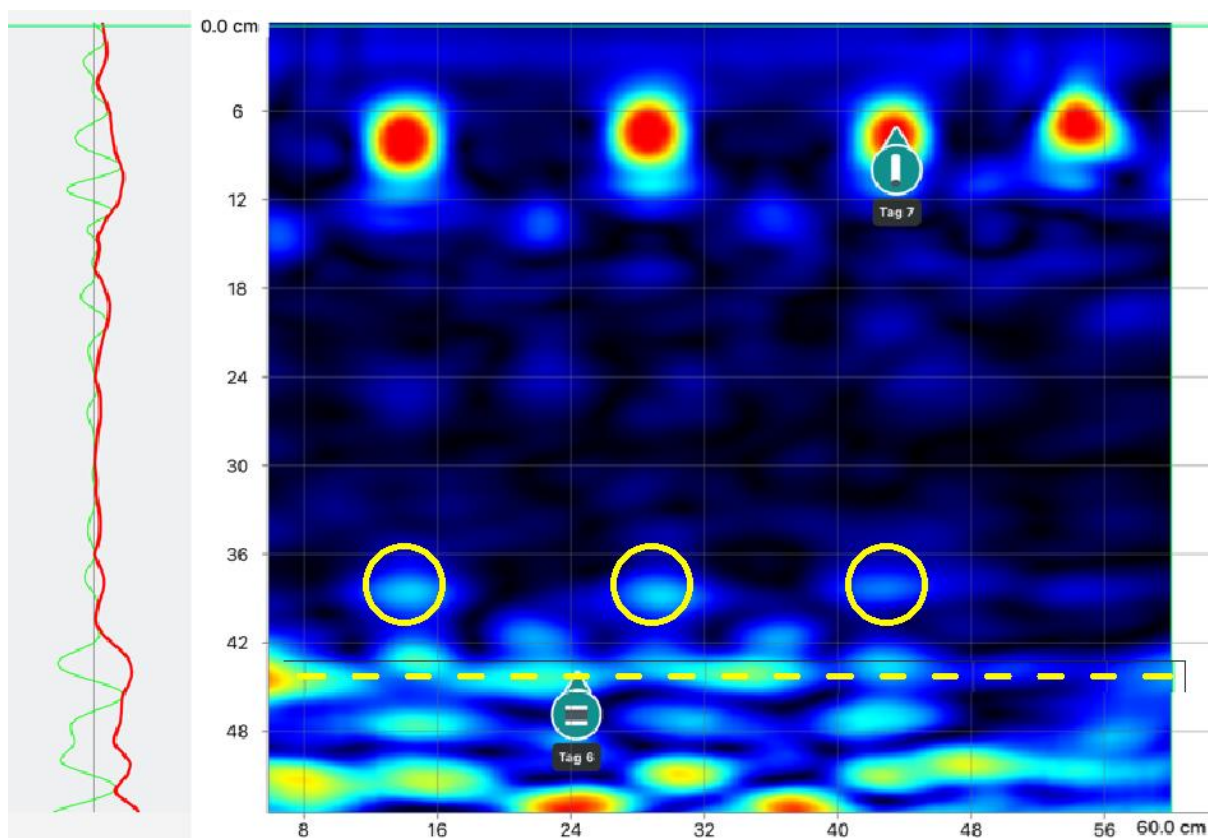
Obrázek 62 Plošný sken stojky pod trámem č. 2 doplněn dílčím B skenem. Zobrazeny jsou svislé pruty výztuže i vodorovné třmínky u povrchu betonu ze strany měření.

Ze stejného plošného skenu jde zobrazit i výztuž u zadní strany stojky. Ve zobrazení na obr. 63 je zvýrazněna hloubka 34–42 cm. Rozlišovací schopnost radaru zde klesá nejen v důsledku větší hloubky, ale i kvůli zastínění první vrstvou výztuže. Výrazné jsou především svislé pruty výztuže, rozpoznatelné jsou ovšem i třmínky.



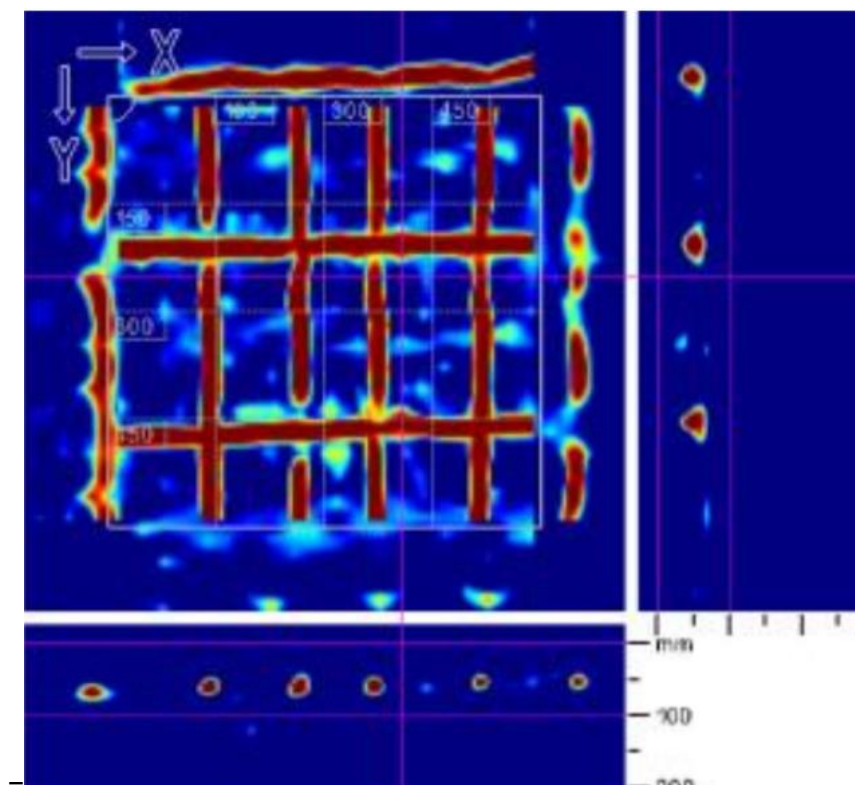
Obrázek 63 Plošný sken stojky pod trámem č. 2. Zobrazena je hloubka 34 - 42 cm, patrné jsou především svislé pruty výztuže, třmínky mají již slabší reflexi.

Na obr. 64 je zobrazen řez vodorovnou rovinou, tedy B scan. V levé části je pak příklad zobrazení průběhu jednotlivého zachyceného signálu, A scanu. V horní části jsou patrné čtyři pruty svislé betonářské výztuže. Kytí svislé výztuže je 50–60 mm, osová vzdálenost průměrně 150 mm. V hloubce asi 38 cm jsou ve žlutých kruzích zvýrazněny svislé betonářské výztuže u zadní stěny. Čtvrtá výztuž, u pravého okraje, je již velmi málo zřetelná. V hloubce přibližně 45 cm jsou patrné odrazy vlnění od zadní stěny stojky, na obr. 64 je přibližná poloha naznačena žlutou čárkovanou čarou.

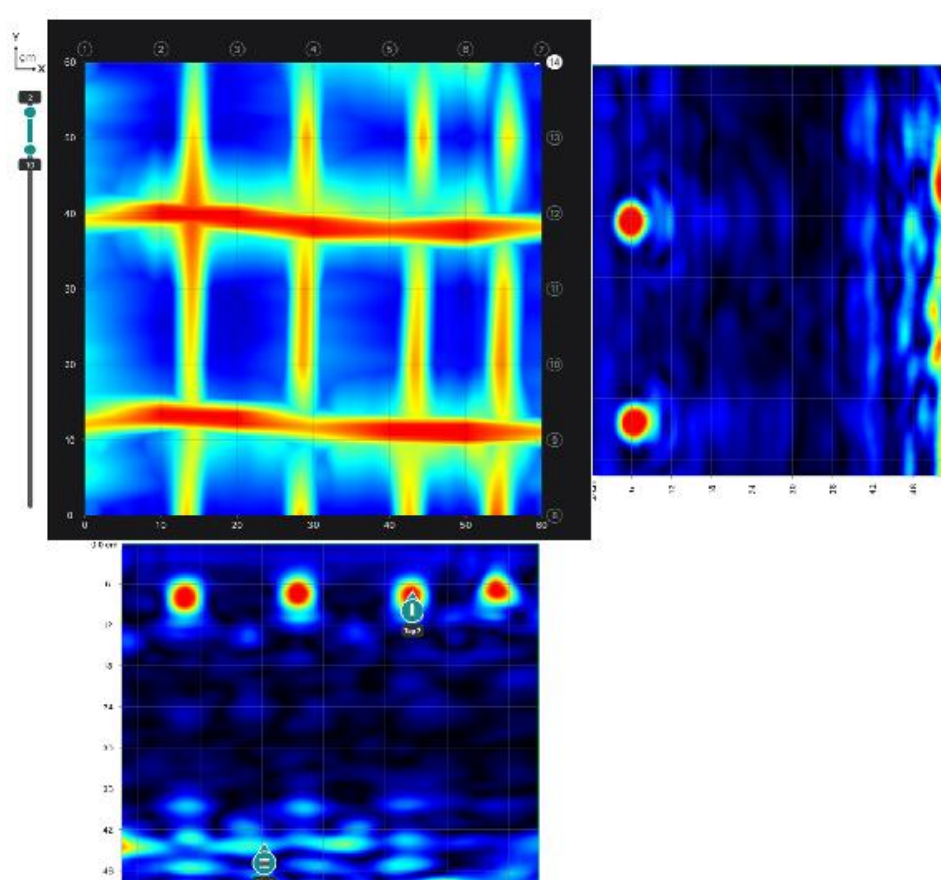


Obrázek 64 V levé části je zobrazen A scan, v pravé pak vodorvný B scan stojkou pod trámem č. 2. V horní části jsou patrné čtyři svislé výztuže, v dolní části jsou zvýrazněny reflexe výztuže u zadní stěny stojky a samotná zadní stěna naznačená čárkovanou čarou.

Na stojce č. 3 bylo provedeno měření i v roce 2019 georadarem Hilti PS 1000 X-Scan. Byly provedeny liniové skeny po obvodu stojky, svislý liniový sken pro určení polohy třmínků a plošný sken s rastrem 600 x 600 mm. Měření bylo provedeno ve výšce přibližně 1200 mm nad povrchem. Celkem bylo zaznamenáno 16 svislých výztuží, což odpovídá dokumentaci. Bylo zjištěno, že při betonáži došlo k posunu armokoše, na čelní straně skenu tak byla krycí vrstva až 60 mm, u zadní stěny přibližně 25 mm. Rozteč třmínků byla stanovena na 255 mm. Veškerá naměřená data tak odpovídají měření georadarem Proceq GP8000. Při liniovém ani při plošném skenu nebylo s radarem PS 1000 X-Scan detekováno echo zadní stěny.



Obrázek 65: Sken provedený přístrojem Hilti PS 1000 X-Scan v roce 2019, třetí stojka [21].



Obrázek 66: Sken provedený přístrojem Proceq GP8000 v roce 2020, třetí stojka.

4.4. Zhodnocení výsledků

Jak ukázalo měření, každý z georadarů vynikal v jiné oblasti. Štěrková hnízda ani jejich vazací dráty multifrekvenční georadar téměř nezaznamenal. Slabě zobrazoval i část předpínacího kabelu na masivním bloku. Naopak georadar Hilti nezachytil u mostního objektu zadní stěnu nosníku, ani výztuž v její blízkosti. V tabulce jsou stručně shrnuty výsledky měření z masivního bloku i z mostního objektu.

PROBLÉM	HILTI PS 1000 X-SCAN	PROCEQ GP8000
BLOK Č. 2		
Svislá výztuž	Ano	Ano
Relativní rozdíl průměru výztuže	Ne	Ano
Chráničky s před. lanem	Ano	Ano, chybné zobrazení
Štěrková hnízda	Ano, vazací drát	Velmi slabé
Echo zadní stěny (min. = 50 cm)	Ne	Ne
MOSTNÍ OBJEKT – NOSNÍK		
Podélná bet. výztuž	Ano	Ano
Svislé třmínky	Ano	Ano
Kanálky	Ano	Ano
Výztuž u zadní stěny	Ne	Velmi slabé
Echo zadní stěny (20–24 cm)	Ne	Ano
Delaminace	Ano	Ano
MOSTNÍ OBJEKT – VZPĚRA		
Svislá bet. výztuž	Ano	Ano
Třmínky	Ano	Ano
Výztuž u zadní stěny	Ne	Ano
Echo zadní stěny (45 cm)	Ne	Ano

Obrázek 67: Stručné hodnocení výsledků praktického měření.

5. ZÁVĚR

V teoretické části byly popsány nedestruktivní metody, které umožňují detekci nehomogenit a objektů v betonu. Rozebrány byly základní principy metod a možnosti jejich aplikace. U georadaru byly zmíněny podrobněji i metody vyhodnocování naměřených dat, jeho výhody a limity.

V praktické části byly testovány možnosti georadaru na železobetonových konstrukcích. Měření probíhalo se dvěma přístroji, osvědčeným georadarem Hilti PS 1000 X-Scan s klasickým impulzním vysíláním a relativně novým radarem Proceq GP8000 s technologií GPR Live a využitím více frekvencí vlnění během měření. Důraz přitom byl kladen na porovnání výsledků z obou přístrojů jak mezi sebou, tak i s reálnými podklady.

Výrazné objekty, jako první vrstvu výztuže, či předpínací kabely zachytily oba georadary. Rozdíly jsou patrné až v detailech. U masivního betonového bloku byl přístroj GP8000 schopen zobrazit relativní rozdíly v průměru svislých výztuží. U druhého georadaru se dají hodnoty pouze usuzovat z hloubky uložení. Naopak u šterkových hnízd a předpínací výztuže poskytoval lepší data přístroj PS 1000 X-Scan. Echo zadní stěny v hloubce 50 cm nezaznamenal pod vrstvou výztuže ani jeden z použitých radarů.

U mostního objektu v Brně byla pro porovnání dat naměřených přístrojem GP8000 použita data z bakalářské práce Davida Řezáče z roku 2019, který podrobně zkoumal objekt přístrojem Hilti PS 1000 X-Scan. Zde se projevil možnosti použité technologie multifrekvenčního skenování přístroje GP8000. Na hustě vyztužených nosnících byl schopen zaznamenat první vrstvu výztuže, předpínací kabely a slabě i výztuž u zadní stěny a zadní stěnu samotnou. Velmi dobré výsledky byly zjištěny i při měření na stojce mostu. Při tloušťce prvku 45 cm byla zaznamenána výztuž z obou stran i echo zadní stěny. Georadar Hilti PS 1000 X-Scan zaznamenal na nosníku pouze první vrstvu výztuže a předpínací kabely. Výztuž u zadní stěny ani zadní stěnu nezaznamenal ani na stojce mostu.

Z hlediska uživatelského rozhraní a zobrazování výsledků udělala firma Proceq u georadarů výrazný krok kupředu. Ovládání je velmi jednoduché a nabízí celou řadu lákavých možností, od zpracování dat přímo na místě včetně popisu jednotlivých hyperbol, přes zobrazování výsledků na měřeném objektu pomocí

iPadu, až po mód rozšířené reality. Nevýhodou může být připojení iPad zařízení pomocí Wi-Fi signálu. Při měření se několikrát radar odpojil a přerušil tím celé měření.

Nevýhodou nového přístroje oproti georadaru Hilti je omezení velikosti použitého rastru na maximálně 600 x 600 mm. Také nelze zobrazit naměřené hodnoty mimo rastr. Na druhou stranu, přístroj GP8000 umožňuje při plošném skenu kdykoliv ukončit linii skenování a lze tak vytvářet i nepravidelné plochy.

Multifrekvenční georadar je velkým krokem ve vývoji této metody, především při potřebě skenování ve větších hloubkách. Jak ovšem vyplývá z práce, naměřená data nemusí být vždy přesná. Jelikož je multifrekvenční georadar v diagnostice betonových konstrukcí relativně nové zařízení, můžeme u něj očekávat ještě velký technologický posun. S ním by mohlo dojít k odstranění několika málo nedostatků, zjištěných během měření.

6. BIBLIOGRAFIE

- [1] MAZUROVÁ, Milada, Vladimír VESELÝ a Michal ŠTEVULA. Nové trendy v technologii betonu. *BETON TKS*. 2003, 3(62003), 3-6. ISSN 12133116.
- [2] CARINO, Nicholas J. The Impact-Echo Method: An Overview. In: *Structures 2001* [online]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2001, s. 1-18 [cit. 2020-02-14]. DOI: 10.1061/40558(2001)15. ISBN 978-0-7844-0558-1. Dostupné z: <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40558%282001%2915>
- [3] *Obr. 1: Dutina*. online, 13.2.2020. Dostupné také z: <http://concrete-questions.com/Question/1004/What-is-cause-for-air-voids-in-concrete?>
- [4] *Obr. 2: Štěrkové hnízdo*. online, 14.2.2020. Dostupné také z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/materialy/samozhutnitelny-beton-novy-trend-ve-stavebni-praxi_41296.html
- [5] *Obr. 3: Trhlina*. online, 21.3.2020. Dostupné také z: <https://www.ceskestavby.cz/clanky/beton-ktery-se-sam-opravi-25752.html>
- [6] *Obr. 4: Delaminace*. online, 2020. Dostupné také z: <https://www.constrofacilitator.com/concrete-delamination-causes-and-how-to-avoid-it/>
- [7] HOBST, Leonard, Jiří ADÁMEK, Petr CIKRLÉ a Pavel SCHMID. *Diagnostika stavebních konstrukcí: přednášky*. Brno, 2005.
- [8] BALAYSSAC, Jean-Paul a Vincent GARNIER. *Non-destructive testing and evaluation of civil engineering structures*. 1st Edition. Kidlington, Oxford, UK: Elsevier, 2018. Structures durability in civil engineering set. ISBN 9781785482298.
- [9] SANSALONE, Mary a William STREETT. The Impact-Echo Method. *E-Journal of Nondestructive Testing* [online]. New York: e-Journal of Nondestructive Testing, 1998 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.ndt.net/article/0298/streett/streett.htm#author>
- [10] Krátké ohlédnutí za vývojem radiačních metod ve stavebnictví za posledních 25 let. *BETON*. 2015, (32015), 8-10.
- [11] SCHMID, Pavel. *Základy zkušebnictví*. Vyd. 2. opr. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2584-9.
- [12] *Obr. 9: Radiografický film*. online, 24.2.2020. Dostupné také z: <http://www.eihawaii.com/services/concrete-radiography/>
- [13] *Obr. 11: Pundit 250 Array*. online, 20.5.2020. Dostupné také z: <https://www.proceq.com/products/list/Product//pundit-live-array-pro/>
- [14] ANTON, Ondřej. *Základy zkušebnictví: návody do cvičení*. 1. Brno: CERM, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2079-.

- [15] GEHRIG, Michael, Derek MORRIS a John BRYANT. Ground Penetrating Radar for Concrete Evaluation Studies. *ResearchGate* [online], 1-17 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/252266154_Ground_Penetrating_Radar_for_Concrete_Evaluation_Studies
- [16] *Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. First Printing. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2013. ISBN 0-87031-820-9.
- [17] Looking into Concrete – Multiple Frequency Usage in Radar Products to Detect Structural Parameters and Defects Faster and More Accurately. In: *15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing* [online]. Singapore: November 13-17, 2017, s. 1 - 3 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?showForm=off&id=22264>
- [18] *Obr. 19: Proceq GP8000*. online, 20.5.2020. Dostupné také z: <https://www.proceq.com/product/proceq-gp8000/>
- [19] *Obr. 21: Hilti PS 1000 X-Scan*. online, 20.5.2020. Dostupné také z: https://www.hilti.cz/c/CLS_MEA_TOOL_INSERT_7127/CLS_CONCRETE_SCANNERS_7127/r6436760?itemCode=2223494
- [20] *Mostní list mostu pozemní komunikace 50-003..2*. www.bms.clevera.cz, 2020.
- [21] ŘEZÁČ, David. *Stavební průzkum a diagnostika konstrukce*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Ondřej Anton, Ph.D.
- [22] *BETONOVÉ MOSTY II: vybrané problémy navrhování mostů*. Brno, 2007.

7. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 1: Dutina u povrchu betonu [3].	13
Obrázek 2: Štěrkové hnízdo [4].	13
Obrázek 3: Trhlina při povrchu betonu [5].	14
Obrázek 4: Delaminace [6].	14
Obrázek 5 Princip metody impact-echo.	16
Obrázek 6: Vlny šířící se prostředím tělesa. Převzato a upraveno z [2].	17
Obrázek 7: Zachycení vln pomocí přijímače. Převzato a upraveno z [2].	17
Obrázek 8: Zobrazení spektra amplitud. Převzato a upraveno z [2].	19
Obrázek 9: Zobrazení betonářské výztuže pomocí radiografického filmu [12].	21
Obrázek 10: Princip vzniku geometrické neostroty u prozařovaného objektu.	22
Obrázek 11: Příklad ultrazvukového přístroje s více sondami [13].	24
Obrázek 12 Různé způsoby prozvučování konstrukce.	24
Obrázek 13: Příklady tvaru přijaté křivky po průchodu různými poruchami [14].	26
Obrázek 14: Ultrazvuková odrazová metoda při zjišťování trhliny v betonu.	26
Obrázek 15: Závislost koeficientu R. Převzato a upraveno z [15].	28
Obrázek 16: Změna polarity vlny na rozhraní beton – vzduch.	29
Obrázek 17: Vznik hyperboly při liniovém skenování.	30
Obrázek 18: Typy zobrazení naměřených dat. Wiggle plot převzat z [16].	31
Obrázek 19: Proceq GP8000 se zobrazovacím zařízením (Apple iPad) [18].	34
Obrázek 20: Důvod využití více frekvencí u georadaru [18].	35
Obrázek 21: Georadar Hilti PS 1000 X-Scan [19].	35
Obrázek 22: Půdorys měřeného bloku 2.	37
Obrázek 23: Čelní pohled (pohled A) na měřený blok 2.	38
Obrázek 24: Pohled do vnitřní struktury betonového bloku 2.	38
Obrázek 25: Pohled na blok 2 umístěný v areálu Fakulty stavební.	39
Obrázek 26: Rozložení plošných skenů na čelní straně bloku 2 (Pohled A).	40
Obrázek 27: Výsledný pohled A, složený ze šesti dílčích plošných skenů.	41
Obrázek 28: Liniové vodorovné skeny	42
Obrázek 29: 3D zobrazení prvního plošného skenu.	43
Obrázek 30: Mód rozšířené reality promítá na blok naměřená data.	43
Obrázek 31: 3D zobrazení v rozšířené realitě na iPadu.	44
Obrázek 32 Dílčí B scan třetího plošného scanu.	45
Obrázek 33: Svislé liniové skeny.	46
Obrázek 34: Rozložení rastrů pro plošné skeny přístrojem Hilti PS 1000 X-Scan.	47
Obrázek 35: Výsledný pohled A složený ze tří plošných skenů.	48
Obrázek 36: Plošný sken 2 nad štěrkovým hnízdem.	49
Obrázek 37: 3D vizualizace plošného skenu č. 2.	49
Obrázek 38: Liniový vodorovný sken.	50
Obrázek 39: Liniové svislé skeny.	51
Obrázek 40: Blok č. 2 po provedení jádrových vývrtů.	51

Obrázek 41: Jádrový vývrt č. 1 (levá část kabelu).....	52
Obrázek 42: Pohled do prostoru po jádrovém vývrtu č. 1.	52
Obrázek 43: Jádrový vývrt č. 2. Čelní strana se nachází dole, spodní vlevo.	53
Obrázek 44: Prostor po jádrovém vývrtu č. 2.	53
Obrázek 45: Jádrový vývrt č. 3.....	53
Obrázek 46: Kamenivo ze štěrkového hnízda zasaženého vrtem č. 3.....	53
Obrázek 47: Most 50-003..2 Ostravská přes Bělohorskou.	55
Obrázek 48: Schéma měřené stojky č.3 dle dohledané stavební dokumentace [21].	55
Obrázek 49: Schématický příčný řez.....	56
Obrázek 50: Řez typickým nosníkem DS-A [22].....	56
Obrázek 51: Rozmístění výztuže a předpínacích kabelů na nosníku DS-A [21].	57
Obrázek 52 Trám 1 u opěry č. 1. Zobrazení svislé i vodorovné výztuže v hloubce 4 cm. .	58
Obrázek 53 Trám 1 u opěry č. 1. Zobrazení plošného skenu v hloubce 7 cm.	58
Obrázek 54: Linie skenu 24.	59
Obrázek 55 Nosník 1 u opěry č. 2.....	60
Obrázek 56 Sken v příčném směru nad detekovanou vadou.	60
Obrázek 57: Sken provedený v roce 2019 georadarem Hilti PS 1000 X-Scan [21].	61
Obrázek 58: Sken provedený v roce 2020 georadarem GP8000 na stejném nosníku.....	61
Obrázek 59 Trám č. 2 u opěry č. 2. Zobrazení plošného skenu.	62
Obrázek 60 Trám č. 2 u opěry č. 2. Dílčí B scan.....	62
Obrázek 61: B Scan vodorovnou rovinou (vlevo) a svislou rovinou (vpravo).....	62
Obrázek 62 Plošný sken stojky pod trámem č. 2 doplněn dílčím B skenem.	63
Obrázek 63 Plošný sken stojky pod trámem č. 2. Zobrazena je hloubka 34 - 42 cm.	64
Obrázek 64 V levé části A scan, v pravé vodorovný B scan stojkou pod trámem č. 2.....	65
Obrázek 65: Sken přístrojem Hilti PS 1000 X-Scan v roce 2019, třetí stojka [21].....	66
Obrázek 66: Sken provedený přístrojem Proceq GP8000 v roce 2020, třetí stojka.....	66
Obrázek 67: Stručné hodnocení výsledků praktického měření.	67