

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

**NEDESTRUKTIVNÍ DIAGNOSTIKA
KONSTRUKCÍ VOZOVEK POZEMNÍCH
KOMUNIKACÍ GEORADAREM**

DISERTAČNÍ PRÁCE

2013

Ing. Radek Matula

UNIVERSITY OF PARDUBICE
JAN PERNER TRANSPORT FACULTY

**NONDESTRUCTIVE DIAGNOSTICS
OF ROAD PAVEMENT STRUCTURES
BY GROUND PENETRATING RADAR**

DOCTORAL DISSERTATION

2013

Ing. Radek Matula

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Při vypracovávání této práce jsem využíval výzkumnou infrastrukturu Centra dopravního výzkumu, v. v. i. pořízenou především v rámci projektu Dopravního VaV centra (CDV PLUS) - číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0064, spolufinancovaného z Operačního Programu Výzkum a Vývoj pro Inovace.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 06. září. 2013

Radek Matula

Poděkování

Rád bych poděkoval svému školiteli panu prof. Ing. Karlu Pospíšilovi, Ph.D., MBA., za vedení mé disertační práce, cenné rady a umožnění zpracování této disertační práce.

Dále bych rád poděkoval kolegům panu Ing. Josefu Strykovi, Ph.D., vedoucímu oblasti dopravní infrastruktury Centra dopravního výzkumu v. v. i., panu Ing. Petru Zedníkovi, vedoucímu oblasti geotechniky a také ostatním kolegům z Centra dopravního výzkumu, v. v. i. za podnětné diskuse, profesorům z Dopravní fakulty Jana Pernera za získání nových zkušeností a pánům Františku Řehůrkovi a Radku Bednářovi, laborantům silniční laboratoře Centra dopravního výzkumu v. v. i. za pomoc při přípravě a realizaci laboratorních zkoušek a zkoušek in situ. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, zejména své manželce Lucii, za vytrvalou podporu a velké množství trpělivosti v průběhu mého studia.

ABSTRAKT

Výzkum prezentovaný v předkládané disertační práci je zaměřen na zjištění limit přesnosti určení přesné polohy kluzného trnu nebo kotvy (výztužný prvek) při použití georadaru (GPR) tak, aby mohla být identifikována potenciálně riziková místa, kde může vlivem nesprávně uloženého výztužného prvku vzniknout v CB krytu dříve či později porucha.

Kluzné trny a kotvy ve spárách cementobetonového krytu, zejména dálničních vozovek, mají zabezpečit spolupůsobení jeho sousedních desek tak, aby nedocházelo mj. k jejich vertikálnímu posuvu vůči sobě. Výztužné prvky jsou do budoucích spár vkládány při stavbě CB krytu většinou strojově, přitom technologie pokládky a následného hutnění betonové směsi mohou způsobit takové vychýlení polohy výztužného prvku, že jeho konečná poloha ve ztvrdnutém betonu neodpovídá normovým hodnotám.

Výzkum provedený v rámci této disertační práce vytváří jeden komplex s výzkumným projektem řešeným v Centru dopravního výzkumu, v. v. i. (CDV), který zkoumá vliv míry nesprávného uložení výztužného prvku na kvalitu výsledného díla a mechanismy, které se přitom uplatňují. Práce také konfrontuje použití georadaru v diagnostice vozovek pozemních komunikací s jinými metodami (zejména s metodou MIT Scan), ověřuje výsledky jádrovými vývrty a ukazuje možné kombinace s rázovým zařízením FWD.

Na základě výsledků této disertační práce v kombinaci s výsledky zmíněného projektu CDV bude možno při přejímacích zkouškách nových či rekonstruovaných úseků dálnic spolehlivě identifikovat místa, kde lze očekávat problémy vlivem skryté vady, tzn., nesprávně uloženého výztužného prvku.

KLÍČOVÁ SLOVA

georadar, nedestruktivní metoda, pozemní komunikace, vozovka, cementobetonový kryt, kluzný trn, kotva, rychlost šíření elektromagnetického signálu, relativní permitivita prostředí.

TITLE

Nondestructive diagnostic of road pavement structures by ground penetrating radar

ANNOTATION

The research presented in this dissertation is focused on finding the accuracy limit of determining an accurate position of dowels and tie bars when using a ground penetrating radar (GPR), so that potentially risky spots where an inaccurately laid reinforcement element may sooner or later cause a fault in concrete pavement could be identified.

Dowels and tie bars in concrete pavement joints, particularly in motorway pavements, are to guarantee the interaction of the neighbouring slabs, so that there would be no vertical displacement towards each other. The reinforcement elements are usually laid in the future joints in concrete pavements by machines, but the technology of laying and subsequent compacting of concrete mixture may cause such displacement of a reinforcement element that its final position in hardened concrete is out of standard values.

The research conducted within this dissertation forms a single complex with a research project in Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. (Transport Research Centre), which is focused on the extent of incorrect laying of reinforcement elements on the quality of complete work and on mechanisms which are applied. The work also confronts the use of georadar in the diagnostics of road pavements with other methods (particularly with MIT Scan method), verifies the results with test core holes and shows possible combinations with FWD deflectometer (falling weight deflectometer).

Based on the results of this dissertation in combination with results of the above mentioned CDV project, it will be possible, during acceptance tests of new and reconstructed motorway segments, to reliably identify spots where problems can be expected due to hidden faults, i.e. an incorrectly laid reinforcement element.

KEYWORDS

ground penetrating radar, non-destructive method, road, pavement, concrete pavement, dowel bar, tie bar, velocity of radar signal, relative dielectric permittivity.

OBSAH:

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	9
2 SOUČASNÝ STAV POZNATKŮ	11
2.1 Georadar	11
2.1.1 Uplatnění georadaru	12
2.1.2 Sestava georadaru	12
2.1.3 Princip georadaru	13
2.1.4 Základní vztahy	13
2.1.5 Metody zjištění rychlosti šíření EM signálu	15
2.1.6 Ztráta intenzity a útlum EM signálu	15
2.1.7 Důležité rady a podmínky pro měření GPR	15
2.1.8 Anténní systémy	16
2.1.9 Režimy měření	19
2.1.10 GPR Software	20
2.1.11 Zpracování GPR dat	23
2.2 Problematika umístování kluzných trnů a kotev v CB krytu	24
2.2.1 Kluzné trny a kotvy	24
2.2.2 Uložení kluzných trnů a kotev	25
2.2.3 Osazování kluzných trnů v pracovní spáře	26
2.2.4 Osazování do armokošů	26
2.2.5 Osazování kluzných trnů pomocí finišerů	27
2.2.6 Osazování kotev pomocí finišerů	28
2.2.7 Tolerance pro polohu kluzných trnů a kotev v CB krytech	29
2.3 Rešerše literatury	31
2.3.1 Stanovení polohy kluzných trnů a kotev	32
2.3.2 Srovnávací měření tloušťek konstrukčních vrstev vozovek	32
2.4 Rešerše platných předpisů	33
2.4.1 ASTM D6432-11	33
2.4.2 ASTM D4748-10	34
2.4.3 ASTM D6087-08	34
2.4.4 DMRB 7.3.2 (UK, 2008)	34
2.4.5 DMRB 3.1.7 (UK, 2006)	36
2.4.6 Merkblatt B 10 (Německo, DGZfP, 2008)	37
2.4.7 GSSI manuály (USA, 2008)	38
2.4.8 TP 233 – technické podmínky Ministerstva dopravy ČR (1. 7. 2011)	38
2.4.9 Ostatní předpisy a projekty	39
2.5 Kritické zhodnocení současného stavu	40
3 CÍL PRÁCE	41
4 METODY A ZAŘÍZENÍ, VLASTNÍ ŘEŠENÍ	42
4.1 Předpoklady	42
4.2 Metody a zařízení	42

4.2.1	Použité statistické metody při výpočtu výsledků měření	44
4.3	Návrh a realizace laboratorních vzorků	49
4.3.1	Cementobetonové desky tl. 100 mm a 150 mm	49
4.3.2	Cementobetonová deska tl. 240 mm	49
4.4	Stanovení rychlosti šíření EM signálu, dielektrické konstanty a posouzení metodami kalibrace CMP a WARR	52
4.4.1	Laboratorní měření CB desky o tloušťkách 100 mm a 150 mm.	52
4.4.2	Laboratorní měření CB desky tloušťky 240 mm	60
4.4.3	Laboratorní měření metodami kalibrace CMP a WARR	64
4.5	Stanovení rozhraní vrstvy CB desky s podkladní vrstvou vozovky	68
4.6	Stanovení polohy výztužných prvků georadarem	70
4.6.1	Laboratorní měření minimální horizontální vzdálenosti kluzných trnů a kotev	70
4.6.2	Laboratorní měření polohy kluzných trnů zabudovaných ve zkušební CB desce	73
4.7	Návrh a konstrukce mobilního zařízení pro měření in situ	77
4.8	Srovnávací měření polohy výztužných prvků georadarem a vybranými jinými nedestruktivními zařízeními	80
4.8.1	Srovnávací měření na dálnici D1	80
4.8.2	Srovnávací měření v Pelhřimově	82
4.8.3	Srovnávací měření georadaru se zařízením MIT-Scan-2	90
4.8.4	Srovnávací měření NDT metod na pokusném úseku s trny a kotvami	93
4.8.5	Zkoušky přenosu zatížení na spárách rázovým zařízením FWD a stanovení polohy kluzných trnů na dvou pokusných úsecích	100
4.8.6	Měření polohy kluzných trnů a kotev in situ	110
4.9	Uspořádání měření	113
4.9.1	Laboratorní měření	113
4.9.2	Měření in situ	113
5	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	114
5.1	Laboratorní měření	114
5.2	Měření in situ	116
6	DISKUSE VÝSLEDKŮ	122
6.1	Interpretace výsledků	123
6.1.1	Poloha kluzných trnů v cementobetonovém krytu	123
6.1.2	Poloha kotev v cementobetonovém krytu	123
6.2	Použitelnost výsledků z hlediska přesností použitých metod	126
6.3	Dopad výsledků do praxe	127
7	ZÁVĚR	128
8	LITERATURA	129
8.1	Normy a předpisy:	129
8.2	Zprávy, publikace a manuály:	131
8.3	Vlastní publikační činnost	135

Použité termíny a zkratky

Základní **termíny a definice** jsou vybrány z technických podmínek Ministerstva dopravy ČR TP 233, ze stránek asociace EuroGPR, z ASTM D6432-11 a z dalších předpisů a norem, které jsou zmíněny v této práci.

Anténní systém – elektronické zařízení, umožňující vysílání elektromagnetického pulzu do zkoumaného prostředí a zaznamenávající odrazy, vznikající na rozhraní různých materiálů tohoto prostředí.

Centrální vysílací frekvence antény (střední frekvence antény) – největší zastoupení frekvence ve vysílaném frekvenčním spektru, nejčastěji od 10 MHz do 6 GHz.

Čas nula – čas, který v záznamu měření georadarem odpovídá začátku průchodu signálu zkoumanou konstrukcí (povrch konstrukce); zpravidla je potřeba ho nastavit; jde o první krok při zpracování naměřených dat (zero time).

Dielektrická konstanta materiálu – viz termín: relativní permitivita materiálu.

Filtrace georadarového záznamu – úprava záznamu pomocí speciálních algoritmů a programů, se zaměřením na frekvence, šумы, zvětšení odstupů užitečného signálu od šumů, zesílení signálu (zpravidla směrem do hloubky) apod.

Georadarový záznam – záznam z měření, viz sken a radargram; z jednotlivých záznamů měření provedených v mřížce se také vytváří 3D zobrazení zkoumaného prostředí (C sken).

Krok měření (vzorkování), je horizontální vzdálenost mezi dvěma skeny; obvykle je řízena na základě počtu otáček zařízení, měřicí ujetou vzdáleností.

Permeabilita materiálu – fyzikální veličina (μ), udávající míru magnetizace v důsledku působícího magnetického pole, jednotka: $\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$.

Permitivita materiálu – fyzikální veličina (ϵ), která v případě elektromagnetického vlnění popisuje vztah mezi vektory elektrického pole a elektrické indukce, jednotka: $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$, podrobněji viz kap. 2.1.4.

Radargram – záznam z kontinuálního měření, který se skládá z řady skenů, které jsou od sebe vzdáleny podle zvoleného kroku měření.

Relativní permitivita materiálu (ϵ_r) – podíl permitivity daného materiálu a permitivity vakua, podrobněji viz kap. 2.1.4., bezrozměrná veličina.

Rozlišovací schopnost - nejmenší možná vzdálenost mezi dvěma body v prostředí, při níž jsou zobrazeny v georadarovém záznamu jako dvě od sebe odlišitelné struktury; jde jednak o schopnost rozlišení v horizontálním směru a rozlišení ve vertikálním směru (např. rozlišení dvou vrstev, odlišení dvou výztuží v záznamu).

Rychlost šíření EM signálu – rychlost, kterou se šíří vyslaný elektromagnetický impulz ve formě vlnění zkoumaným prostředím, které je zpravidla složeno z různých vrstev a objektů z různých materiálů; tato rychlost je pro různé materiály různá a je závislá na dielektrické konstantě příslušného materiálu.

Sken – zpravidla se tak označuje záznam z měření georadarem v jednom bodě, jde o záznam amplitud jednotlivých odrazů vyslaného EM signálu v čase (časový záznam), tento primární, zpravidla nefiltrovaný, georadarový záznam se následně filtruje a za pomoci zjištěných/stanovených rychlostí šíření elektromagnetického signálu jednotlivými materiály zkoumané konstrukce se převádí na hloubkový záznam.

Střední frekvence antény – viz termín: centrální vysílací frekvence antény.

Vodivost (konduktivita, též měrná elektrická vodivost) – fyzikální veličina (γ), která popisuje schopnost látky vést elektrický proud; konduktivita závisí na teplotě; jednotka: $S \cdot m^{-1}$.

Zkratky:

ASTM – americká nezávislá standardizační organizace pro rozvoj a norem (American Society for Testing and Materials)

CB kryt – cementobetonový kryt

CEN - evropský výbor pro normalizaci (Comité Européen de Normalisation)

CMP - metoda společného reflexního bodu; způsob měření pro stanovení rychlosti šíření EM signálu prostředím nebo pro nastavení času nula (Common Mid-point občas také Common Depth-point)

DGZfP – německá společnost sdružující pracovníky a firmy působící v oblasti nedestruktivního testování (Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.)

DMRB – soubor technicko-kvalitativních podmínek – Velká Británie (Design Manual for Road and Bridges)

EM – elektromagnetický (electromagnetic)

ETSI - evropský institut pro normalizaci v telekomunikacích (European Telecommunications Standards Institute)

EuroGPR - evropská asociace výrobců a provozovatelů GPR systémů, www.eurogpr.org

FHWA - federální správa silnic v USA (Federal Highway Administration)

FWD - rázové zařízení skupiny A dle ČSN 73 6192 používané k hodnocení únosnosti vozovek (Falling Weight Deflectometer)

GPR – georadar (Ground Penetrating Radar, Ground Probing Radar, Georadar)

GPS - vojenský globální družicový polohový systém provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických, s jehož pomocí je možno určit polohu a přesný čas kdekoli na Zemi (Global Positioning System)

GSSI - americký výrobce GPR systému (Geophysical Survey Systems, Inc.)

NDT – nedestruktivní testování (Non Destructive Testing)

PK - pozemní komunikace

RADAN – software pro měření, vyhodnocení a interpretaci GPR dat amerického výrobce GSSI

Radar – měřicí zařízení, které podle odraženého pulzu elektromagnetických vln zjišťuje výskyt, polohu, směr a rychlost pohybu vzdálených předmětů (Radio Detection and Ranging)

ReflexW – německý software pro vyhodnocení a interpretaci GPR dat

TP - technické podmínky Ministerstva dopravy

SHRP – americký výzkumný program (Strategic Highway Research Programme)

SIR 20 – dvoukanálová jednotka sběru dat americké firmy GSSI

WAR(R) - metoda využívající vícero reflexních bodů, způsob měření pro stanovení rychlosti šíření EM signálu prostředím nebo pro nastavení času nula (WAR - Wide Angle Reflection, někdy také WARR - Wide Angle Reflection Refraction).

1 Úvod do problematiky

Zjištění kvality vozovky po jejím vybudování před uvedením do provozu a postižení degradačních procesů, které se v její konstrukci objevují v době jejího zatěžování provozem, jsou základními předpoklady pro včasná přijímání opatření, jež vedou k optimálnímu využívání finančních prostředků vynakládaných na jejich výstavbu, údržbu i opravy. Skryté vady, které jsou ve vozovce při jejím převzetí či v průběhu její záruční doby, mají vždy za následek zvýšení nákladů na pozdější údržbu či opravy. Tyto náklady jdou tak k tíži veřejných rozpočtů namísto, aby byly uplatněny v reklamačním řízení a uplatňovány po zhotoviteli stavby.

Vady vzniklé degradačními procesy ve vozovce v době jejího provozu, nejsou-li odhaleny včas, mají za následek propagaci problémů do strukturálních změn ve vozovce. V takovém případě správce komunikace reaguje až v době, kdy jsou poruchy na vozovce zjevné, což znamená významné navýšení ceny odpovídající údržby či opravy.

Nedestruktivní diagnostika vozovek je jedním z nástrojů, které jsou s to postihnout stav a vývoj skrytých imperfekcí ve vozovce. Jediným reprezentantem nedestruktivního strukturálního zařízení, které se objevuje v systému hospodaření s vozovkami, je rázové zařízení (Falling Weight Deflectometer – FWD), viz ČSN 73 6192. Tímto zařízením lze charakterizovat lokální přetvárné charakteristiky vozovky, lze jím zjistit jen ty vady, které se vyskytují na místě zkoušky. Interpretace zjištěných vad je v tomto případě navíc jen nepřímá.

Téma disertační práce se zabývá použitím georadaru (Ground Penetrating Radar - GPR) jako nástroje pro nedestruktivní diagnostiku vozovek. GPR na rozdíl od FWD, je-li umístěn na pohyblivé základně, vozíku či vozidle, je schopen zaznamenat strukturální změny ve vozovce v linii svého záběru, není tak jeho funkce omezena jen na detekci diskrétních výsledků z místního šetření. Georadar však není dosud uznávaným zařízením, které by se uplatnilo v silničním stavitelství, protože nejsou pro jeho použití stanovena přesná pravidla a způsoby interpretace naměřených výsledků pro jednotlivé aplikace.

Stěžejním cílem práce je připravit podklady pro vytvoření/doplnění předpisu/normy o efektivním uplatnění georadaru při hodnocení správného uložení výztužných prvků (kluzných trnů a kotev) v CB krytu vozovky pozemních komunikací. Způsob zajištění podkladů i nových zkušeností je umocněn možností použít vlastní zařízení při experimentálních měřeních, které se realizují v laboratorních a skutečných podmínkách a možností porovnat relevantní výsledky se zařízeními pracujícími na podobném principu, nebo také s přímými, či destruktivními metodami. Optimální nastavení aparatury, rastr měření, kalibrace zařízení, stanovení přesnosti měření a automatizace při vyhodnocení naměřených dat jsou stále otevřenými tématy pro mnohé aplikace georadaru. Pestrost možných i doposud neprobádaných aplikací, neustálý vývoj georadarových systémů a snaha stále něco zlepšovat jsou motory pro získávání nových zkušeností, propastí pak novým uživatelům, často i komerčně využívajícím zařízení, kteří pro svou práci potřebují jednoznačná pravidla a doporučení, vyplývající již z ověřených výsledků vědecké činnosti. Zjištění nepřípustných posunů a vychýlení uložených výztužných prvků georadarem v CB deskách referenčních úseků, vybudovaných před samotnou pokládkou CB krytu, nebo při samotné pokládce, mohou umožnit zhotoviteli stavby optimálně nastavit/upravit zařízení a metody při výstavbě a také nabízejí investorovi stavby průběžnou kontrolu správnosti uložení výztužných prvků např. při průkazných zkouškách.

Z praxe bylo georadarem zjištěno, že k nepřípustným posunům a vychýlením výztužných prvků dochází velice často, přesto tato zjištění byla zpochybněna z důvodu nedostačující přesnosti georadarové metody.

V rámci disertační práce byla studována závislost naměřených výsledků polohy výztužných prvků georadarem se skutečnou polohou, získaných z vlastních laboratorních experimentů a srovnávacích měření nezávislými organizacemi na pokusných úsecích i v terénu.

Práce je zakončena přehledem literárních zdrojů, které byly podrobeny studiu a soupisem vlastních publikační činnosti autora, ze kterého je patrné jeho odborné zaměření.

2 Současný stav poznatků

Georadar patří do skupiny zařízení, které se ve světě uplatňuje v mnoha oborech lidské činnosti. Jedním z nich je stavební inženýrství. V této kapitole jsou uvedeny zásadní obecné informace, týkající se georadaru, spadající do oblasti nedestruktivní diagnostiky vozovek pozemních komunikací.

Vlastní řešení disertační práce se bude zabývat pouze jedné aplikace z této oblasti – **nedestruktivního zjišťování polohy kluzných trnů a kotev v cementobetonových vozovkách georadarem.**

Problematika umístění kluzných trnů a kotev v cementobetonovém krytu je představena v kapitole 2.2.

Disertační práce se ve svém rozsahu **nebude zabývat** požadavkům na materiály CB krytů (cement, kamenivo, výztužné prvky, hmoty na ošetřování betonu, obsah vzduchu), funkčními požadavky (požadovanými vlastnostmi CB krytů), konstrukčními zásadami (rozměry desek, spáry, kluzné trny a kotvy), technologickými postupy prací a požadavky na správnou polohu kluzných trnů a kotev, protože jsou v současné době předmětem řešení projektu Technologické agentury České republiky: **TA02031195 – „Poloha kluzných trnů a kotev v cementobetonových krytech vozovek a význam jejich správného umístění na chování a životnost krytů“**

V dalších kapitolách jsou uvedeny řešerše, týkající se georadaru a jeho aplikacím při diagnostice vozovek pozemních komunikací a v závěru kapitoly je zhodnocen současný stav.

2.1 Georadar

Georadar (GPR: Ground Penetrating Radar, občas také: Ground Probing Radar) je diagnostické nedestruktivní zařízení, které podává informaci o vnitřní struktuře nekovových materiálů a konstrukcí. GPR je relativně novou geofyzikální technikou, která v posledních desetiletích zaznamenala výrazný pokrok a dnes nabízí rozsáhlou skupinu aplikací. V České republice se pro označení GPR vžil název georadar nejen podle nejčastěji realizovaných aplikací v oboru geologie.

Historie georadaru sahá do roku 1888, kdy byla Heinrichem Hertzem laboratorně potvrzena teorie J. Clerka Maxwella o existenci elektromagnetického vlnění v elektromagnetickém poli pomocí jiskrového výboje. Bylo také demonstrováno, že EM vlny mají všechny již známé vlastnosti světelných vln – odraz (reflexi), lom (refrakci), interferenci aj., poté bylo potvrzeno, že světlo je zvláštním druhem elektromagnetického vlnění.

V roce 1895 ruský fyzik A. S. Popov a italský vynálezce G. Marconi začali využívat elektromagnetické vlnění k přenosu signálu od vysílače k přijímači.

V roce 1904 byl představen první radar (CW radar) s možností využití elektromagnetického vlnění k detekci pozemních objektů. V roce 1926 byla v Německu patentována pulzní radarová technologie p. Hulsenbeckem a byl prezentován význam relativní permitivity prostředí.

První průzkumy byly prováděny v solných dolech a při mapování mocnosti vrstev sněhu a ledu. První georadar byl vyvinut v šedesátých letech minulého století v laboratoři MIT Lexington. V sedmdesátých letech minulého století dochází k prudkému rozvoji komerční výrobou GPR systémů. V roce 1974 americká firma GSSI vyrábí a prodává analogový systém GPR.

Zařízení byly většinou objemných rozměrů, nepřenositelné, obsahující antény, které jsou propojeny s řídicí jednotkou dlouhými kabely. Softwary umožňovaly ukládat naměřená data na pevný disk, nebo tisknout data.

V devadesátých letech minulého století nastal technologický pokrok georadaru v hardwaru a softwaru - analogové zpracování signálů bylo převedeno na zpracování digitální, systémy jsou vícekanálové – pracují s více anténami, jsou menších rozměrů, obsahují výkonnější procesory, umožňují ukládat větší množství dat, software je jednodušší a přehlednější s novými možnostmi zpracování dat.

Současné GPR systémy se staly kompaktní, spolehlivé, uživatelsky nenáročné nástroje, schopné pracovat pod dohledem dobře vyškoleného, technicky zkušeného pracovníka. V závislosti na konkrétním modelu a výrobci umožňuje uživateli většina současných systémů získat a interpretovat velké množství podpovrchových dat v relativně krátkém čase, jakož i stanovit příslušné výsledky v reálném čase s vysokým stupněm spolehlivosti. Řada softwarů umožňuje také nové možnosti zpracování dat při konkrétních aplikacích včetně 3-D interpretací.

Budoucnost georadaru konkrétně v oblasti diagnostiky vozovek závisí zcela určitě na správcích a zhotovitelích, jestli tuto nedestruktivní metodu budou využívat. Uplatnění georadaru stále roste ve výzkumných aplikacích, později, do praxe by se mohly prosazovat např. pomocí srovnávacích měření, ve kterých by byly prokázány jejich přednosti.

2.1.1 Uplatnění georadaru

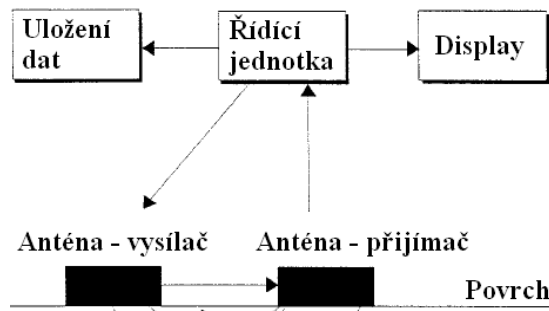
Georadar se dnes uplatňuje v různých oborech lidské činnosti, mezi ty hlavní patří následující:

- archeologie (mapování nalezišť, hledání objektů, materiálů, podzemních chodeb),
- regionální geologie (geologické mapování oblasti),
- inženýrská geologie (průzkumy před zahájením stavebních činností, průzkum dna a nánosů pod vodními plochami),
- stavební inženýrství (diagnostika vozovek pozemních komunikací, železničního svršku, diagnostika betonových a železobetonových konstrukcí - včetně mostů, tunelů a opěrných zdí - konstrukčních částí staveb, obvodových zdí apod.),
- glaciologie (zjištění mocnosti sněhu a ledu, zlomů a prasklin v ledovcích),
- hydrogeologie (zjištění hladiny podzemní vody),
- ekologie (lokalizace a šíření znečištění různým prostředím),
- další obory a průzkumy: hornictví, lesnictví, ložisková geologie, kriminalistika, vojenství, detekce pohřešovaných osob při katastrofách, detekce min a nevybuchlého arzenálu aj.

2.1.2 Sestava georadaru

Zařízení se skládá z následujících základních částí uvedených na obr. 1:

- antény, včetně potřebných převodníků (převážně se používají antény, kde vysílač a přijímač jsou umístěny v jednom boxu a tím pádem je jejich vzdálenost neměnná),
- řídicí jednotka, která může být jedno nebo vícekanálová (zahrnuje také časovač a generátor pulzů),
- notebook s dostatečně velkým prostorem pro zálohování dat a kvalitním displejem,
- koaxiální kabely různých délek,
- zařízení pro měření ujeté vzdálenosti (odometr).

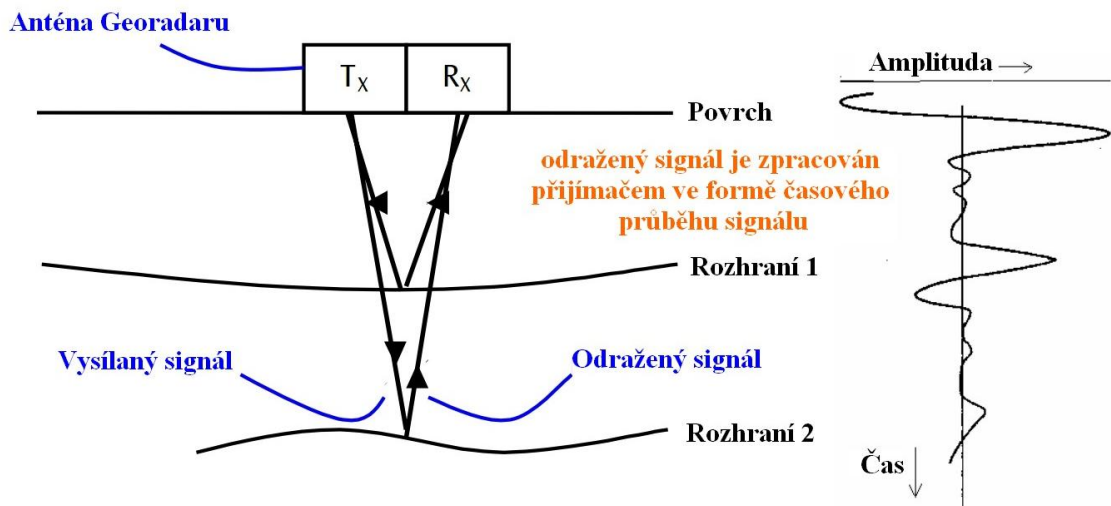


Obr. 1 Měřicí sestava GPR - základní komponenty

Technika GPR používaná k diagnostice vozovek využívá vysokofrekvenční elektromagnetické vlnění v rozsahu několika set MHz do několika GHz.

2.1.3 Princip georadaru

EM impulz vyslaný z vysílače antény se šíří prostředím, mění se jeho rychlost a postupně klesá jeho intenzita. Část signálu je odražena zpět při každém přechodu mezi různými prostředími (reflection), dokud není signál zcela utlumen (obr. 2). Záznam z těchto odrazů nám dává informaci o tom, jaké vlastnosti má zkoumané prostředí. Nejpodstatnější jsou čas průchodu signálu konkrétní vrstvou, amplitudy signálů odpovídající jednotlivým odrazům a jejich vzájemný poměr.



Obr. 2 Základní princip georadaru

2.1.4 Základní vztahy

Pro charakterizaci jednotlivých materiálů jsou důležitými veličinami permitivita, vodivost a permeabilita, z nichž zásadní je pro účely měření silničních materiálů georadarem permitivita.

Permitivita je fyzikální veličina, která v případě elektromagnetického vlnění popisuje vztah mezi vektory elektrického pole a elektrické indukce. Základní jednotka je farad na metr ($F \cdot m^{-1}$).

Permitivitu lze určit ze vztahu:

$$\varepsilon = \frac{D}{E} \quad (1)$$

kde:

ε - permitivita materiálu,

D - elektrická indukce,

E - intenzita elektrického pole.

Nejčastěji se pro účely měření georadarem vlastnosti silničních stavebních materiálů rozlišují na základě jejich relativní permitivity, která se také označuje jako dielektrická konstanta, nebo dielektrická hodnota.

Relativní permitivita vyjadřuje podíl permitivity daného materiálu a permitivity vakua, tedy:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2)$$

kde:

ϵ_r - relativní permitivita materiálu (dielektrická konstanta),

ϵ - permitivita materiálu,

ϵ_0 - permitivita vakua, fyzikální konstanta, jejíž hodnota je $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$.

Relativní permitivita je látková konstanta, která vyjadřuje, kolikrát se elektrická síla zmenší v případě, že tělesa s elektrickým nábojem jsou místo ve vakuu umístěna v látkovém prostředí.

Závislost relativní permitivity materiálu je závislá na rychlosti šíření elektromagnetického signálu.

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

kde:

v - rychlost šíření EM signálu prostředím (m/s),

c_0 - rychlost světla ve vakuu ($2,997 \cdot 10^8 \text{ m/s}$),

ϵ_r - dielektrická konstanta (relativní permitivita prostředí).

Na základě zjištěných rychlostí šíření EM signálu jednotlivými vrstvami zkoumané konstrukce se pak převádí tato hodnota na tloušťku (hloubku). Správné stanovení této rychlosti je velmi důležité, jelikož má zásadní vliv na přesnost této metody.

$$h = v * \frac{\Delta t}{2} \quad (4)$$

kde:

h - tloušťka vrstvy vozovky (m),

v - rychlost šíření EM signálu prostředím (m/s),

Δt - čas průchodu signálu vrstvou – tam a zpět (s).

Pro představu je v tabulce 1 uvedena rychlost šíření EM signálu a relativní permitivita materiálu typických silničních materiálů.

Tab. 1 Rychlost šíření EM signálu prostředím a dielektrické konstanty dle DMRB 7.3.2 HD 29/08

Silniční materiál	Rychlost šíření (mm/ns)	Dielektrická konstanta
vzduch	299	1
asfalt	90 - 160	4 - 10
beton	100 - 130	5 - 9
hydraulicky stmelené vrstvy	100 - 120	6 - 9
nestmelené vrstvy	70 - 120	6 - 18
voda	33	81

2.1.5 Metody zjištění rychlosti šíření EM signálu

Rychlost šíření EM signálu v prostředí lze stanovit několika způsoby:

- kalibračním měřením – vypočte se rychlost šíření EM signálu jednotlivými vrstvami na základě skutečně zjištěných tloušťek, např. z vývrtů v referenčních bodech – nejčastější metoda,
- metodou CMP pro antény typu dipól (Common Mid-Point method; metoda společného reflexního bodu) – je založena na vzdalování vysílače a přijímače z jednoho bodu, používá se zpravidla pro první vrstvu,
- metodou WARR pro antény typu dipól (Wide Angled Reflection Refraction Analysis; metoda využívající vícero reflexních bodů) – obdoba metody CMP, vzdaluje se pouze přijímač, při použití pole antén se dá provádět i jako kontinuální měření – používá se zpravidla pro první vrstvu, když nedochází k náhlým změnám její tloušťky,
- metodou reflexního koeficientu pro trychtýřové antény (Reflection Coefficient Method) – vychází z porovnání amplitud signálů odpovídajících odrazu od zkoumaného povrchu vozovky a odrazu od kovové desky umístěné na tomto povrchu, používá se pro první vrstvu,
- analýzou tvaru hyperbol v radargramech reprezentujících výztuž, vedení inženýrských sítí apod. – využívá se jako orientační vyhodnocení, např. při stanovení polohy kluzných trnů a kotev ve vozovkách s cementobetonovým krytem,
- použitím tabulární hodnoty vycházející z dielektrické konstanty, příklady jejich hodnot pro vybrané materiály jsou uvedeny v tabulce 1 – pouze pro orientační účely, pokud se jedná o silniční materiály.

2.1.6 Ztráta intenzity a útlum EM signálu

Ke ztrátě intenzity, nebo také k útlumu EM signálu dochází při průchodu různými materiály zkoumané konstrukce/objektu, a to z důvodu výskytu vodivých materiálů, vlhkosti, výskytu volných iontů z roztoků a díky odrazům, ohybům a lomům signálu, ke kterým dochází ve zvýšené míře pronikáním signálu do nehomogenního a různorodého prostředí.

V případě vysoce vodivých materiálů (kovové materiály, mořská voda, jíl) je útlum EM signálu vysoký a hloubkový dosah je nízký, zpravidla do 1 m. V případě málo vodivých materiálů je útlum signálu nízký a hloubkový dosah je vysoký, v řádu desítek až stovek metrů.

Obecně se útlum zvyšuje se zvyšující se frekvencí použité antény, což je dokumentováno v tabulce 2, která uvádí závislost útlumu EM signálu na použité frekvenci antény při diagnostice zemního tělesa.

Tab. 2 Útlum EM signálu při průchodu zeminou za použití antén různých frekv. dle ETSI EG 202 730

Frekvence antény	100 MHz	300 MHz	500 MHz	1 000 MHz
Útlum EM signálu	10 - 30 dB/m	20 - 40 dB/m	30 - 60 dB/m	40 - 80 dB/m

2.1.7 Důležité rady a podmínky pro měření GPR

Vyslaný EM signál neprojde kovy, ocelovou výztuží, která je rozmístěna blízko sebe (např. kari sítěmi s hustě rozmístěnou výztuží), nebo jinými vysoce vodivými materiály.

Měření by se nemělo provádět v případech, kdy na měřeném povrchu stojí voda (za deště a následně po něm) a také v případech, kdy byla vozovka v zimním období ošetřena chemickými rozmrazovacími látkami (chloridy - v pevném stavu, nebo jako roztok). Sůl

zvysuje vodivost materiálu a vysoká vodivost vede k utlumení EM signálu a tím význačně redukuje dosah měření.

Evropský ústav pro telekomunikační normy ETSI (European Telecommunications Standards Institute) vydává normy a doporučení. Z hlediska použití GPR je nejdůležitější doporučení ETSI EG 202 730 V1.1.1 (2009) které vypracovala evropská asociace s názvem EuroGPR. Dále jsou uvedena některá základní pravidla pro používání georadaru. Hlavní zásadou je ta skutečnost, že signál, který vysílá georadar není vysílán do atmosféry, ale do země či zkoumané konstrukce dostatečné tloušťky a rozměrů aby tento signál absorboval.

Z hlediska kvality naměřených dat se doporučuje provádět evidenci výskytu událostí, které by se mohly promítnout do záznamu z měření jako např. příjem hovoru na mobilní telefon, blízkost vedení vysokého napětí, blízkost vysílače, vozidlo projíždějící v těsné blízkosti místa měření apod.

2.1.8 Anténní systémy

Hloubka dosahu anténních systémů je dána jejich frekvencí, radiačním výkonem a elektrickou vodivostí materiálů. Za účelem získání detailní informace o měřeném úseku silnice v celé jeho délce je anténa tažena po vozovce, případně je uchycena na/za měřicí vozidlo, a elektromagnetický impuls se vysílá do konstrukce vozovky v pravidelných časových či délkových intervalech.

Podle toho pro jaký účel měření provádíme a do jaké hloubky pod povrch se potřebujeme podívat, se volí vhodná anténa. Anténa s nízkou centrální frekvencí má dosah v řádu metrů až desítek metrů, ale zachytí pouze objekty/útvary větších rozměrů. Anténa s vyšší centrální frekvencí je schopná detekovat menší objekty/útvary, ale má nižší dosah. Typický dosah antén s různou frekvencí, tak jak jej prezentuje firma GSSI, je uveden v tab. 3.

Tab. 3 Typický dosah antén s různou frekvencí dle GSSI

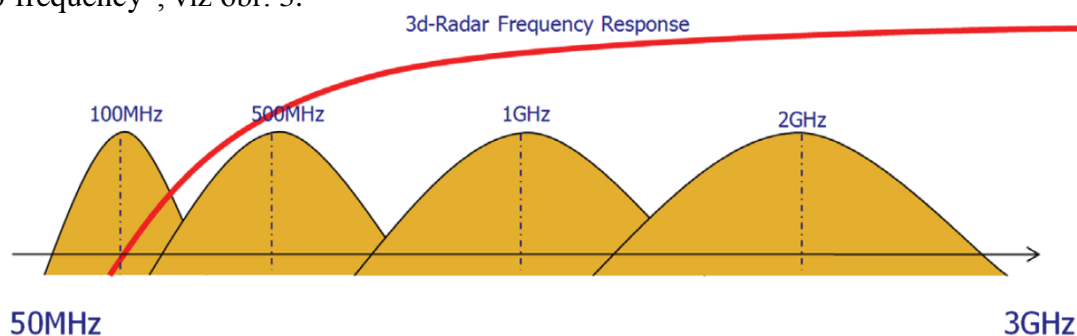
Centrální frekvence (MHz)	Max. dosah (m)	Čas průchodu (ns)	Nejčastější aplikace
2600	0,4	8 - 15	betonové konstrukce, polohy kabelů, výztuže
1600	0,5	10 - 15	univerzální, betonové konstrukce, mostovky
1000	0,6	10 - 20	betonové k-ce, mělké zeminy, archeologie
900	1,0	10 - 25	tloušťky betonu, detekce vlhkosti
400	4,0	20 - 100	inž. sítě, detekce vlhkosti
270	6,0	50 - 200	inž. sítě, geotechnika
2000 HORN	0,75	8 - 15	tloušťky vrstev a stav vozovek PK
1000 HORN	0,9	10 - 20	hodnocení mostovek a vozovky PK

HORN = trychtýřová anténa

Antény dělíme do dvou základních skupin:

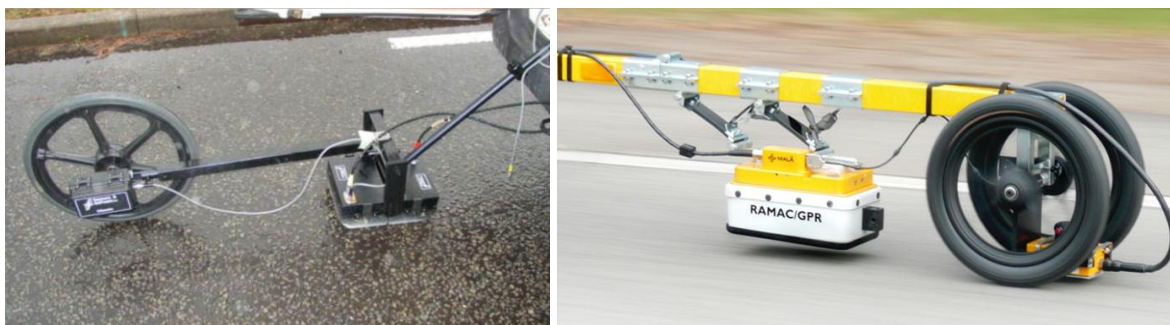
- **trychtýřové antény (horn)**, zpravidla frekvence 1 GHz (2 GHz) a vyšší, které se umísťují 30 – 50 cm nad zkoumaný povrch,
- **dipól antény (dipole)**, zpravidla frekvencí 200 kHz – 2,6 GHz, které se v ideálním případě umísťují přímo na měřený povrch (v případě měření za vysokých rychlostí zhruba 2 – 5 cm nad něj, aby nedošlo k jejich poškození), zpravidla bývají stíněné, ale mohou být také nestíněné (v tom případě se EM vlnění šíří všemi směry, nikoli pouze do zkoumané konstrukce).

Pro 3D aplikace existují speciální systémy GPR pracující s polem antén, které zabírají širší frekvenční pásmo. To umožňuje např. systém GeoScopeTM firmy 3D-Radar s technologií „step-frequency“, viz obr. 3.



Obr. 3 Srovnání použití několika tradičních antén (100, 200, 400 a 900 MHz) a pole antén systému GeoScopeTM firmy 3D-Radar (rozsah 100 MHz až 3 GHz)

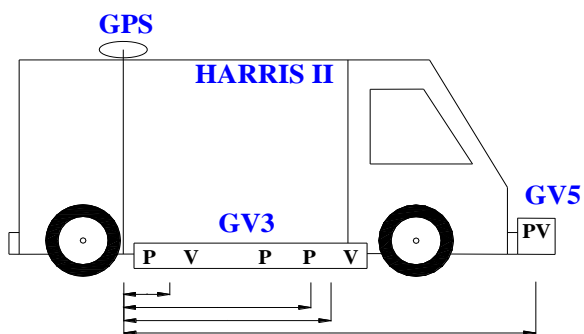
Na obrázcích 4 až 7 jsou uvedeny systémy s různými anténami používané pro diagnostiku vozovek.



Obr. 4 Sestava Pulse Ekko - jedna anténa typu dipól tažená po povrchu (vlevo, zdroj Sensors & Software Inc.)
a sestava GPR RoadCart – dvě antény typu dipól pro měření za vysokých rychlostí (vpravo, zdroj MALÁ Geoscience)



Obr. 5 Sestava RIS Hi-Pave - jedna trychtýřová anténa, odometr uchycen na kolo automobilu (zdroj Ingegneria Dei Sistemi)



Obr. 6 Nainstalovaný set Groundvue 3 (pole antén typu dipól) a Groundvue 5 (trychtýřová anténa) firmy Utsi Electronics Ltd na měřicím vozidle Harris II (foto Transport Research Laboratory - UK)



Obr. 7 Systém GeoScope™ Mk IV s polem antén šířky 1,8 m pro 3D mapování (zdroj 3D-Radar)

Největší výrobci a provozovatelé georadarových systémů jsou sdruženi v evropské asociaci EuroGPR (<http://www.eurogpr.org>).

Níže je uveden seznam nejznámějších výrobců georadarů, které se uplatňují při diagnostice pozemních komunikací:

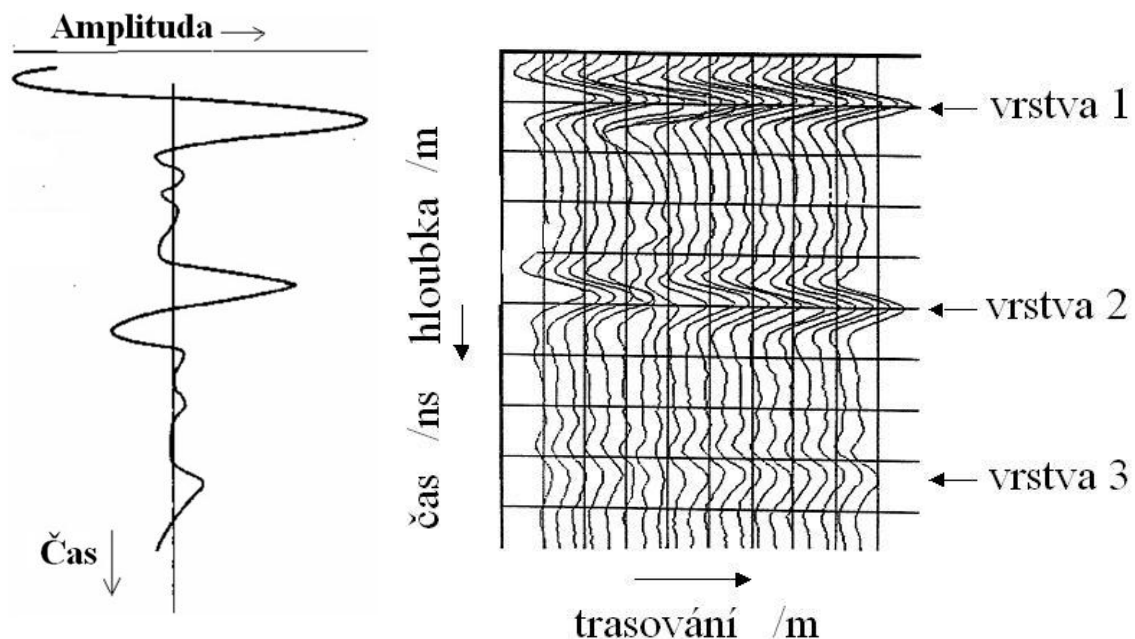
- 3D-Radar AS (Švédsko) <http://www.3d-radar.com>
- Geophysical Survey Systems, Inc. (USA) <http://www.geophysical.com>
- Ingegneria Dei Sistemi (Itálie) <http://www.idscompany.it>
- MALÅ GeoScience (Švédsko) <http://www.malags.se>
- Sensors & Software Inc. (Kanada) <http://www.sensoft.ca>
- Utsi Electronics Ltd (Velká Británie) <http://www.utsielelectronics.co.uk>
- Penetradar Corporation (USA) <http://www.penetradar.com>
- Geoscanners AB (Švédsko) www.geoscanners.com

2.1.9 Režimy měření

Měření georadarem se může provádět v následujících režimech:

- měření v jednom bodě (označení: sken nebo A sken), viz obr. 8,
- sada měření v jedné linii (označení: radargram, 2D sken nebo B sken), viz obr. 8,
- plošné měření v mřížce (označení: 3D sken nebo C sken).

Záznam složený z jednotlivých měření, tzv. radargram (označovaný také jako radarogram) je uveden na obr. 8 (ujetá vzdálenost versus čas průchodu elektromagnetického signálu konstrukcí). Každá vertikální křivka reprezentuje záznam z jednoho měření. Identifikaci pozice každého měření v rámci měřeného úseku lze provést lokalizačním zařízením (odometrem umístěným na měřicím kole, nebo pomocí GPS).



Obr. 8 Záznam měření v jednom bodě – A sken (vlevo) a kontinuální záznam georadaru – tzv. Radargram (vpravo), (zdroj DMRB 7.3.2, 2008)

Krok měření (také označován jako vzorkování) se nastavuje prostřednictvím řídicí jednotky a udává, v jakých vzdálenostech od sebe se bude provádět měření (tedy vysílání EM signálu do zkoumaného prostředí a příjem odrazů tohoto signálu). Krok měření může být nastaven buď ve formě času, nebo ujeté vzdálenosti, např. 5 skenů za sekundu nebo 10 skenů na metr.

Pokud se provádí měření na malé ploše nebo na malou vzdálenost, nenastává problém se vzorkováním, jelikož se měření provádí za malých rychlostí. V případě měření za vyšších rychlostí a za provozu na pozemní komunikaci se musí vzorkování nastavit tak, aby to bylo dostatečné z hlediska požadované diagnostiky a aby byl měřicí systém, pracující třeba s více kanály, schopen nastavenou rychlost vzorkování zvládnout. Jako příklad jsou v tabulce 4 uvedeny možnosti vzorkování za různých rychlostí při měření jednou anténou.

Tab. 4 Možnosti vzorkování za různých rychlostí při měření jednou anténou dle GSSI

Vzorkovací frekvence antény:	100 skenů/s		500 skenů/s	
Rychlost měření [km/h]	počet skenů na 1m	krok měř. v mm	počet skenů na 1m	krok měř. v mm
0,5	720	1,4	3600	0,3
1	360	3	1800	0,6
5	72	14	360	3
10	36	28	180	6
20	18	56	90	11
50	7,2	139	36	28
80	4,5	222	22,5	44
100	3,6	278	18	56
120	3	333	15	67

Dle doporučení výrobce je Horn anténa 1,0 GHz (Model 4108) schopna v kombinaci s řídicí jednotkou SIR 20 měřit 100-500 skenů/s. Vyšší skeny/s se nastavují při sběru dat při vyšších skenech/m. U řídicí jednotky SIR 20 je rozhodující je stupeň 100 nebo 500 kHz, zapojení 1 kanálu, nebo 2 kanálů a nastavení Sample/scan do max. hodnoty 512.

V záznamech z měření je vždy nutné provést jednoznačnou identifikaci důležitých míst po trase měření jako je začátek, konec, místa, kde se odebírají vývrty, výskyt poruch apod. Pro tyto účely se používá ruční marker, který označí příslušné místo v georadarovém záznamu. Některá zařízení používají automatickou identifikaci a to tak, že se používají dopravní kužely opatřené reflexním pásem. Při průjezdu tohoto místa je tato pozice zachycena laserovým snímačem umístěným na podvozku vozidla a automaticky zaznamenána do radargramu.

2.1.10 GPR Software

Naměřená data jsou následně zpracována prostřednictvím softwaru, ve kterém se provádí operace vedoucí ke zvýšení čitelnosti radargramu (filtrace signálu, jeho zesílení, kontrast atd.). Jednotlivé operace se liší dle účelu prováděných zkoušek a použitého měřicího zařízení (počtu a rozmístění antén).

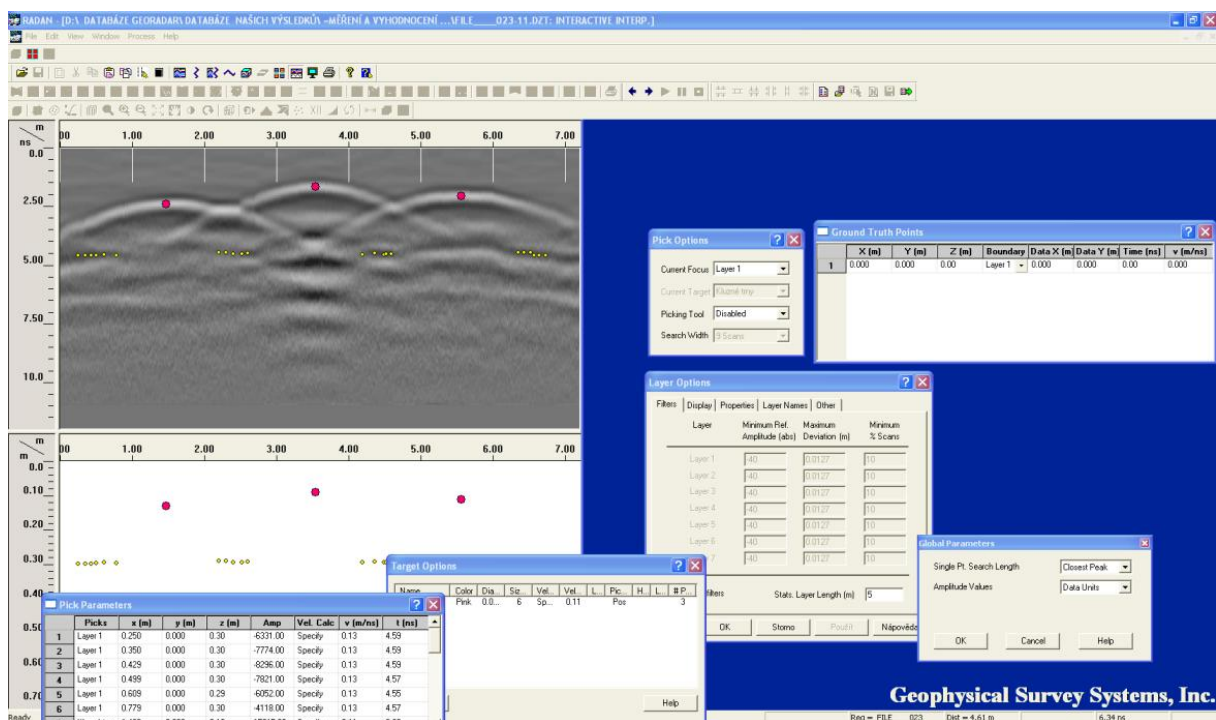
Existuje celá řada softwarů, které se používají k interpretaci naměřených dat georadarem, a to jednak při vlastním provádění měření, kde se zároveň nastavují různé parametry měřicí aparatury nebo až následně, kdy se provádí především filtrace dat a interpretace výsledků – nejčastěji stanovení průběhů tloušťek vrstev po celé délce měřeného úseku.

Větší výrobci georadarových systémů dodávají ke svému zařízení zpravidla svůj vlastní vyhodnocovací software, viz tabulka 5. Většinou je možné si zakoupit jednotlivé moduly, které se specializují na vyhodnocení různých aplikací, nejčastěji se to týká diagnostiky betonových a vyztužených konstrukcí (Structure), diagnostiky vozovek (Road), diagnostiky mostů, mostovek nebo vozovek na mostech (Bridge), vyhledávání podzemního vedení (Utility) a podrobné 3D zobrazení naměřených dat.

Tab. 5 Softwaru dodávané jednotlivými výrobci georadarových systémů

Výrobce	Software	Moduly pro speciální aplikace
3D-Radar (Švédsko)	GeoScope Control Software	3dr Examiner
Geophysical Survey Systems, Inc. (USA)	RADAN	RoadScan, BridgeScan, StructureScan, 3D
Ingegneria Dei Sistemi (Itálie)	IDS GRED	moduly pro speciální aplikace, včetně 3D
MALÅ GeoScience (Švédsko)	Ground Vision 2	RadExplorer, Object Mapper
Sensors & Software Inc. (Kanada)	Ekko View	EKKO Interp, EKKO Mapper s 3D variantami
Utsi Electronics Ltd (UK)	-	-

Ukázka toho jak vypadá základní zobrazení takového softwaru americké firmy GSSI - **RADANu**, je uvedeno na obr. 9.



Obr. 9 Základní zobrazení softwaru RADAN pro vyhodnocení GPR dat – stanovení polohy zabudované výtzuže

Mimo těchto softwarů existují ještě další, které nejsou spojeny s žádným konkrétním výrobcem a jsou schopny pracovat s daty naměřenými různými GPR systémy. Jedním z nich je německý software firmy Sandmeier Software – **Reflexw** (obr. 10), který také nabízí různé moduly odpovídající různým aplikacím, další analýzy naměřených dat a modelování elektromagnetického signálu.

Obr. 10 Možnosti zpracování georadarových dat softwarem Reflexw
 (<http://www.sandmeier-geo.de/GPR.html>)

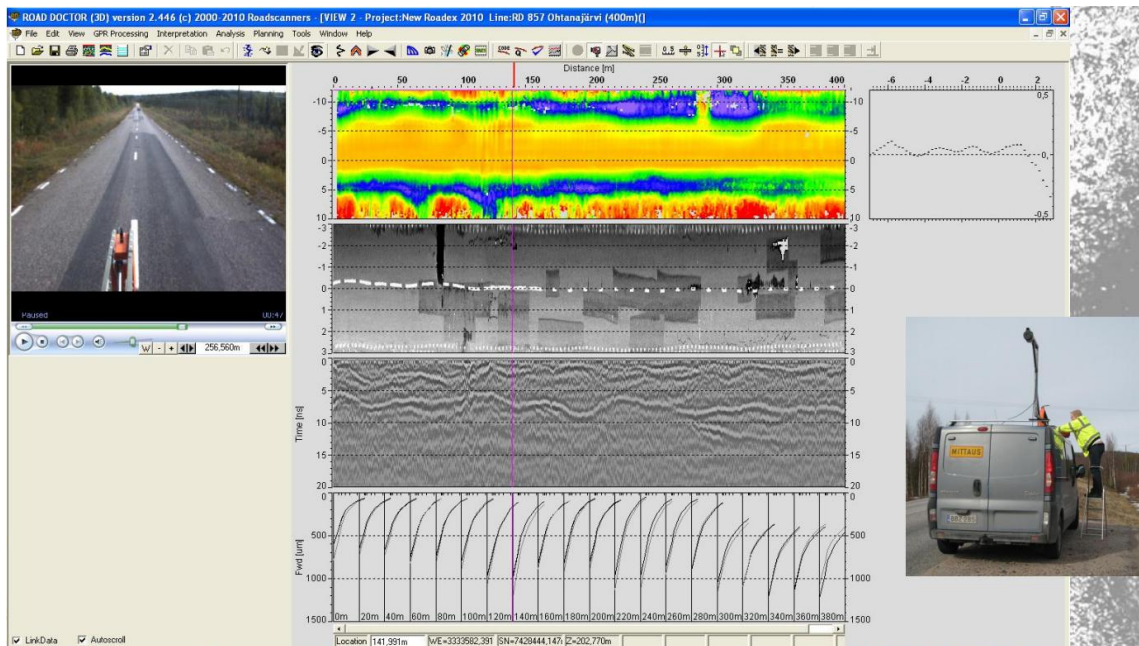
Tento software umožňuje importovat data ze všech nejznámějších softwarů. Jeho součástí je také vyhodnocování záznamu z měření seismického vlnění, záznamu z ultrazvuku apod.

Existují však ještě další programy, které nejsou výhradně určeny pro zpracování GPR dat, ale využívají výsledky těchto měření spolu s dalšími vstupními informacemi např. při rozhodování o potřebě údržby a oprav a výběru vhodné technologie.

Jedním z těch známějších softwarů zaměřených na vozovky pozemních komunikací je **Road Doctor** (obr. 11) od firmy Roadscanners Oy z Finska, který kombinuje výsledky měření georadarem s dalšími výsledky měření:

- rázovým zařízením FWD
- laserovým skenováním,
- výsledky z měření povrchových vlastností – profilu, poruch, nerovností v podélném a příčném směru,
- odběrem vývrtů,
- digitálním záznamem (video, fotky),
- začleněním do mapových podkladů.

Právě kombinace výsledků GPR s rázovým zařízením FWD je velice oblíbená mezi silničnickými inženýry. Nabízí mnoho výhod pro hodnocení vozovky. Zejména zpětný výpočet u FWD vyžaduje informace o přesných tloušťkách vrstev vozovky, které může poskytnout georadar. Změny v tloušťkách asfaltových a podkladních vrstev jsou hlavním zdrojem chyb při výpočtu modulů vrstev vozovky rázovým zařízením FWD.



Obr. 11 Zobrazení softwaru Road Doctor – výsledky měření laserového skenování, georadaru a rázového zařízení FWD (zdroj: Roadscanners Oy)

2.1.11 Zpracování GPR dat

Základní zpracování GPR dat zpravidla zahrnuje:

- identifikaci povrchu z radargramu (nastaví se jako čas nula – zero time),
- nastavení frekvenčního rozsahu (FIR filter),
- odstranění šumu pozadí (background removal),
- zesílení signálu směrem do hloubky, často ve více krocích (range gain).
- převedení času průchodu signálu konstrukcí na hloubku,
- označení zájmových bodů/sekcí.

2.2 Problematika umístování kluzných trnů a kotev v CB krytu

Cementobetonové kryty se v zásadě dělí na nekotvené a kotvené.

U nekotvených krytů není žádným mechanickým způsobem zajištěn přenos zatížení mezi deskami na spárách.

Nekotvené CB kryty jsou využívány jenom okrajově a to u málo významných ploch a konstrukcí jako jsou například různé manipulační a skladové plochy (převážně u soukromých investorů).

O kotvených krytech hovoříme v tom případě, kdy je zajištěn přenos zatížení mezi deskami na spárách. Dříve se používalo u méně zatížených staveb kotvení na ozub. V současné době se provádí skoro výhradně kotvení pomocí kluzných trnů a kotev.

2.2.1 Kluzné trny a kotvy

Kluzný trn je vyroben z hladké oceli a je na povrchu opatřen povlakem. Vkládá se v místě spár sousedících desek cementobetonového krytu ke zlepšení přenosu zatížení a zabránění rozdílného poklesu desek, obvykle je uložený v příčné spáře (obr. 12). Průměr kluzného trnu bývá nejčastěji 25 mm a jeho délka 500 mm.

Kotva je hřebíková ocelová tyč ve středu opatřená ochrannou vrstvou proti korozi v délce cca 200 mm, udržující spáry úzké, obvykle uložená v podélné spáře cementobetonového krytu, obr. 12. Průměr kotvy bývá nejčastěji 20 mm a její délka 800 mm.

Vkládání ocelových prvků (KT a K) do spár CB krytů vozovek se v ČR provádí od roku 1994.



Obr. 12 Výztužné prvky před jejich použitím - kluzné trny (vlevo) a kotvy (vpravo).

Mezi rozhodující funkční vlastnosti kluzných trnů patří:

- schopnost trnu zajišťovat efektivně spolupůsobení na hranách desek,
- odolnost trnu proti korozi,
- tvrdost povlaku ocelových trnů, snižující možnost deformace povlaku hranami desek pod pohyblivým zatížením,
- klzkost povlaku umožňující dokonalý pokluz trnu v betonu během dilatačních pohybů desek,
- všechny vlastnosti by měly zajišťovat potřebné funkce trnu po celé období životnosti cementobetonového krytu, tedy minimálně 25 let.

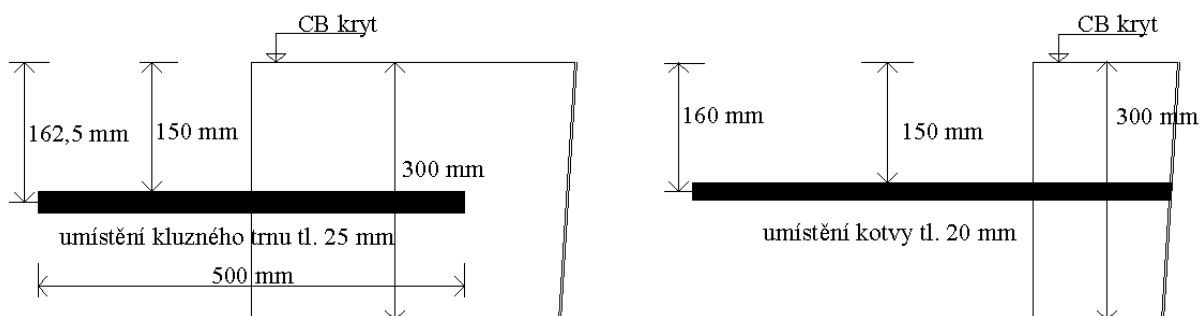
Mezi rozhodující funkční vlastnosti kotev patří:

Jsou stejné jako u kluzných trnů, s tím rozdílem, že kotva je chráněna protikoročním povlakem pouze ve svém středu a na rozdíl od kluzných trnů zabraňuje pohybu sousedních desek v horizontálním směru.

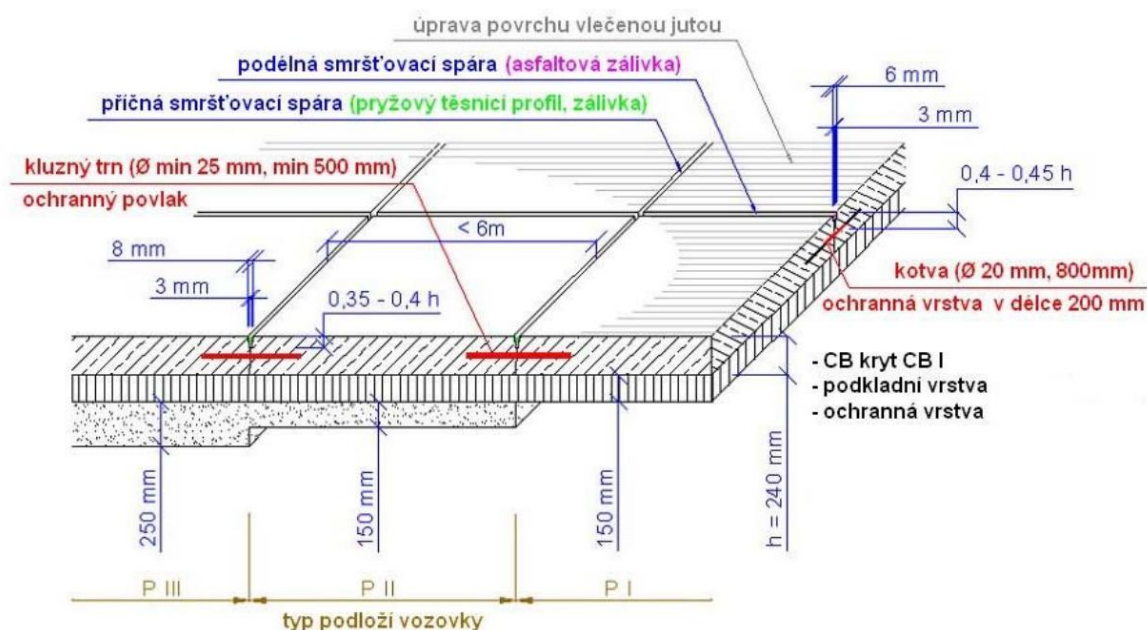
2.2.2 Uložení kluzných trnů a kotev

Kluzné trny mají být uloženy tak, aby osa kluzného trnu byla ve výšce $h/2$ minus poloměr kluzného trnu (kde h je tloušťka cementobetonového krytu - viz obr. 13, v jedné rovině, rovnoběžně s povrchem cementobetonového krytu a s podélnou osou betonovaného pruhu viz obr. 14). Vzdálenost trnů na zatížených jízdních pruzích je 250 mm, na slabě zatížených jízdních pruzích a krajnici je možno tuto vzdálenost zdvojnásobit. Vzdálenost vnějšího trnu od kraje desky nesmí být menší než 250 mm (ČSN 73 6123-1, 2006).

Kotvy se umísťují tak, aby osa kotvy byla ve výšce $h/2$, kolmo na podélnou spáru, rovnoběžně s povrchem cementobetonového krytu (obr. 13 a 14). Kotvy se umísťují zpravidla po třech na desku ve stejných vzdálenostech od sebe. Vzdálenost krajních kotev od příčné spáry musí být maximálně 500 mm (ČSN 73 6123-1, 2006).



Obr. 13 Příklad umístění kluzného trnu a kotvy v řezu cementobetonovou vozovkou podle projektové dokumentace



Obr. 14 Schéma uložení kluzných trnů a kotev v CB krytu v ČR dle katalogu z TP 170

Poloha kluzných trnů a kotev (po zabetonování) jak uvádí tabulka B1 (ČSN 73 6123-1) se provádí na zkušebních úsecích u pěti trnů a kotev.

2.2.3 Osazování kluzných trnů v pracovní spáře

Na styku úseků CB krytů, betonovaných v takovém časovém odstupu, že starší beton je ve stadiu tvrdnutí nebo již ztvrdlý jsou vytvářeny pracovní spáry. V těchto spárách je poloha kluzných trnů zajištěna technologií osazení a lze v nich přímo změřit polohu kluzných trnů. Ukázka osazených kluzných trnů v pracovní spáře je uvedena na obr. 15.



Obr. 15 Ukázka vyztužení pracovní spáry pomocí kluzných trnů (vlevo) a dřevěné bednění – prvek technologie pro osazení kluzných trnů do pracovní spáry (vpravo)

2.2.4 Osazování do armokošů

U staveb menšího rozsahu, případně u staveb, kde není možné využít finišery s automatickým ukládáním výztužných prvků, se používá osazování kluzných trnů a kotev do armokošů, viz obr. 16. U těchto staveb je to prakticky jediná možná metoda.

Pro správnou funkci výztužných prvků je nezbytné jejich osazení ve správné poloze. Je proto nutné zajistit, aby konstrukce armokošů byla dostatečně tuhá, způsob uchycení kluzných trnů a kotev do armokošů byl dostatečně pevný, podklad na který jsou armokoše kladeny byl dostatečně rovný a tloušťka CB krytu odpovídala projektové dokumentaci, aby také poloha kluzných trnů a kotev odpovídala požadovaným tolerancím.

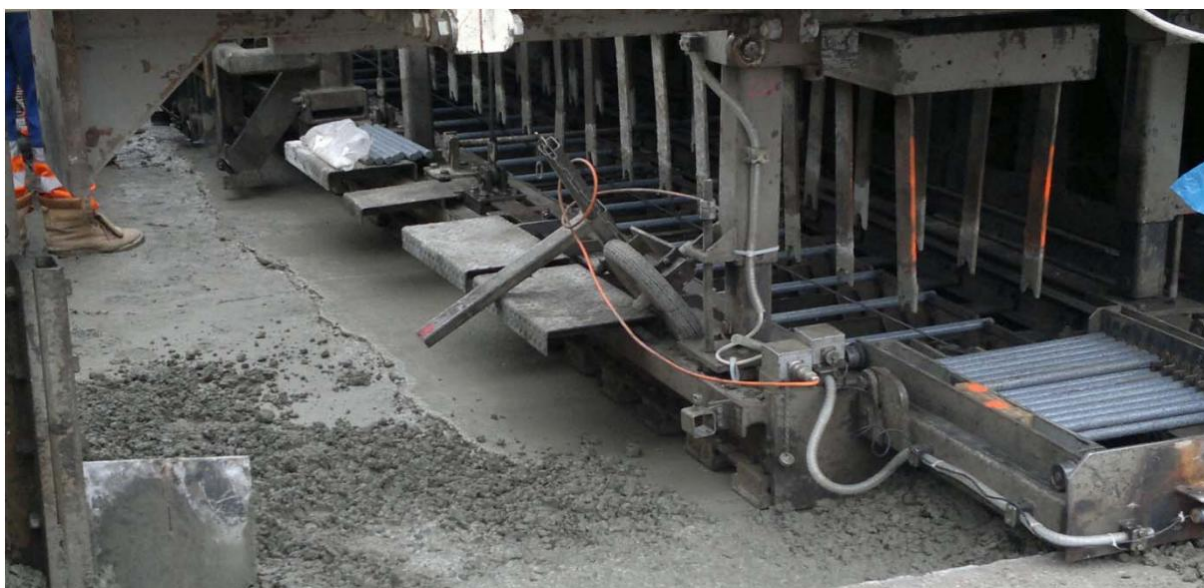


Obr. 16 Ukázka vyztužení spáry pomocí kluzných trnů (vlevo) a kotev (vpravo) osazených před betonáží na armokoše

2.2.5 Osazování kluzných trnů pomocí finišerů

V ČR se v současnosti vyskytují finišery pro pokládku CB krytů s automatickým osazováním kluzných trnů do spár od 4 světových výrobců. Jedná se o dvě německé firmy WIRTGEN a Hailit+Woerner a dvě americké firmy Guntert & Zimmerman a GOMACO. První tři jmenované firmy (WIRTGEN, Hailit+Woerner, Guntert & Zimmerman) pro pokládku CB krytů v ČR využívají dvouvrstvé technologie. Tedy že je položena první vrstva betonu, do které jsou strojně osazeny kluzné trny, načež dojde k pokládce druhé (horní) vrstvy CB krytu. To představuje největší problém pro polohu kluzných trnů, jelikož při vibraci horní betonové vrstvy se vibrace přenáší i do spodní vrstvy a osazených kluzných trnů a tím pádem může docházet ke změně jejich polohy. Tato dodatečná změna polohy se eliminuje vzájemným nastavením čerstvé betonové směsi, jednotlivých funkčních částí finišeru, rychlostí pokládky atd. Přičemž i ideálním skloubením všech věcí ovlivňujících polohu výztužných prvků je zajištěna jen menší změna polohy ale nikoli absolutní přesnost.

V principu první tři výše uvedené firmy preferující dvouvrstvou technologii pokládky mají způsob osazení kluzných trnů totožný. Jedná se o pevný nosník, na kterém jsou osazeny zatlačovací vidličky a ty pomocí vibrace zatlačí kluzné trny na určené místo (obr. 17). Jelikož jsou to pevné nosníky, je při zatlačení kluzných trnů docíleno jejich osazení do stejné hloubky. Při správném nastavení zařízení je eliminována i možná nepřesnost osazení v horizontálním směru.



Obr. 17 Zatlačovací zařízení kluzných trnů na finišeru Wirtgen SP 1600

Poslední uváděný výrobce finišerů firma GOMACO má vyvinutý systém jednovrstvé technologie se zatlačováním kluzných trnů do takto již hotové vrstvy. Systém zatlačování kluzných trnů je totožný - jedná se o pevný nosník, na kterém jsou osazeny zatlačovací vidličky a ty pomocí vibrace zatlačí kluzné trny na určené místo. K této technologii, aby byla zajištěna homogenita betonu nad kluznými trny, firma vyvinula speciální systém zpracování betonu nad výztužnými prvky pomocí pohybujeících se břitů. Tímto postupem bylo u tohoto finišeru dosahováno nejmenších odchylek při osazování výztužných prvků, na druhou stranu tato jednovrstvová technologie přinášela celou řadu jiných technologických problémů, takže se od této technologie upustilo a v dnešní době tento finišer již není v ČR k dispozici.

2.2.6 Osazování kotev pomocí finišerů

Kotvy jsou osazovány strojně do podélných spár u široké betonáže, kdy se vnitřní podélné spáry dodatečně řežou.

Popis výrobců finišerů by v případě kotev byl stejný jako u kluzných trnů. Odlišnosti jsou ale v tom, jak jednotliví výrobci zatlačení kotev řeší. Zatím co firmy Wirtgen, GOMACO a Guntert & Zimmerman řeší zatlačení kotev opět automaticky jako u kluzných trnů, firma Hailit+Woerner automatické strojní zařízení osazené na finišeru vyvinuté nemá a řeší tuto otázku pomocí ručního zatlačecího zařízení (obr. 18).

Přesnost osazování kotev a vlivy na jejich přesnost jsou u výrobců Wirtgen, GOMACO a Guntert & Zimmerman takřka totožné s vlivy a přesností při osazování kluzných trnů, proto to nebude dále blíže popisováno.

U finišeru firmy Hailit+Woerner, kde tuto problematiku řeší pomocí ručního zařízení, dochází k dalšímu faktoru ovlivňujícímu přesnost osazení kotev do konstrukce vozovky. Tímto faktorem, a dost zásadním, je ruční práce – lidský faktor, který není schopen garantovat takové parametry jako automatické strojní zařízení.



Obr. 18 Zatlačecí zařízení kotev na finišeru Wirtgen SP 1500 (vlevo) a ruční zatlačení kotev při pokládce CB krytu pomocí finišeru Hailit+Woerner (vpravo)

Hutnění betonu horní vrstvy CB krytu, která překrývá spodní vrstvu s osazenými kluznými trny a kotvami je nejzásadnější faktor ovlivňující výslednou polohu výztužných prvků v hotovém krytu.

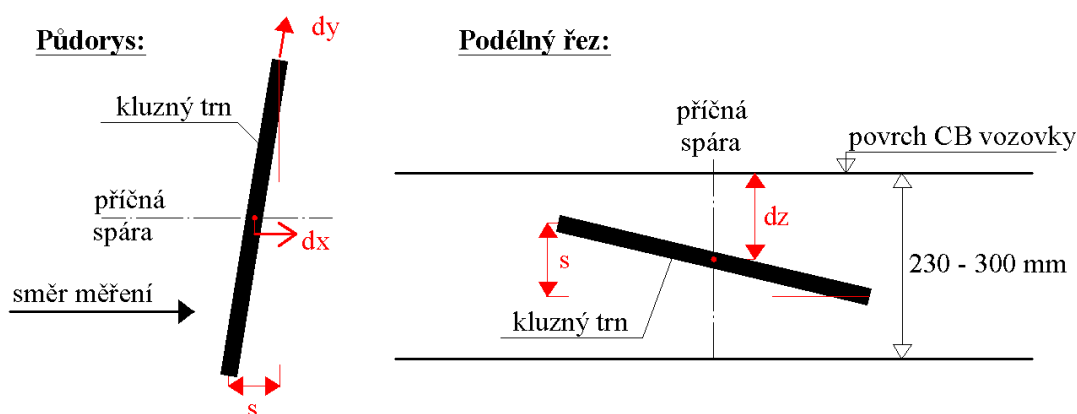
2.2.7 Tolerance pro polohu kluzných trnů a kotev v CB krytech

Česká republika

Požadavky na polohu zabudovaných kluzných trnů a kotev v CB krytech se mohou lišit v jednotlivých zemích. Zpravidla se sledují 4 základní parametry, ve kterých se poloha (posun a vychýlení) výztuže navržená v dokumentaci nesmí lišit od skutečné polohy o hodnotu vyšší, než uvádí norma ČSN 73 6123-1, 2006.

Jedná se o následující 4 parametry (obr. 19):

- max. možná odchylka polohy výztuže v horizontálním směru (staničení ve spáře) – **dx**;
 $max. |\pm dx \pm s| \leq 20 \text{ mm}$,
- maximální možná odchylka polohy výztuže ve vertikálním směru (vztažená k horní ploše desky) – **dz** ; $max. |\pm dz \pm s| \leq 20 \text{ mm}$,
- max. vychýlení konců výztuže vůči sobě (v horizontálním i ve vertikálním směru) – **s**,
- maximální posun výztuže ve směru její podélné osy (vůči spáře) – **dy** = 50 mm, pro kotvy **dy** = 20 mm.



Obr. 19 Sledované normové parametry, ve kterých se poloha výztuže navržená v dokumentaci nesmí lišit od skutečné polohy.

Tolerance možného posunutí, nebo vychýlení kluzných trnů a kotev jsou od roku 2012 ověřovány v rámci projektu Technologické agentury České republiky: TA02031195 – „Poloha kluzných trnů a kotev v cementobetonových krytech vozovek a význam jejich správného umístění na chování a životnost krytů“.

Pro představu, jaké tolerance jsou povoleny v jiných státech, jsou níže uvedené některé z nich.

Německo (ZTV Beton-StB 07,2007, čl. 3.3.4.4.)

Kluzné trny:

- odchylka od výškové polohy, měřená ve středu kluzného trnu (dz), nesmí překročit hodnotu 20 mm,
- šikmá poloha kluzných trnů (s) smí činit nejvýše 20 mm, vztaženo k délce kluzného trnu 500 mm,
- podélný posun (dy) kolmo ke spáře nesmí překročit hodnotu 50 mm.

Kotvy:

- pro polohu kotev nejsou uvedeny žádné údaje o tolerancích.

Dá se tedy konstatovat, že německé limity jsou benevolentnější než české, jelikož díky samostatnému sledování hloubky uložení kluzného trnu a jeho šikmosti umožňují v extrémním případě odklon od předepsané polohy 30 mm, navíc nejsou stanoveny limity pro uložení kotev.

Rakousko (RVS 08.17.02, 2011, čl. 3.6.1 a 3.6.2.)

Kluzné trny:

- výšková poloha kluzných trnů: maximálně $\pm 10\%$ předepsané tloušťky CB krytu,
- šikmá poloha kluzných trnů: maximálně 20 mm na 500 mm délky (horizontálně i vertikálně).

Kotvy:

- výšková poloha kotvy: maximálně $\pm 10\%$ předepsané tloušťky CB krytu od předepsané polohy.

V případě nejčastěji používané tloušťky CB krytu u nás 240 mm by tedy tolerance pro hloubkové uložení činila 24 mm. V případě CB krytů větších tlouštěk by to bylo ještě více.

Francie (NF P98-170, 2006, čl. 8.3.2 a 8.3.3.)

Kluzné trny:

Umístění kluzných trnů se nesmí lišit v žádném bodě od teoretické polohy více než:

- 2 cm od horního povrchu desky (hloubkové uložení),
- 2 cm od podélné osy vozovky (šikmost),
- 5 cm od spáry vozovky (podélný posun).

Kotvy:

Umístění kotev se nesmí lišit v žádném bodě od teoretické polohy více než 2 cm.

Zde jsou limity podobné jako v ČR, zejména co se týká celkem přísných požadavků na polohu kotev.

USA (NCHRP Report 637, 2009)

Mnoho amerických států přijalo doporučené limity od FHWA (centrálního amerického správce silnic), které se týkají horizontálního a vertikálního vychýlení kluzných trnů 1/4 palce na délku 12 palců (6,3 mm na délku 305 mm), nebo 2% tolerance.

Americká asociace ACPA doporučuje pro tento parametr toleranci 3/8 palce na délku 12 palců (9,5 mm na délku 305 mm), nebo 3% tolerance na základě zpráv.

Tolerance pro vychýlení kluzných trnů v horizontálním a vertikálním směru jsou přísnější než v Evropských zemích. Tolerance na podélný posun a odchylku od výškové polohy nejsou v některých státech vůbec definovány. Dále je v NCHRP Report 637 uvedeno, že při měření 2300 příčných spár na 60 projektech v 17 státech byly zjištěny následující odchylky u většiny kluzných trnů, které by neměly mít významný vliv na chování CB krytů:

- podélný posun ± 51 mm na délce KT 457 mm,
- rozdíl v hloubce uložení ± 13 mm při tloušťce CB krytů do 305 mm,
- vychýlení konců < 13 mm na délce KT 457 mm.

2.3 Rešerše literatury

Georadar má již určitou tradici při diagnostice objektů dopravní infrastruktury. Dá se využít nejen pro jednorázové zjištění stavu konstrukce, ale také pro srovnání vývoje za určité časové období.

Existuje velké množství článků a zpráv výzkumných projektů k těmto tématům. Níže jsou uvedeny pouze vybrané a nejaktuálnější z nich. Velmi komplexní jsou např. americké zprávy z programu SHRP (Strategic Highway Research Program 2 – SHRP 2, 2013), a výsledky evropského projektu Maranord (Mara Nord Project, 2011).

Georadar se zpravidla nepoužívá přímo jako přejímací zkouška, ale slouží spíše k vyhledávání slabých a poškozených míst konstrukce, které vznikají v průběhu jejího užívání. Často se kombinuje s jinými metodami. Některé aplikace se již standardně uplatňují v praxi, jiné se teprve ověřují v rámci výzkumných projektů.

Měření na vozovkách pozemních komunikací se provádí jak na netuhých (asfaltových), tak na tuhých vozovkách (s CB krytem), která mají svá specifika. Vozovky jsou liniové stavy, proto zde hraje přesnost lokalizace místa měření významnou roli. Dalším významným aspektem je rychlost měření. Zpravidla se provádí měření jen v podélném směru a za vysokých rychlostí tak, aby nedocházelo k omezování provozu na pozemní komunikaci. V tomto případě se měření často provádí jednou nebo několika trychtýřovitými anténami, případně polem antén. 3D záznam se provádí za pomalejších rychlostí. Některé aplikace vyžadují lokální měření, které se provádí zpravidla jednou nebo několika anténami typu dipól.

Jednou z prvních aplikací georadaru v silničním stavitelství bylo kontinuální stanovení tloušťek konstrukčních vrstev vozovky (Saarenketo, 2006, Loizos, 2007 a Fauchard, 2008). Jedná se o zjištění tloušťek krytových a podkladních vrstev. V současnosti se georadar používá při diagnostice vozovek na úrovni projektu, tedy pro hodnocení kratších úseků. Na síťové úrovni se zatím nevyužívá.

Další rozšířenou aplikací je stanovení polohy zabudované výztuže. Jde o kluzné trny a kotvy zabudované v cementobetonovém krytu vozovky, nebo vyztužení např. v kontinuálně vyztužené betonové vozovce (CRCP - Continuously Reinforced Concrete Pavement).

Cílem dalších aplikací u diagnostiky vozovek je lokalizace skrytých (podpovrchových) míst, kde dochází ke ztrátě spolupůsobení na rozhraní vrstev (Krysiński, 2012), dalšími aplikacemi jsou: změna konstrukce vozovky, identifikace kaveren detekce dutin pod CB krytem (Cassidy, 2011), poškozených míst, míst se zvýšenou vlhkostí, ledových čoček (Berthelot, 2010) apod. Mezi výzkumné aktivity v této oblasti patří zjištění skrytých trhlin v asfaltové vozovce (Krysiński, 2013), stav výztuže (koroze), stanovení mezerovitosti, vlhkosti, zhutnění vrstev, segregace kameniva aj.

Diagnostika mostů georadarem se zaměřuje zpravidla na trémové betonové mosty (Sbartai, 2007, Benedetto, 2012 a Taurusov, 2013), případně také na kamenné obloukové mosty (Solla, 2012). Většinou se týká stavu mostovky, tloušťky vozovky, ale i dalších aplikací. Měření se zpravidla provádí za malých rychlostí z povrchu vozovky. V případě piliře, nosníku apod. se provádí měření svislých ploch. Aplikace na nosnících a svislých prvcích se provádí ručně vedeným vozíkem s jednou dipól anténou. Významnou roli zde hraje diagnostikování polohy a stavu vyztužení mostovky - předpínacích kabelů (Dérobert, 2010), hlavní a konstrukční výztuže (např. průběh, poloha, krytí, stav výztuže, nebo vyplnění kanálků), stav mostních nosníků (Beben, 2012), porušení mostovky (Hugenschmidt, 2006). Zjišťují se také spolupůsobení a delaminace vrstev vozovky, stav těsnicí vrstvy (Dérobert, 2011), skryté poruchy, dutiny, vlhkosti apod. Měření se zpravidla provádí, až když se vyskytnou nějaké problémy zjištěné v rámci vizuální prohlídky – zatékání, výskyt trhlin apod.

Diagnostika tunelů je nejméně z uvedených zdokumentovaná oblast, ve které se georadar uplatňuje. Je to dáno počtem objektů a také nutností uzavírky tunelu - většinou v souvislosti s pravidelnou technickou výlukou (čištěním tunelu, kontrola a údržba vybavení apod.). Měření se provádí ve vertikálním směru – pomocí speciálních úchytů osazených na měřicí vozidlo, dipól anténami nebo horn anténami. V tunelech jsou zjišťovány polohy vyztužení v tunelovém ostění, tloušťky tunelového ostění, nehomogenity v konstrukci, nebo za ostěním (dutiny, porušení, vlhkost) apod. (Silvast, 2008 a Lalagüe, 2010).

Mezi další objekty dopravní infrastruktury, které se také vyšetřují georadarem, se řadí opěrné zdi (Hugenschmidt, 2009) a ověřování stavu podkladních vrstev a podloží železniční tratě (Hugenschmidt, 2013).

2.3.1 Stanovení polohy kluzných trnů a kotev

Pokud se zaměříme na problematiku polohy kluzných trnů v cementobetonovém krytu georadarem, literatura nenabízí velké spektrum publikovaných výsledků, než je tomu v jiných oblastech, ale lze některé uvést:

Měření polohy zabudované výztuže v cementobetonovém krytu vozovky se provádí různými nedestruktivními metodami. Nejpoužívanějšími jsou georadar (GPR) a zařízení MIT Scan-2 (Heft S65, 2010 a NCHRP report 637, 2009).

První článek vysvětluje, jak se zobrazuje výztuž v betonu, jak ji identifikovat v radargramu a testování na betonových vzorcích 1200 x 1200 x 300 mm (Shaw, 2005).

Americký článek popisuje parametry posunu a vychýlení kluzných trnů, jakými metodami je lze měřit, současné tolerance uváděné pro kluzné trny (Rao, 2009).

Literatura uvádí i stanovení průměru výztuže v betonu (Chang, 2009 a He, 2009). Tyto články popisují detekci výztuží zabudovaných v betonu, jejich zobrazení v radargramech a určení průměru výztuže. Popisována je zde např. také koroze výztuže a automatická detekce výztuže.

Studiu dielektrické disperze v laboratorním vzorku v průběhu stárnutí betonu se věnuje poslední článek (Lai, 2011). Disperze byla měřena třemi georadarovými frekvencemi (1,5, 1,6 a 2,6 GHz), experimentujících na dvou ocelových tyčích uložených v hloubkách 50 a 100 mm v betonovém vzorku. Příspěvek mimo jiné ukazuje skutečnost, že dielektrická konstanta betonu klesá při jeho tvrdnutí.

2.3.2 Srovnávací měření tloušťek konstrukčních vrstev vozovek

Na závěr je nutné zmínit současnou americkou zprávu (Edwards, 2012 o výsledcích srovnávacího měření tloušťek vrstev vozovky pomocí nedestruktivních zařízení. Tloušťky vrstev se zjišťovaly jak pro cementobetonové vozovky, tak také pro asfaltové vozovky. Nedestruktivními metodami, nasazenými pro srovnávací měření byly: georadarová metoda (GPR), metoda impact echo, metody ultrazvukové tomografie a metody MISW. Srovnávací měření metody georadaru s použitím různých středních frekvencí antén a typů antén (dipólové, trychtýřovité antény), i při kalibraci rychlosti šíření EM signálu metodou CMP a také pro 3D Radar nedopadla nejlépe. Chyby v rozdílu tloušťky při stanovení tloušťek CB vozovky georadary oproti jádrovým vývrtům dosáhly až na hodnotu **272 mm** a relativní chyba při stanovení tloušťky se pohybovala od **6 % do 83 %**. Stanovení tloušťek vrstev vozovky nedestruktivními metodami (Edwards a Mason, 2011) je finální a alarmující zprávou, která popisuje nepřesnosti GPR měření různými sestavami.

2.4 Rešerše platných předpisů

V oblasti uplatnění georadaru existuje řada technických předpisů a norem, z nichž některé se přímo zaměřují na diagnostiku objektů dopravní infrastruktury georadarem. Níže je uveden přehled těch nejdůležitějších, spolu s krátkým popisem jejich obsahu.

2.4.1 ASTM D6432-11

Americká norma ASTM D6432-11: *Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation* byla naposledy aktualizována v roce 2011. Jde asi o nejpodrobnější normu týkající se užití georadaru při diagnostice podpovrchových vlastností zemín, hornin a jiných materiálů, včetně těch používaných při stavbě pozemních komunikací. Zahrnuje také postup pro lokalizaci zabudovaných objektů, zejména inženýrských sítí, výztuže apod.

Norma popisuje jednotlivé kroky měření a vyhodnocení naměřených dat, potenciační zdroje rušení, 3 způsoby stanovení rychlosti šíření EM signálu a vlivy, které se dotýkají rozlišovací schopnosti této metody. Jsou zde uvedeny tabulky průměrných elektromagnetických vlastností vybraných materiálů (tab. 6) a rozlišovací schopnost pro antény různých frekvencí pro různé dielektrické konstanty prostředí (tab. 7).

Tab. 6 Průměrné elektromagnetické vlastnosti vybraných materiálů dle ASTM D6432-11

Materiál	Dielektrická konstanta	Rychlost EM signálu m/ns	Vodivost mS/m
vzduch	1	0,3	0
voda pramenitá (f, t)	81	0,033	0,1 - 30
voda mořská (f, t, s)	70	0,033	400
led (f, t)	4	0,15	0,1 - 10
písek (h)	4 - 6	0,12 - 0,15	0,0001 - 1
písek nasáklý vodou (h, w, f)	25	0,055	0,1 - 1
jíl nasáklý vodou (h, w, f)	8 - 12	0,087 - 0,106	100 - 1000
žula (suchá)	5	0,134	0,00001
vápenec (suchý)	7-9	0,1 - 0,113	0,000001
křemen	4	0,15	
asfalt	3-5	0,134 - 0,173	
beton (w, f, stáří)	5 - 10	0,095 - 0,134	
plasty, pryskyřice, guma (f, t)	3	0,173	

h = funkce hustoty, w = funkce pórovitosti a obsahu vody, f = funkce frekvence, t = funkce teploty, s = funkce obsahu soli,

Tab. 7 Rozlišovací schopnost (v metrech) pro antény různých frekvencí a různé dielektrické konstanty ϵ_r (založeno na $\frac{1}{4}$ vlnové délky) dle ASTM D6432-11

Frekvence	ϵ_r	1	5	10	15	25	80
25 MHz		3,00	1,34	0,95	0,77	0,60	0,34
50 MHz		1,50	0,67	0,47	0,39	0,30	0,17
100 MHz		0,75	0,34	0,24	0,19	0,15	0,08
200 MHz		0,38	0,17	0,12	0,10	0,08	0,04
300 MHz		0,25	0,11	0,08	0,06	0,05	0,03
500 MHz		0,15	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02
900 MHz		0,08	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01

2.4.2 ASTM D4748-10

Americká norma ASTM D4748-10: *Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar*, byla naposledy aktualizována v roce 2010. Týká se výhradně aplikace georadaru při stanovení tloušťek stmelených konstrukčních vrstev vozovek. Zmiňuje se o tom, že převážně se k tomu to účelu používají antény s centrální frekvencí 1 GHz, které jsou schopné identifikovat jednotlivé vrstvy tloušťky 40 mm a více a dosahují přesnosti +/- 5 mm. Jsou zde uvedeny 3 způsoby zjištění relativní dielektrické konstanty/ rychlosti šíření EM signálu. Norma obsahuje tabulku s těmito údaji pro různé silniční materiály (tab. 8). Dále jsou zde graficky znázorněny hlavní rozdíly mezi principem měření trychtýřovou anténou a anténou typu dipól. Chyba této metody při stanovení tloušťek by měla být podle této normy menší než 15 %.

Tab. 8 Relativní dielektrické konstanty a rychlosti šíření EM signálu pro různé silniční materiály dle ASTM D4748-10

Materiál	Dielektrická konstanta	Rychlost EM signálu m/ns
vzduch	1	0,30
voda	81	0,03
asfalt	2 - 4	0,15 - 0,21
jíl	2 - 10	0,05 - 0,21
beton	4 - 10	0,01 - 0,15
žula	5 - 8	0,11 - 0,15
vápenec	4 - 8	0,10 - 0,15
písek	4 - 6	0,12 - 0,15
písečtá zemina	4 - 6	0,12 - 0,15
jílovitá zemina	4 - 6	0,12 - 0,15
štěrk	4 - 8	0,10 - 0,15

2.4.3 ASTM D6087-08

Americká norma ASTM D6087-08: *Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar*, byla naposledy aktualizována v roce 2008. Týká se výhradně aplikace georadaru při diagnostice stavu betonové mostovky překryté asfaltovou vozovkou, případně vyhodnocení stavu přímo pojižděné mostovky. Je zde uvedeno několik parametrů, které by se měly sledovat v souvislosti s kalibrací celého systému. Měření by se mělo provádět v mřížce s krokem v příčném směru < 1 m (pro trychtýřovou anténu) < 0,6 m (pro anténu typu dipól) a s krokem v podélném směru ≤ 150 mm. Jsou zde popsány 2 způsoby vyhodnocení naměřených dat. V obou případech se vychází z útlumu signálu při průchodu konstrukcí. První vyhodnocuje poměr amplitud odpovídajících spodnímu a hornímu povrchu mostovky a z toho se usuzují místa, kde dochází k oddělení výztuže od betonu. Druhý vyhodnocuje relativní změny v amplitudách odpovídajících jednotlivým prutům horní vrstvy ocelové výztuže, ze kterých se odvozuje poškození krycí vrstvy betonu. Chyba této metody, stanovená na základě vyhodnocení 10 mostů, by měla být podle této normy menší než 11,2 %. Tento postup se dá zřejmě uplatnit pouze u některých typů monolitických železobetonových mostovek.

2.4.4 DMRB 7.3.2 (UK, 2008)

Technický předpis Velké Británie DMRB 7.3.2: *Data for pavement assessment - annex 6 HD 29/2008: Ground-Penetrating Radar (GPR)* vydalo Highway Agency v roce 2008. Tento

předpis upravuje použití georadaru při hodnocení stavu vozovek. Definuje 4 třídy přesnosti použití georadaru A až D, kterým přiřazuje jednotlivé aplikace:

- A – rutinní měření; dostatečná přesnost a spolehlivost,
- B – je potřeba ověření zjištěných charakteristik vozovky jinou metodou,
- C – jen ve výjimečných případech,
- D – neověřené.

Rozhodující je dále rychlost měření, kde se rozlišuje pomalá rychlost (< 30 km/h) a rychlost dopravního proudu (> 80 km/h).

Třída A odpovídá identifikaci změn v konstrukci a měření tloušťek stmelovaných a nestmelovaných vrstev vozovky. Třída B pro měření při pomalých rychlostech odpovídá identifikaci dutin pod nevyztuženým CB krytem, měření polohy výztuže v CB krytu a identifikaci změn vlhkosti podkladních vrstev (při opakovaných měřeních). Při rychlosti dopravního proudu není třída B uplatněna. Zjišťování hloubky trhlin šířících se z povrchu asfaltového krytu je zařazeno do třídy C (pro pomalá měření).

Měření tloušťek vrstev georadarem se využívá pro účely zpětného výpočtu, kdy se pracuje s výsledky měření únosnosti vozovek rázovým zařízením FWD. Přesnost měření tloušťek stmelovaných vrstev při pomalé rychlosti měření je +/- 5 % (v případě měření za vysokých rychlostí měření +/- 9 %). U podkladních vrstev je to +/- 15 % (+/- 30 % při vysokých rychlostech měření).

V příloze normy je uveden popis metody a 4 způsoby výpočtu rychlosti šíření EM signálu.

Tab. 9 Vybrané parametry anténních systémů na základě centrální vysílací frekvence dle DMRB 7.3.2 HD 29/08

Frekvence	450 MHz			1 GHz		
Dielektrická konstanta	Vlnová délka (mm)	Rozlišení vrstvy tl. (mm)	Minimální dosah (mm)	Vlnová délka (mm)	Rozlišení vrstvy tl. (mm)	Minimální dosah (mm)
5	298	75	894	134	34	402
7	252	63	756	113	28	339
9	222	56	666	100	25	300
11	201	50	603	90	23	271
	2 GHz			4 GHz		
Dielektrická konstanta	Vlnová délka (mm)	Rozlišení vrstvy tl. (mm)	Minimální dosah (mm)	Vlnová délka (mm)	Rozlišení vrstvy tl. (mm)	Minimální dosah (mm)
5	67	17	201	34	8	101
7	57	14	170	28	7	85
9	50	13	150	25	6	75
11	45	11	136	23	6	68

Tab. 10 Rychlost šíření EM signálu prostředím a dielektrické konstanty dle DMRB 7.3.2 HD 29/08

Silniční materiál	Rychlost šíření (mm/ns)	Dielektrická konstanta
vzduch	299	1
asfalt	90 - 160	4 - 10
beton	100 - 130	5 - 9
hydraulicky stmelené vrstvy	100 - 120	6 - 9
nestmelené vrstvy	70 - 120	6 - 18
voda	33	81

2.4.5 DMRB 3.1.7 (UK, 2006)

Technický předpis Velké Británie DMRB 3.1.7: *Advice notes on the non-destructive testing of highway structures - 3.5 BA 86/2006: Ground Penetrating Radar (GPR)* vydal Highway Agency v roce 2006. Toto doporučení upřesňuje použití georadaru při diagnostice zděných mostů a mostů s předpjatými nosníky, kde je předpínací výztuž vedena plastovými kanálky.

Jsou zde uvedeny alternativní způsoby měření v tzv. bistatickém módu, kdy vysílač a přijímač jsou odděleny a umístěny/taženy po zkoumaném povrchu konstrukce. V příloze jsou uvedeny 3 konkrétní příklady vyhodnocení a to pro:

- diagnostiku zděného mostu,
- diagnostiku dodatečně předpjatého nosníku s plastovými kanálky pro vedení předpínací výztuže,
- numerické modelování odezvy předpjatého nosníku s plastovými kabelovými kanálky.

Jsou zde uvedeny charakteristiky, které jsou rozhodující při diagnostice georadarem, a to pro různé úrovně vlhkosti zdiva a betonu.

Tab. 11 Dielektrické konstanty a vodivost jednotlivých materiálů dle DMRB 3.1.7

Materiál	ϵ_r	Vodivost mS/m	Materiál	ϵ_r	Vodivost mS/m
vzduch	1	0	jíl suchý	3	1 - 10
kov (železo)	1	10^8	jíl nasáklý vodou *	15	$10^2 - 10^3$
pramenitá voda	81	1	skála	4 - 10	
mořská voda	81	4×10^3	žula suchá	5	10^{-5}
písek (suchý)	3	$10^{-4} - 1$	žula nasáklá vodou	7	1
písek nasáklý vodou *	25	$10^{-1} - 10$	vápenec	4 - 8	0,5 - 2
zemina (suchá)	2 - 6		beton suchý	6	1
zemina nasáklá vodou	5 - 15		beton nasáklý vodou	12	10^8

* pramenitá voda

Tab. 12 Šíření signálu konstrukčním betonem dle DMRB 3.1.7

Materiál	ϵ_r	Frekvence ve vzduchu MHz	Frekvence v materiálu MHz	Rychlost cm/ns	Vlnová délka cm	Rozlišení cm	Z_{min} cm	Dosah cm
beton (velmi suchý)	4	1500	1050	15	14,3	7,2	4,8	< 50
beton (suchý)	6	1500	1050	12,3	11,7	5,9	3,9	< 50
beton (vlhký)	10	1500	1050	9,5	9,1	4,6	3	< 50
beton (nasáklý)	20	1500	1050	6,7	6,4	3,2	2,1	< 50
beton (velmi suchý)	4	900	630	15	23,8	11,9	7,9	50-100
beton (suchý)	6	900	630	12,3	19,5	9,8	6,5	50-100
beton (vlhký)	10	900	630	9,5	15,1	7,6	5	50-100
beton (nasáklý)	20	900	630	6,7	10,6	5,3	3,5	50-100
beton (velmi suchý)	4	500	350	15	42,9	21,5	14,3	> 100
beton (suchý)	6	500	350	12,3	35,1	17,6	11,7	> 100
beton (vlhký)	10	500	350	9,5	27,1	13,6	9	> 100
beton (nasáklý)	20	500	350	6,7	19,1	9,6	6,4	> 100

Z_{min} - hloubka prvního možného detekovaného objektu ($\lambda/3$), rozlišení = $\lambda/2$

Tab. 13 Dosah antén s různou frekvencí dle DMRB 3.1.7

Centrální frekvence (MHz)	Hloubka (m)
1500	0,3 - 0,5
1000	0,5 - 1
500	1 - 2
200	2+
100	7,0

2.4.6 Merkblatt B 10 (Německo, DGZfP, 2008)

Německý technický předpis B 10: *Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen*, byl vydán v roce 2008 organizací Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, e.V. (DGZfP). Jde o velmi podrobný předpis, který řeší komplexně celou problematiku diagnostiky objektů dopravní infrastruktury georadarem. Mimo informací o principu měření, použitém přístrojovém vybavení a zpracování naměřených dat, jsou popsány aplikace v následujících oblastech: beton, zdivo, zakládání (geotechnika), asfalt, materiály železničního svršku.

Přesnost při stanovování tloušťky vrstev se zde uvádí od 5 % výše, podle situace a v případě že jde o homogenní materiál.

Přesnost stanovení polohy výztuže (výztužných sítí) je uvedena v intervalu 5 - 10 % s tím, že pokud jde o výztuž v několika vrstvách je rozhodující vzdálenost mezi výztuží v jednotlivých vrstvách. Pokud je tato vzdálenost > 10 cm, je možné získat informace do hloubky 30 – 40 cm pod tuto výztuž. Pokud je však tato vzdálenost < 5 cm nelze získat žádné informace o stavu materiálu pod touto výztuží.

Uvedená přesnost lokalizace kluzných trnů a kotev v cementobetonovém krytu vozovky je 5 - 10 % (se započítáním vlivů, které má na stanovení polohy vlhkost betonu).

Tab. 14 Elektromagnetické vlastnosti různých materiálů dle Merkblatt B 10

Materiál	Dielektrická konstanta 0,5 - 1 GHz	Vodivost mS/m
vzduch	1	0
voda	81	0,1 - 3
slaná voda	81	3000 - 10000
písek suchý	3 - 6	$10^4 - 1$
písek navlhlý	20 - 30	0,1 - 10
jíl suchý	3 - 6	1 - 100
jíl nasáklý vodou	15 - 40	100 - 1000
vápenec suchý	5 - 7	$< 10^{-3}$
vápenec nasáklý	8 - 10	2 - 10
žula suchá	5 - 6	$< 10^{-3}$
žula nasáklá	7 - 8	1 - 10
asfalt	5 - 9	$< 10^{-3}$
cihla suchá	4 - 8	$< 10^{-3}$
cihla nasáklá	8 - 12	$\sim 10^{-2}$
beton suchý	4 - 7	$< 10^{-3}$
beton nasáklý vodou	8 - 14	0,1 - 10
sníh	8 - 12	0,001 - 0,01
kov (měď)	-	5800

Tab. 15 Typický hloubkový dosah diagnostiky GPR různých materiálů dle Merkblatt B 10

Materiál	Hloubkový dosah v metrech
kámen	5 až > 10
písek a štěrky suchý	5 - 10
písek a štěrky nasáklý vodou	2 - 5
prostý beton	1 - 4
železobeton	0,2 - 1
soudržná zemina suchá	2
soudržná zemina vlhká	1

2.4.7 GSSI manuály (USA, 2008)

Protože pro další měření bude použit georadar americké firmy Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI) je zajímavé zde také uvést údaje, které jsou uvedeny v manuálech k zařízení SIR-20 a k softwaru pro vyhodnocení naměřených dat RADAN 6.6.

Tab. 16 Dielektrické konstanty jednotlivých materiálů dle GSSI

Materiál	ϵ_r	Materiál	ϵ_r
vzduch	1	břidlice	5 - 15
led	3,6	vápenec	4 - 8
asfalt	3 - 5	čedič	8 - 9
beton	4 - 11 (5)	písek nasycený vodou (20% pórovitost)	19 - 24
žula	4 - 17	zeminy a sedimenty	4 - 30
pískovec	6	voda	81

Tab. 17 Typický dosah antén s různou frekvencí dle GSSI

Centrální frekvence (MHz)	Max. dosah (m)	Čas průchodu (ns)	Nejčastější aplikace
2600	0,4	8 - 15	betonové konstrukce, polohy kabelů, výztuže
2000 PALM	0,4	8 - 15	betonové konstrukce, nepřístupná místa, překážky
1600	0,5	10 - 15	univerzální, betonové konstrukce, mostovky
1000	0,6	10 - 20	betonové konstrukce, mělké zeminy, archeologie
900	1,0	10 - 25	tloušťky betonu, detekce vlhkosti
400	4,0	20 - 100	inž. sítě, detekce vlhkosti
270	6,0	50 - 200	inž. sítě, geotechnika
200	9,0	70 - 300	geotechnika
100	20,0	70 - 300	geotechnika
2000 HORN	0,75	8 - 15	tloušťky vrstev a stav vozovek PK
1000 HORN	0,9	10 - 20	hodnocení mostovek a vozovky PK

HORN = trychtýřová anténa (s vyšším uchycením), PALM = speciální malá anténa do nepřístupných prostor

2.4.8 TP 233 – technické podmínky Ministerstva dopravy ČR (1. 7. 2011)

Jediným technickým předpisem v ČR, který popisuje diagnostiku pozemních komunikací georadarem jsou TP 233: *Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací*.

Mimo základního popisu metody a měřicího systému jsou zde zmíněny níže uvedené aplikace georadaru:

- měření na trhlinách krytu vozovek,
- zjišťování stavu a tloušťek konstrukčních vrstev,
- zjišťování stavu aktivní zóny a stavu tělesa pozemních komunikací,
- určování prostorové orientace kluzných trnů a kotev CB krytu,
- dohledání nehomogenit - propustků,
- diagnostika mostních objektů,
- detekce vlhkosti v konstrukčních vrstvách.

Tento předpis je volně ke stažení na adrese: http://www.pjpk.cz/te_po.htm. Jediná aplikace, u které je uvedena přesnost, je pro stanovení polohy kluzných trnů a kotev, kde se uvádí, že pokud se provede kalibrace, lze očekávat přesnost určení hloubek kluzných trnů do 1,0 cm.

2.4.9 Ostatní předpisy a projekty

K aplikaci měření tloušťek vrstev georadarem v ČR je v projednání doplnění **TP 207** o kapitolu: „*Experiment přesnosti zařízení měřících tloušťky vrstev vozovek pozemních komunikací*“, kde je uvedeno, jak postupovat při provádění experimentu přesnosti georadarového zařízení. Podstoupení experimentu přesnosti bude nutné pro získání oprávnění k měření tloušťek vrstev vozovek pozemních komunikací georadarem.

Na Slovensku byly v říjnu 2012 vydány Technické podmienky **TP 3/12: *Využitie georadaru (GPR) pri návrhu rehabilitácie/rekonštrukcie vozoviek***. Tento předpis uvádí jak správně změřit a stanovit tloušťky vrstev vozovky, jak vytvářet homogenní sekce a identifikovat nehomogenity v konstrukci vozovky a v aktivní zóně jejího podloží. Důležitou kapitolou je způsob začlenění tloušťek vrstev homogenních sekcí do databáze vrstev konstrukce vozovky Cestné databanky Slovenské správy ciest.

Ve spojených státech amerických se připravuje dokument, který bude sumarizovat výsledky použití georadaru při měření polohy kluzných trnů a kotev v cementobetonových vozovkách s názvem: „**TechBrief on dowel alignment testing using GPR**“. Tento dokument bude zřejmě kompletní na konci listopadu tohoto roku. Bylo mi ctí nabídnout naše výsledky z měření polohy kluzných trnů a kotev pro přípravu tohoto dokumentu.

Na závěr je potřeba zmínit, že důležitou roli pro vytváření předpisů a norem, ale i k tvorbě publikací mají v této oblasti výzkumná řešení národních i evropských projektů a studií, které odhalují silné a slabé stránky uplatnění georadaru v jednotlivých aplikacích a přenášejí velkou část svého úsilí do praxe. Řešení nadnárodních projektů nabízí také možnost předávání zkušeností v ověřovaných, nebo zkoumaných aplikacích mezi zúčastněnými institucemi, univerzitami, výrobci, uživateli aj. Jedním z takových projektů je evropský projekt **COST action TU1208: “Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar”**, který se začal řešit od roku 2013. Projekt je koordinován italskou univerzitou Roma Tre University a do projektu jsou zapojeni řešitelé z 20 zemí. Akce COST je zaměřena na transfer znalostí a zkušeností v oblasti využívání georadaru ve stavebním inženýrství, ve spolupráci s výzkumnými a komerčními institucemi. Výzkumnými úkoly jsou studie problémů, výhod a limit současných GPR systémů pro jejich aplikace, definice inovačních postupů a pokynů pro efektivní využití georadaru ve stavebním inženýrství, vývoj k vylepšení georadarové metody z pohledu kvality a rychlosti při měření a vyhodnocování dat, atd. Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. je partnerem ve dvou ze čtyř pracovních skupin a podílí se na řešení, i vedením jednoho projektu, který se váže k diagnostice vozovek, mostů a tunelů georadarem.

2.5 Kritické zhodnocení současného stavu

Georadar patří do skupiny zařízení, které se ve světě uplatňuje v mnoha oborech lidské činnosti. Jedním z nich je stavební inženýrství. Výzkumná činnost v rámci disertační práce se zabývá pouze jedné aplikace z této oblasti – nedestruktivního zjišťování polohy kluzných trnů a kotev v cementobetonových vozovkách georadarem, se zaměřením na zjištění limit přesnosti určení přesné polohy těchto výztužných prvků.

Z rešerše literatury a platných předpisů vyplývá, že je nutné připravit podklady pro mnohé aplikace georadaru pro jejich správné a efektivní využití. Zjištění polohy kluzných trnů a kotev ve vozovkách s cementobetonovým krytem georadarem je aplikací, která je toho příkladem.

Dosavadní publikace se zmiňují o této problematice jen částečně a to při hodnocení laboratorních výsledků měření. Je opublikováno pouze jedno současné srovnávací měření, které se váže k aplikaci zjištění polohy výztužných prvků a to měření tloušťek vrstev konstrukcí vozovek s CB krytem. Výsledky zjištěných tloušťek neodpovídají přesnostem, které by zařízení měla dosáhnout a to i přesto že byla nasazena moderní georadarová zařízení s použitím kalibračních metod pro ověření naměřených výsledků.

Normy a předpisy uvádějí tabulkové hodnoty rychlosti šíření EM signálu a relativní permitivity pro různé materiály, konkrétně však pro silniční materiály jako jsou např. beton a asfalt se výrazně liší a rozpětí mezi nimi jsou značná, zejména z důvodu možného nasycení materiálu vodou. Relativní permitivita betonu je tabulkově uváděna v rozpětí od 4 do 20 a rychlost šíření EM signálu je v rozpětí od 67 do 150 mm/ns. Zvolením tabulkové hodnoty při vyhodnocení dat se pracovník může dopustit chyby ve vertikálním směru řádově několika centimetrů.

Přesnosti při lokalizaci kluzných trnů a kotev v cementobetonovém krytu vozovky jsou uvedeny v německém předpise (B 10, 2008) a v technických podmínkách MD (TP 233, 2011). Německá hranice přesnosti stanovené hloubky při lokalizaci kluzných trnů je 10 %, se započítáním vlivů, které má na stanovení polohy vlhkost betonu. V ČR je podmínkou provedená kalibrace a lze očekávat přesnost určení hloubek kluzných trnů do 10 mm. Do roku 2011 však u nás nebylo provedeno žádné srovnávací měření in situ, které by tuto skutečnost potvrdilo, lze tedy hranici 10 mm brát jen jako orientační.

Domnívám se, že právě v souvislosti s řešením národních a evropských výzkumných projektů lze dosáhnout efektivních hodnocení a výsledků pro jednotlivé aplikace, ať už ve spolupráci, či výměně zkušeností, realizací srovnávacích měření, nebo při vlastních laboratorních experimentech a rozhodně s návazností do praxe.

V rámci disertační práce bude provedena řada laboratorních experimentů, in-situ měření a srovnávacích měření pro zjištění limit přesnosti určení přesné polohy kluzných trnů a kotev.

3 Cíl práce

Řešení disertační práce bude zaměřeno na stanovení podmínek použití georadaru jako nedestruktivního nástroje v silniční diagnostice při zjišťování polohy kluzných trnů a kotev v cementobetonových vozovkách pozemních komunikací. Bude zkoumán potenciál georadaru v naplánovaných oblastech poznání:

- detekce vychýlení výztužných prvků v cementobetonových deskách a zjištění přesnosti její lokalizace
- detekce a zjištění přesnosti při stanovení tloušťky cementobetonového krytu
- detekce rozhraní cementobetonového krytu a nadměrného obsahu vody v konstrukčních vrstvách vozovek.

4 Metody a zařízení, vlastní řešení

4.1 Předpoklady

Přístup k řešenému problému vycházel z předpokladu, že ke zjištění limit přesnosti určení přesné polohy kluzného trnu nebo kotvy georadarem je potřeba znát jejich skutečnou polohu. Takto zjištěné dvojice hodnot obou veličin, budou naměřeny ve stejném materiálu CB krytu a za stejných podmínek. Tohoto předpokladu bylo dosaženo tak, že měření georadarem bylo prováděno na laboratorně vyrobených vzorcích, vyrobených z materiálů, které se používají při stavbě vozovek s CB krytem. Dále bylo prováděno měření georadarem také in situ (na stavbě, nebo na pokusných úsecích) s ověřením správné hloubky/tloušťky nebo polohy. Metodika měření georadarem vycházela z platných zahraničních norem a předpisů.

Laboratorní experimenty byly prováděny postupně s návazností na jejich průběžné výsledky. Takto získaný komplexní soubor výsledků měření z mnoha experimentů byl podkladem pro navazující in situ a srovnávací měření a pro výrobu mobilního vozíku. Z tohoto důvodu jsou průběžné výsledky v disertační práci zařazeny do kapitoly 4. Při standardním uspořádání disertační práce jsou všechny výsledky zkoušek uváděny v kapitole: „Výsledky měření“.

4.2 Metody a zařízení

Laboratorní měření jsou realizována zařízením zakoupeným od americké firmy GSSI, převážně využitím vozíku pro lokální měření – model 615 (obr. 20) s kombinací antén 1,6 GHz a 2,6 GHz a řídicí jednotkou SIR 20. Napájení jednotky je zajištěno stabilním zdrojem napětí, antény jsou spojeny s řídicí jednotkou SIR 20 koaxiálními kabely.

Pro měření in situ je dále navrženo a sestaveno mobilního zařízení (viz dále - **kap. 4.7**).

Pro vyhodnocení naměřených dat je použit software Radan 6.6. Metodika vyhodnocování naměřených dat v Radanu je uvedena v manuálech od výrobce zařízení (GSSI, 2004-2008).



Obr. 20 Georadarové vybavení - ruční vozík (model 615)

Parametry dvoukanálového systému GSSI SIR-20 jsou uvedeny v tabulce 18, parametry jednotlivých používaných antén v následující tabulce 19.

Tab. 18 Parametry dvoukanálového systému GSSI SIR-20

Přenosová rychlost (TR)	100 kHz (500 kHz)	
Časový rozsah	0 - 8 ns, volitelné	
Zesílení (zisk)	-20 až 100 dB	
Rozsah provozní teploty	-10 až 40 °C	
	Počet skenů/s při:	
Rozlišení do hloubky (samples per scan):	1 kanálu	2 kanálech
128	450	255
256	265	135
512	153	78
1024	78	39
2048	39	19

Tab. 19 Parametry používaných antén od firmy GSSI

Anténa o centrální frekvenci (model)	2,6 GHz (52600)	1,6 GHz (5100)
Vzdálenost vysílače a přijímače	40 mm	58 mm
Přenosová rychlost (TR)	100 kHz	
Rozlišení do hloubky (samples per scan)	512	
Rozlišení v rámci amplitudy signálu (resolution)	65536 (16 bit)	
Maximální počet skenů za sekundu	100	
Časový rozsah	6 - 10 ns	6 - 20 ns
Horní a spodní frekvenční filtr (MHz)	400 - 5000	250 - 3000
Délka vyslaného EM pulzu	0,4 ns	0,7 ns

Směs pro výrobu zkušebních laboratorních desek je navržena dle normy ČSN EN 13877-1 *Cementobetonové kryty - Část 1: Materiály*.

Vzorky pro zkoušky čerstvého a ztvrdlého betonu se zkoušely dle norem:

- ČSN EN 12350-1: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Odběr vzorků,*
- ČSN EN 12350-2: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím,*
- ČSN EN 12350-7: *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody,*
- ČSN EN 12390-1: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy,*
- ČSN EN 12390-3: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles,*
- ČSN EN 12390-5: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.*

Metody a zařízení pro přípravu směsi, výrobu dřevěného bednění, mísení směsi, přípravu a zkoušení laboratorních vzorků betonu, zhutnění betonové směsi, a pro odformování betonových desek byly zajištěny akreditovanými laboratořemi dopravní infrastruktury a životního prostředí v Tišnově.

4.2.1 Použité statistické metody při výpočtu výsledků měření

4.2.1.1 Základní statistické veličiny pro hodnocení výsledků

Výsledky stanovení polohy kluzných trnů a kotev budou hodnoceny statistickými veličinami. Předpokládejme, že pozorované veličiny mají normální rozdělení pravděpodobnosti.

– **střední hodnota \bar{x}**

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

kde:

x_i - naměřená hodnota,

n - počet naměřených hodnot.

– **výběrová směrodatná odchylka σ**

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

kde:

x_i - naměřená hodnota,

n - počet naměřených hodnot.

– **relativní chyba měření δ_x**

$$\delta_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - \bar{x}|}{\bar{x}} \quad (7)$$

kde:

x_i - naměřená hodnota,

\bar{x} - aritmetický průměr,

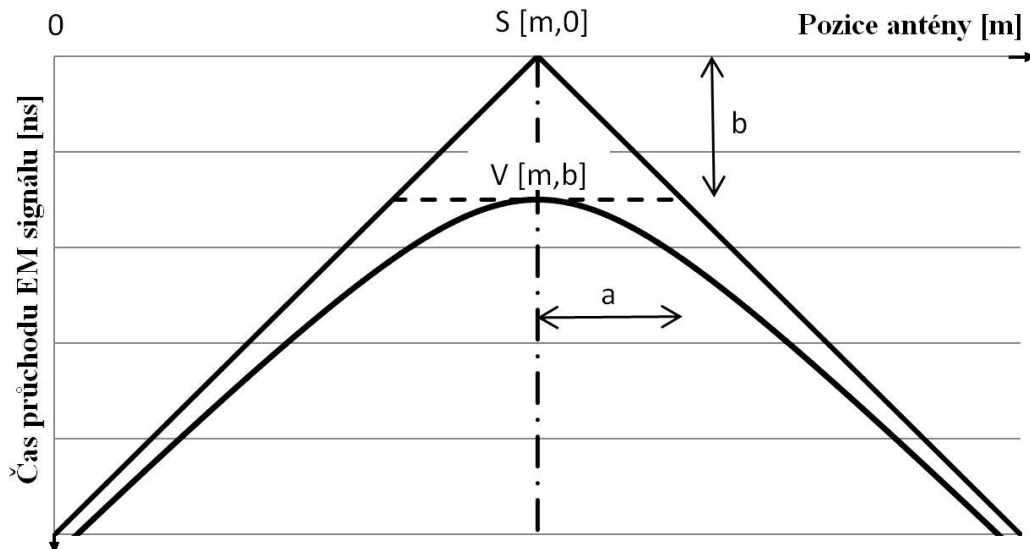
n - počet naměřených hodnot.

– **relativní chyba měření σ_r**

$$(\sigma_r)\% = 100 * \delta_x \quad (8)$$

4.2.1.2 Výpočet vrcholových souřadnic

Výztuž uložená v betonu se při kontinuálním 2D měření georadarem vedeném ve směru kolmém na výztuž se v radargramu zobrazí ve tvaru hyperboly. Poloha výztuže (její horní povrch) odpovídá podle fyzikálního významu vrcholu hyperboly (obr. 21). Umístění tohoto bodu se stanovuje buď manuálně z radargramu, nebo poloautomaticky pomocí softwaru. Využívá se k tomu jeden nebo vícero identifikovaných bodů hyperboly. Z tvaru hyperboly se dá odvodit hloubka uložení výztuže.



Obr. 21 Zobrazení části hyperboly, které se používá pro účely stanovení polohy výztuže v betonu při kontinuálním měření georadarem ve směru kolmém na výztuž.

Rovnice hyperboly pro tyto účely je:

$$y = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 + (x - m)^2} \quad (9)$$

kde:

x - poloha antény při kontinuálním měření - staničení (mm),

y - čas průchodu EM signálu mezi povrchem betonu a výztuží zaznamenaný při poloze antény x (ns),

a - délka vedlejší poloosy hyperboly (mm),

b - délka hlavní poloosy hyperboly; min. hodnota y , z které se počítá hloubka uložení výztuže (ns),

m - staničení, které odpovídá ose výztuže (mm).

4.2.1.3 Aproximace hyperbolické funkce metodou nejmenších čtverců

Princip získání vrcholových souřadnic z naměřených bodů z radargramu jsem provedl výpočtem aproximace hyperbolické funkce metodou nejmenších čtverců. Prokládáním naměřených bodů v kartézském souřadnicovém systému právě hyperbolickými funkcemi můžeme následně stanovit vrcholové souřadnice těchto bazových funkcí.

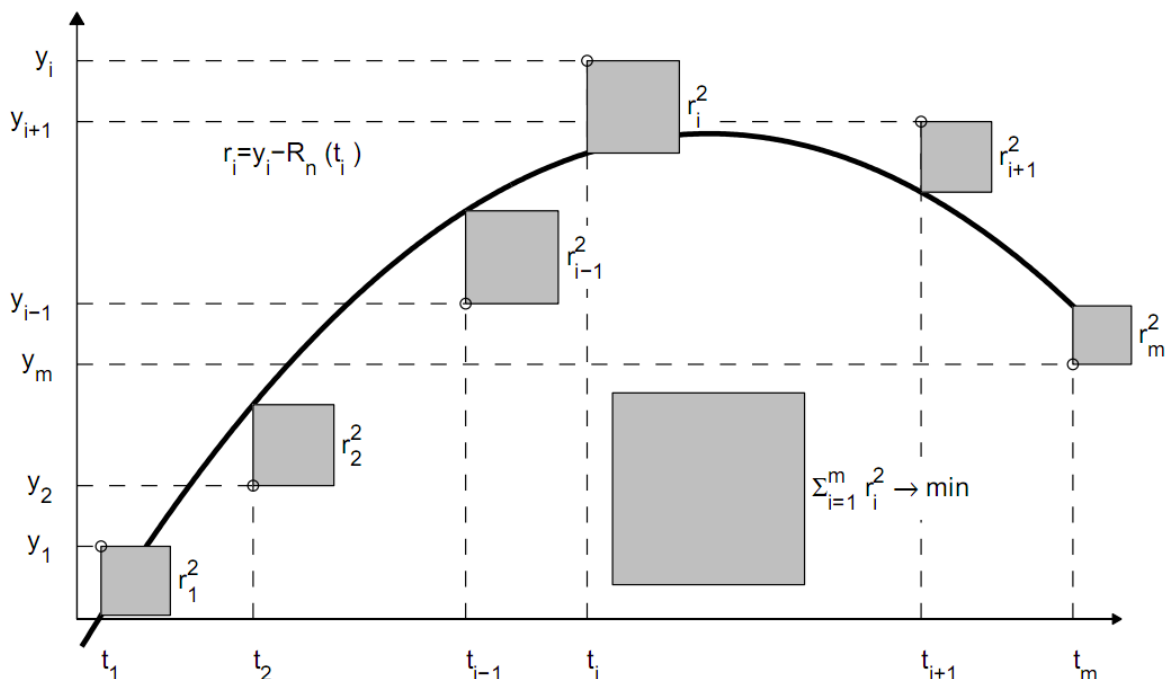
Nechť t je nezávisle proměnná (pozice antény) a $y(t)$ je neznámou funkcí proměnné t , kterou chceme aproximovat. Předpokládejme, že jsme provedli m pozorování, tj. hodnoty y byly změřeny pro určité (navzájem různé) hodnoty t :

$$y_i = y(t_i), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

Záměrem je tedy modelovat $y(t)$ lineární kombinací n bazových funkcí pro nějaké $n < m$:

$$y(t) \approx x_1 \varphi_1(t) + x_2 \varphi_2(t) + \dots + x_n \varphi_n(t) := R_n(t) \quad (11)$$

Bázové funkce navrhujeme podle očekávaného průběhu funkce $y(t)$, určit se mají parametry x_1, x_2, \dots, x_n . Funkce $R_n(t)$ se ve statistice nazývá lineární regresní funkce.



Obr. 22 Princip metody nejmenších čtverců

Návrhová matice \mathbf{A} modelu je obdélníková matice, která má m řádků a n sloupců:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \varphi_1(t_1) & \varphi_2(t_1) & \cdots & \varphi_n(t_1) \\ \varphi_1(t_2) & \varphi_2(t_2) & \cdots & \varphi_n(t_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_1(t_m) & \varphi_2(t_m) & \cdots & \varphi_n(t_m) \end{pmatrix} \equiv (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n), \quad (12)$$

kde $\varphi_i = (\varphi_i(t_1), \varphi_i(t_2), \dots, \varphi_i(t_m))^T$ je i -tý sloupec matice \mathbf{A} .

Maticová formulace modelu je:

$$\mathbf{y} \approx \mathbf{Ax}, \quad (13)$$

kde $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ jsou naměřená data a $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ je vektor neznámých parametrů.

Symbol \approx vyjadřuje přibližnou rovnost.

Rezidua jsou rozdíly mezi naměřenými hodnotami a modelem:

$$r_i = y_i - R_n(t_i) = y_i - \sum_{j=1}^n \varphi_j(t_i)x_j \equiv y_i - \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (14)$$

kde $a_{ij} = \varphi_j(t_i)$.

V maticovém zápisu:

$$\mathbf{r} = \mathbf{y} - \mathbf{Ax}. \quad (15)$$

Parametry x_i chceme určit tak, aby rezidua byla co nejmenší. Metodou nejmenších čtverců je dostaneme, když minimalizujeme součet čtverců reziduí:

$$\|\mathbf{r}\|^2 := \sum_{i=1}^m r_i^2 \rightarrow \min. \quad (16)$$

Řešením **minimalizační úlohy** odhadujeme koeficienty $x_k = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, v případě rovnice hyperboly jsou hledanými koeficienty: a, b, m.

$$\frac{\partial \|\mathbf{r}\|^2}{\partial x_k} = 0 \quad (17)$$

Optimalizační úloha jsem vyřešil v programu Excel nástrojem Řešitel. Konkrétně v našem případě je nutné zadat okrajové podmínky. Vrcholové souřadnice lze vyjádřit: $V [m, b]$.

4.2.1.4 Výpočet parametrů polohy výztužných prvků

Princip získání parametrů polohy kluzných trnů a kotev z naměřených bodů z radargramu jsem provedl výpočtem aproximace naměřených hodnot lineární funkcí metodou nejmenších čtverců. Prokládáním naměřených bodů v kartézském souřadnicovém systému právě lineárními funkcemi se můžeme přiblížit skutečnému lineárnímu tvaru výztužných prvků. Pro tyto výpočty je potřeba znát co nejvíce zjištěných vrcholových souřadnic hyperbol. Dále lze s výhodou využít lineární regrese a intervalů spolehlivosti k hodnocení přesnosti stanovených parametrů polohy.

Nechť x je nezávisle proměnná a $y(x)$ je funkcí proměnné x , kterou chceme prokládat přímkou. Předpokládejme, že jsme provedli n pozorování, tj. hodnoty y byly změřeny pro určité (navzájem různé) hodnoty x :

$$y_i = y(x_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

Uvažovanou **lineární regresní závislost** (grafem je regresní přímka) lze tedy určit ze vztahu:

$$y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i \quad (19)$$

kde:

β_1 - posunutí na ose y ,
 β_2 - směrnice přímky.

$$\beta_1 = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{1}{n} \left(\sum y_i - a \sum x_i \right) \quad (20)$$

$$\beta_2 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (21)$$

Minimální hodnota reziduálního součtu čtverců:

$$S_{min} = \sum y_i^2 - \beta_1 \sum y_i - \beta_2 \sum x_i y_i \quad (22)$$

Bodový odhad rozptylu σ^2 , resp. směrodatné odchylky σ :

$$s^2 = \frac{\sum y_i^2 - \beta_1 \sum y_i - \beta_2 \sum x_i y_i}{n - 2} = \frac{S_{min}}{n - 2}; \text{ resp.} \quad (23)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum y_i^2 - \beta_1 \sum y_i - \beta_2 \sum x_i y_i}{n-2}} = \sqrt{\frac{S_{min}}{n-2}} = \sqrt{s^2} \quad (24)$$

Intervalový odhad koeficientu β_1, β_2 se spolehlivostí $1 - \alpha$:

$$\left(\sum \beta_j - t_{1-\frac{\alpha}{2}} s \sqrt{\frac{n}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}; \sum \beta_j + t_{1-\frac{\alpha}{2}} s \sqrt{\frac{n}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \right) \quad (25)$$

kde $t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ je $(1 - \frac{\alpha}{2})$ – kvantil Studentova rozdělení s n-m stupni volnosti, j=1,2.

Intervalový odhad střední funkční hodnoty y se spolehlivostí $1 - \alpha$:

$$\left(\sum \beta_j f_j(x) - t_{1-\frac{\alpha}{2}} s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum x_i^2 - n(\bar{x})^2}}; \sum \beta_j f_j(x) + t_{1-\frac{\alpha}{2}} s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum x_i^2 - n(\bar{x})^2}} \right) \quad (26)$$

kde $t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ je $(1 - \frac{\alpha}{2})$ – kvantil Studentova rozdělení s n-m stupni volnosti, j=1,2.

Intervalový odhad individuální funkční hodnoty y se spolehlivostí $1 - \alpha$:

$$\left(\sum \beta_j f_j(x) - t_{1-\frac{\alpha}{2}} s \sqrt{\frac{n+1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum x_i^2 - n(\bar{x})^2}}; \dots \right. \quad (27)$$

$$\left. \dots \sum \beta_j f_j(x) + t_{1-\frac{\alpha}{2}} s \sqrt{\frac{n+1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum x_i^2 - n(\bar{x})^2}} \right)$$

kde $t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ je $(1 - \frac{\alpha}{2})$ – kvantil Studentova rozdělení s n-m stupni volnosti, j=1,2.

Z intervalových odhadů střední funkční hodnoty, resp. individuální střední hodnoty lze konstruovat pás spolehlivosti (konfidenční a predikční pás).

Koeficient determinace R^2 a koeficient korelace R :

$$R^2 = 1 - \frac{S_{min}}{\sum y_i^2 - n(\bar{y})^2}; R = \sqrt{1 - \frac{S_{min}}{\sum y_i^2 - n(\bar{y})^2}} = \sqrt{R^2} \quad (28)$$

4.3 Návrh a realizace laboratorních vzorků

4.3.1 Cementobetonové desky tl. 100 mm a 150 mm

Pro experiment stanovení rychlosti šíření elektromagnetického impulzu byly vyrobeny laboratorní cementobetonové desky (obr. 23) o velikostech 600x300x100 mm a 600x300x150 mm. Směs pro výrobu desek byla navržena dle normy ČSN EN 13877-1, 2006: Cementobetonové kryty - Část 1: Materiály (tab. 20).



Obr. 23 Laboratorní cementobetonové desky tloušťek 100 a 150 mm

Z betonu, který byl namíchán pro betonáž laboratorních desek, byly vyrobeny vzorky pro zkoušky obsahu vzduchu v čerstvém betonu a pro zkoušku sednutí kuželem (ČSN EN 12350-1, 2009, ČSN EN 12350-2, 2009 a ČSN EN 12350-7, 2009).

Tab. 20 Návrh směsi pro výrobu cementobetonové desky tl. 100 mm a 150 mm ze silničního betonu

Složka betonové směsi	Dávka pro m ² betonu v kg	Dávka pro 10 l betonu v kg	Dávka pro provzdušnění (5l)	Dávka pro betonovou desku v kg tl. 5cm + kostka + 5%	Dávka pro betonovou desku v kg tl. 10cm + kostka + 5%	Dávka pro betonovou desku v kg tl. 15cm + kostka + 5%	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pozn.
Permostní třída betonu		C 30/37						
Cement CEM I 42,5	387	3,9	1,93	6,0	9,8	13,6	3100	
Písek frakce 0-4 mm [kg]	550	5,5	2,75	8,5	13,9	19,4	2700	žula, ruda
Drcené kamenivo frakce 4-8 mm [kg]	206	2,1	1,03	3,2	5,2	7,3	2700	
Drcené kamenivo frakce 8-16 mm [kg]	963	9,6	4,81	14,8	24,4	33,9	2700	
Záměsová voda [l]	153	1,5	0,76	2,4	3,9	5,4	1000	konzistence S3
Provzdušňovací přísada [l]	4	0,039	0,02	0,060	0,098	0,136		
Vodní součinitel w pro C 30/37 a CEM 42,5		0,45						
Minimální obsah vzduchu v čerstvém betonu		5%						
Celková dávka kameniva [kg]	1789	17,2	55,0	495,1				
Kontrola obsahu jemn. částic [kg]		431					<530, doporuč (350-450)	
Max velikost zrna [mm]		16						
Celková navážka [kg]	2262	22,6	11,3	34,8	57,2	79,6		

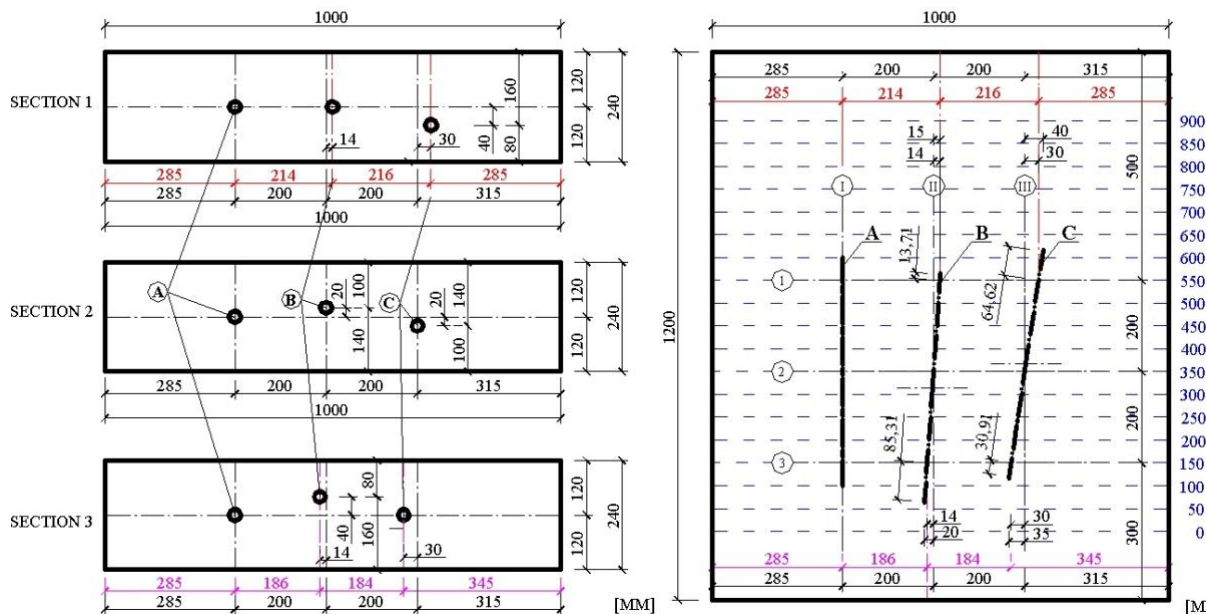
4.3.2 Cementobetonová deska tl. 240 mm

Pro experiment stanovení polohy kluzných trnů byla vyrobena betonová deska o velikosti 1200 x 1000 x 240 mm, do které byly uloženy tři kluzné trny, a to do předem stanovených poloh. Tloušťka desky odpovídá standardní tloušťce cementobetonového krytu na dálnici.

Při návrhu polohy kluzných trnů se vycházelo z požadavků normy ČSN 73 6123-1, kde jsou uvedeny maximální přípustné odchylky polohy výztuže. Tyto hodnoty jsou uvedeny v kapitole 2.2.7.

Pro fixaci výztuže v požadované poloze byly použity dvě dřevěné desky.

První kluzný trn (A) byl umístěn do ideální polohy, bez jakéhokoli posunu a vychýlení v horizontálním či vertikálním směru. Druhý kluzný trn (B) a třetí kluzný trn (C) byly prostorově vychýleny mimo tolerance uvedené v normě. Schéma rozmístění kluzných trnů v desce je uvedeno na obr. 24.



Obr. 24 Půdorys a tři řezy betonovou deskou tl. 240 mm se 3 zabudovanými kluznými trny

kde je vyznačena přesná poloha těchto výztuží a pozice přejezdů antény při následném měření georadarem s krokem 50 mm – kluzný trn A: $dx, dz, s, dy = 0$ mm; kluzný trn B: $dx = 0$ mm, $dz = -20$ mm, $s = 50$ mm, $dy = -35$ mm; kluzný trn C: $dx = 0$ mm, $dz = +20$ mm, $s = 75$ mm, $dy = +20$ mm.

Návrh betonové směsi pro výrobu laboratorní cementobetonové desky byla navržena dle normy ČSN EN 13877-1, 2006. Příprava bednění a následné odlití desky bylo provedeno v akreditované laboratoři dopravní infrastruktury v Tišnově.

Před odlitím CB desky do dřevěného bednění (obr. 25) byly vzdálenosti konců kluzných trnů změřeny posuvným měřítkem. Metodou Mongeovy projekce byla ověřena navržená poloha kluzných trnů.



Obr. 25 Příprava uložení tří kluzných trnů před betonáží desky v akreditované laboratoři CDV v Tišnově

Tab. 21 Návrh směsi pro výrobu cementobetonové desky tl. 240 mm ze silničního betonu

Složka betonové směsi	Dávka pro m ³ betonu v kg	Dávka pro 10 l betonu v kg	Dávka pro 32 l betonu v kg	Dávka pro betonovou desku v kg	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pozn.	
Pevnostní třída betonu	C 30/37						
Cement CEM I 42,5	387	3,9	12,38	111,4	3100		
Písek frakce 0-4 mm [kg]	550	5,5	17,60	158,4	2700		
Drcené kamenivo frakce 4-8 mm [kg]	206	2,1	6,60	59,4	2700	žula, ruda	
Drcené kamenivo frakce 8-16 mm [kg]	963	9,6	30,81	277,2	2700		
Záměsová voda [l]	153	1,5	4,89	44,0	1000	konzistence S3	
Provozdušňovací přísada [l]	4	0,039	0,124	1,1			
Vodní součinitel v pro C 30/37 a CEM 42,5	0,45						
Minimální obsah vzduchu v čerstvém betonu	5%						
Celková dávka kameniva [kg]	1789	17,2	55,0	495,1			
Kontrola obsahu jemn. částic [kg]	431					<530, doporuč (350-450)	
Max velikost zrna [mm]	16						
Celková navážka [kg]	2262	22,6	72,4	651,6			

Rozměry desky: 1,0x1,2x0,24 Objem desky: 0,288 m ³ Dávka pro míchačku: 32 litrů Počet míchaček: 288/32 = 9 míchaček →návrh 10 míchaček - zbudě 32 litrů na zkoušky	Zkoušky: Konzistence čerstvého betonu ČSN ISO 4103, nebo VeBe V3 5-10s Obsah vzduchu: min. 5% Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku na trámcích (4,5 MPa; 30 MPa) Objemová hmotnost
---	---

Objemová hmotnost na trámcích [kg/m³]:

Tlak	2275,4
	2281,2
	2274,1
Tah za ohybu	2277,5
	2272,4
	2271,5
Průměr	2275,3

Zkouška v tlaku 36,313 Mpa
 Zkouška v tahu za ohybu 5,237 Mpa

Po odlití CB desky byla na povrchu vytvořena povrchová úprava koštětem a po zatvrdnutí betonu byla deska odformována.

Z betonu, který byl namíchán pro betonáž laboratorní desky, byly vyrobeny vzorky pro zkoušky obsahu vzduchu v čerstvém betonu a pro zkoušku sednutí kuželem (ČSN EN 12350-1, 2009, ČSN EN 12350-2, 2009 a ČSN EN 12350-7, 2009), (obr. 24). Po zatvrdnutí vzorků ze směsi betonu byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu (ČSN EN 12390-1, 2013, ČSN EN 12390-3, 2009 a ČSN EN 12390-3, 2009), které dosáhly požadovaných hodnot.



Obr. 26 Zkouška sednutí kuželem navržené směsi (vlevo) a pohled na betonovou desku tl. 240 mm (vpravo)

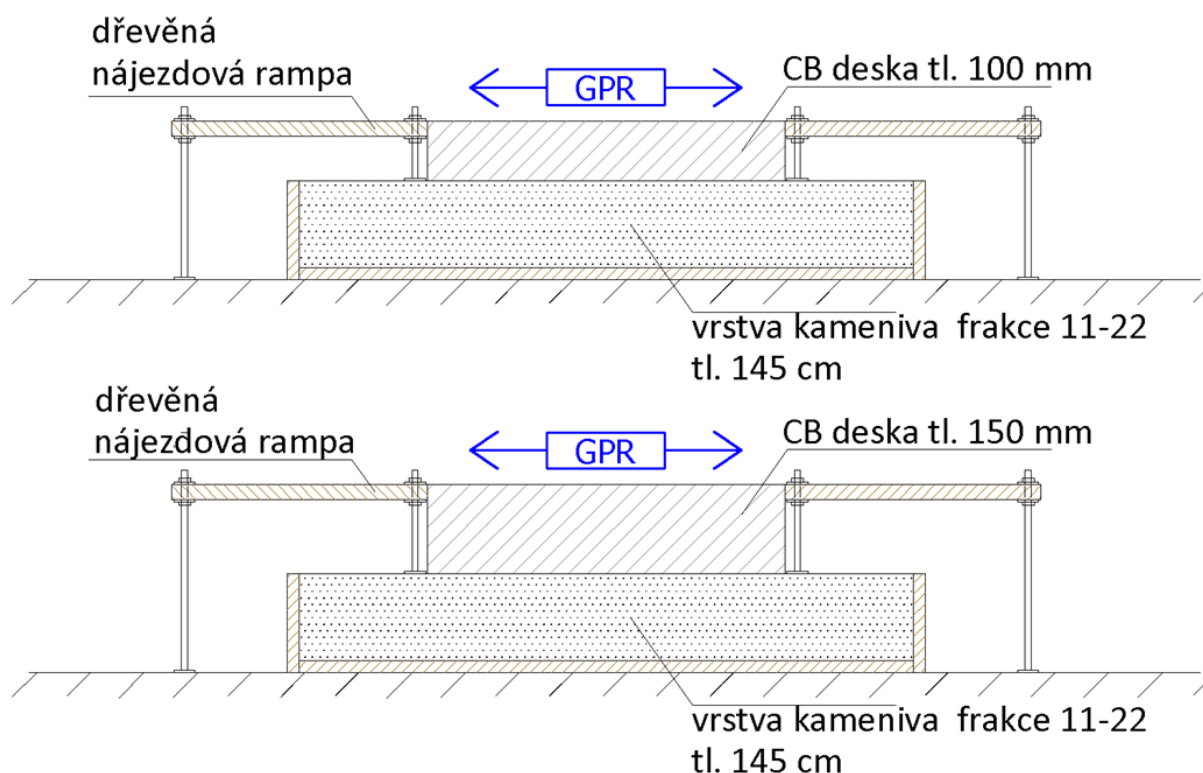
Návrh receptury, příprava materiálů pro výrobu betonové směsi, výroba dřevěného bednění, mísení směsi, příprava laboratorních vzorků pro zkoušení betonu, zhutnění betonové směsi, povrchová úprava betonu a odformování desek byly pod dohledem zkušených pracovníků z akreditovaných laboratoří dopravní infrastruktury a životního prostředí v Tišnově.

4.4 Stanovení rychlosti šíření EM signálu, dielektrické konstanty a posouzení metodami kalibrace CMP a WARR

4.4.1 Laboratorní měření CB desky o tloušťkách 100 mm a 150 mm.

Stanovení rychlosti šíření a dielektrické konstanty bylo provedeno georadarovým měřením na zkušebních nevyztužených laboratorních CB deskách (kap. 4.2 a kap. 4.3.1) uložených na vrstvě kameniva frakce 11-22 mm. Krok měření byl zvolen po 0,5 mm.

Schéματα měření jsou zobrazena na (obr. 27).



Obr. 27 Schémata příčných řezů z laboratorního měření CB desek tl. 100 mm a 150 mm

Měření bylo provedeno v následujících kombinacích:

I. Kombinace střední frekvence dipólové antény:

- frekvence 1,6 GHz (označení **A**)
- frekvence 2,6 GHz (označení **B**)

II. Kombinace natočení přijímače a vysílače k linii přejezdu antény:

- vysílání signálu v linii přejezdu (vysílač a přijímač leží na linii přejezdu a jsou od sebe vzdáleny dle frekvence antény (označení **H**))
- vysílání signálu kolmo k linii přejezdu (vysílač a přijímač neleží na linii přejezdu, jsou vzdáleny ve stejné vzdálenosti kolmo k linii přejezdu - označení **R**)

III. Kombinace vlhkosti vrstvy podkladního materiálu – kameniva frakce 11-22 mm:

- kamenivo o objemové vlhkosti 0% (označení **0**)
- kamenivo o objemové vlhkosti 4% (označení **4**)

IV. Kombinace tloušťek CB desek

- tloušťka 100 mm (označení **CB 0,1**)
- tloušťka 150 mm (označení **CB 0,15**)

Příklad označení: **A-H-0-CB 0,1**: je měření georadarem s dipólovou anténou o frekvenci 1,6 GHz a vysíláním signálu v linii přejezdu na CB desce tloušťky 100 mm, pod kterou je vrstva kameniva o vlhkosti 0 % (obr. 28).



Obr. 28 Měření rychlosti šíření signálu na desce tloušťky 100 mm (měření A-H-0-CB 0,1)

Příklad označení: **B-R-4-CB 0,15**: je měření georadarem s dipólovou anténou o frekvenci 2,6 GHz a vysíláním signálu kolmo k linii přejezdu na CB desce tloušťky 150 mm, pod kterou je vrstva kameniva o vlhkosti 4 % (obr. 29).



Obr. 29 Měření rychlosti šíření signálu na desce tloušťky 150 mm (měření B-R-4-CB 0,15)

Základním předpokladem pro zjištění rychlosti šíření a dielektrické konstanty CB desek jsou jejich podobné elektromagnetické vlastnosti. Obě desky byly změřeny georadarem v uvedených kombinacích vždy třikrát. Na dřevěnou rampu se před měřením umístil ocelový plíšek, aby při vyhodnocení byl jednoznačně určen povrch CB desky.

Protože bylo použito n počet kombinací, dostáváme n počet výsledků:

$$n = n_{KI} * n_{KII} * n_{KIII} * n_{KIV} * p = 2 * 2 * 2 * 2 * 3 = 48 \quad (29)$$

kde:

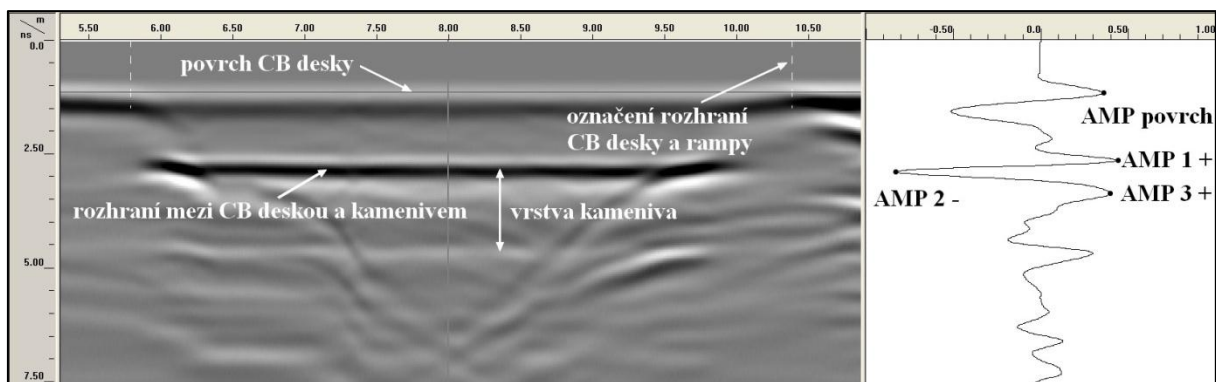
n_{Ki} ... počet členů kombinace,

i ... označení kombinace (I – IV),

p ... počet přejezdů při stejných podmínkách.

U každého z přejezdů byl pořízen záznam z měření, obsahující několik set skenů s odrazy signálu, které jsou ve výsledcích pro jednotlivé přejezdy statisticky vyhodnocovány (obr. 30).

Povrch CB desky je v radargramu zobrazován jako shora první významný peak s maximální kladnou amplitudou – AMP povrch. Rozhraní CB desky s podkladní vrstvou bylo stanoveno ze všech výsledků jednotlivých měření a je také hodnoceno v kap. 4.5. V georadarových záznamech byly postupně odečteny časy průchodu EM signálu významných peaků s kladnou a zápornou amplitudou (AMP 1+; AMP 2- a AMP 3+), které jsou zobrazeny na obr. 30 vpravo, nacházející se v těsné blízkosti předpokládaného rozhraní CB desky s podkladní vrstvou. Následné zpracování dat bylo provedeno exportem dat ze softwaru Radan 6.6 do tabulkového editoru Excel a hodnoceno dle kap. 4.2.1.1.

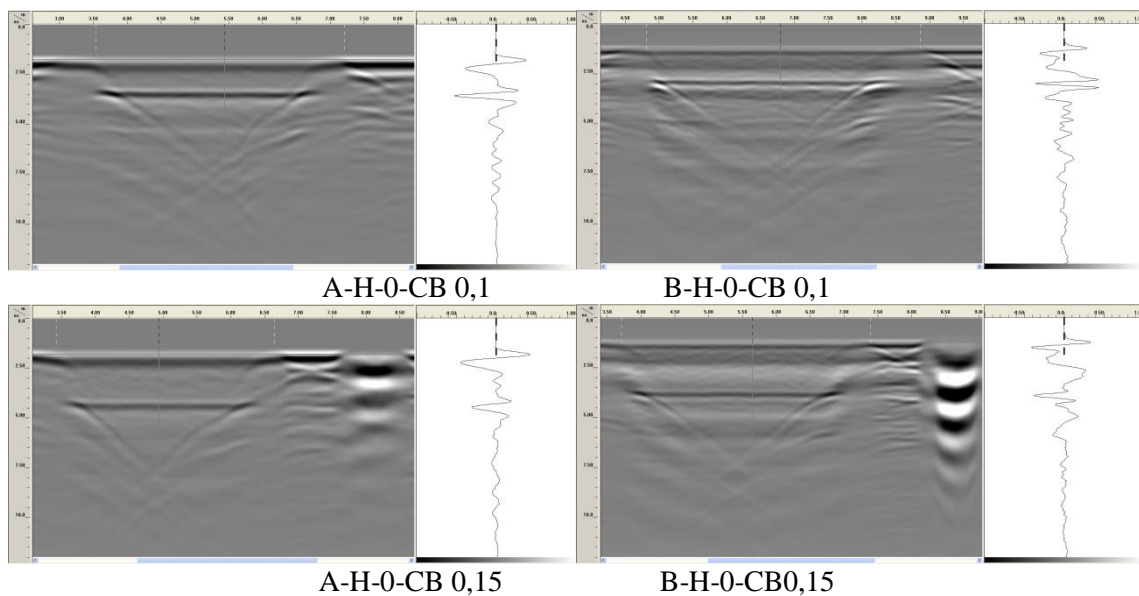


Obr. 30 Vzorový příklad radargramu z měření rychlosti šíření EM signálu CB deskou: tloušťka 100 mm, anténa 1,6 GHz

Záznamy z georadarového měření byly porovnávány také vizuálně, za účelem kontroly dat a zjištění změn v záznamech v různých kombinacích (obr. 31 – 33).

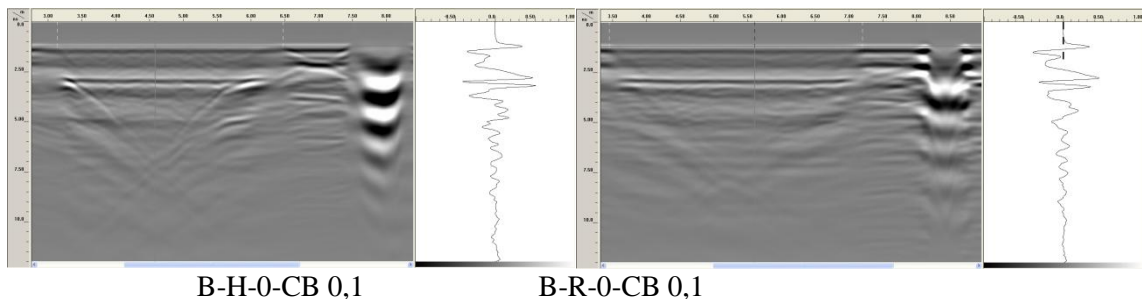
Vizuální posouzení radargramů bylo provedeno z měření obou CB desek pro následující kombinace měření:

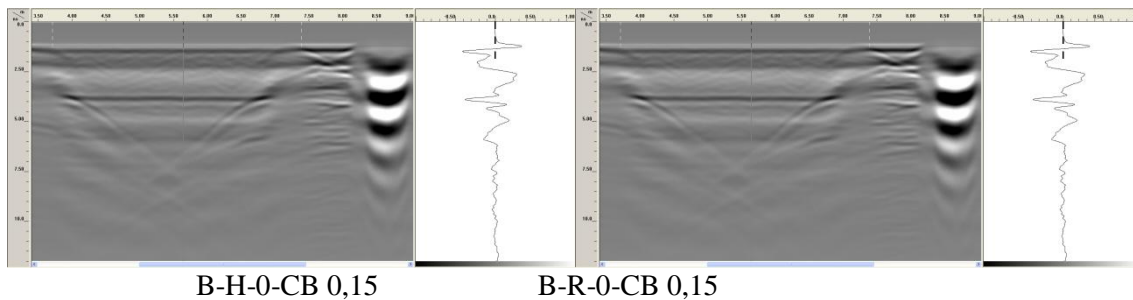
- změna střední frekvence na obou deskách: A (1,6 GHz), B (2,6 GHz)



Obr. 31 Změna střední frekvence v radargramech

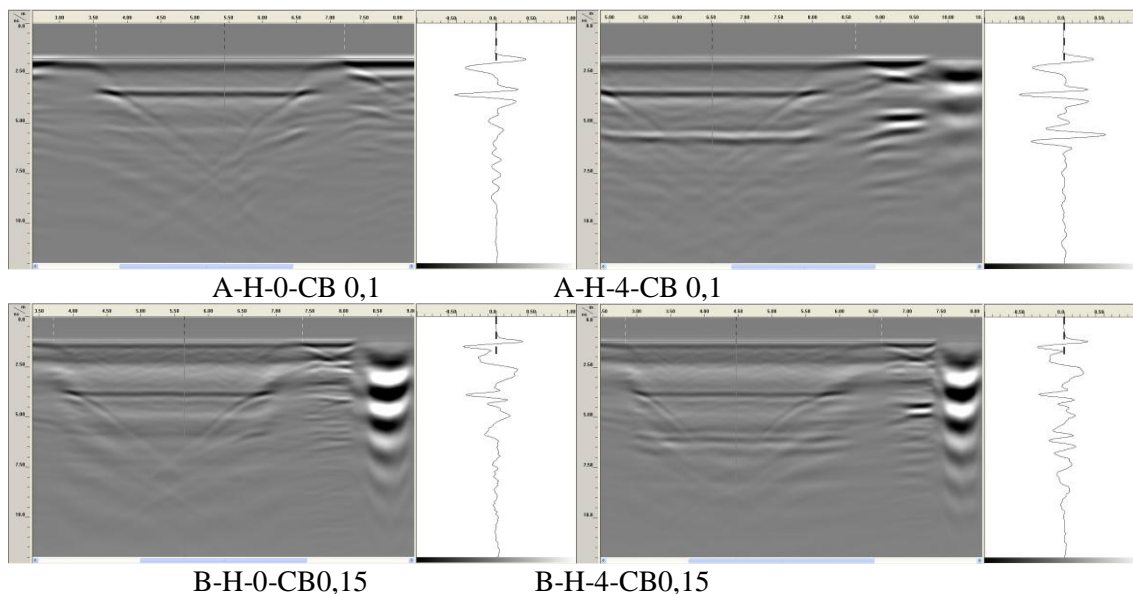
- změna natočení snímačů na obou deskách: H (v linii), R (kolmo)





Obr. 32 Změna natočení snímačů v radargramech

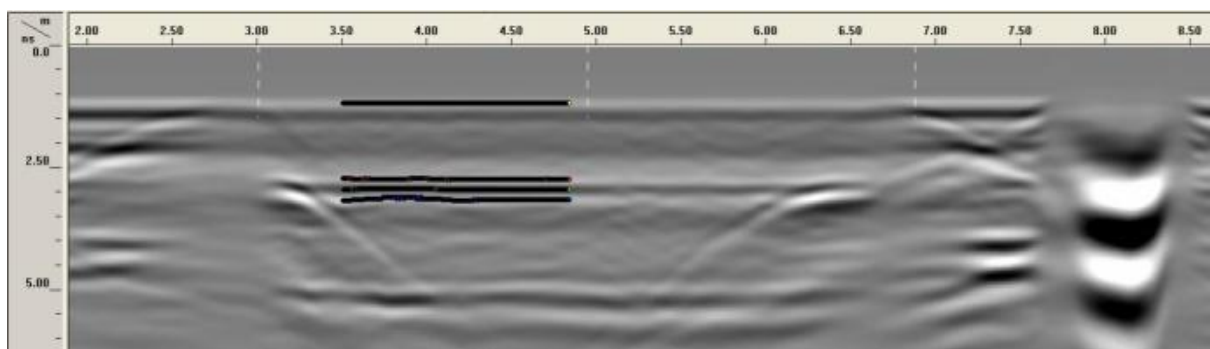
- změna objemové vlhkosti podkladní vrstvy pod oběma deskami: 0 ($w = 0\%$), 4 ($w = 4\%$)



Obr. 33 Změna objemové vlhkosti podkladní vrstvy v radargramech

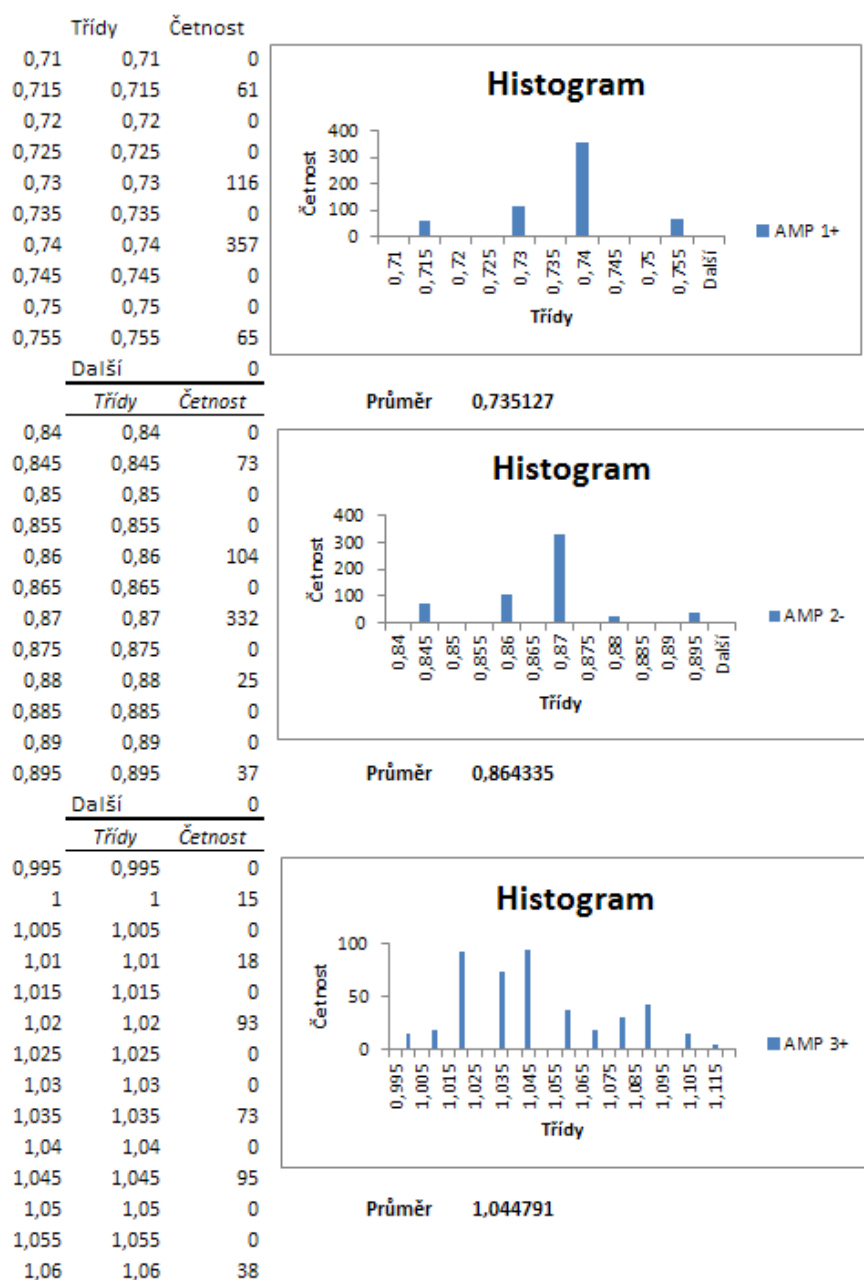
Záznamy z měření tloušťek CB desek anténami o frekvencích 1,6 GHz a 2,6 GHz byla obdobná, větší rozlišovací schopnost obrysů desky bylo dosaženo anténou 2,6 GHz. Zásadní rozdíly v zobrazeních jsou v časových tloušťkách obou CB desek, tzn. ve vzdálenostech od povrchu CB desky k rozhraní CB desky s podkladní vrstvou. Výrazné rozdíly nebyly při změně natočení snímačů prokázány. Jednoznačné rozdíly v záznamech jsou při identifikaci rozhraní podkladní vrstvy, která byla vlhčena.

Ukázka radargramu, jak lze v modulu Interactive Interpretation (Radan 6.6) označit sledovaná rozhraní z jednoho měření je uvedena na obr. 34.



Obr. 34 Ukázka radargramu z měření B-H-4-CB 0,1 a označení sledovaných rozhraní

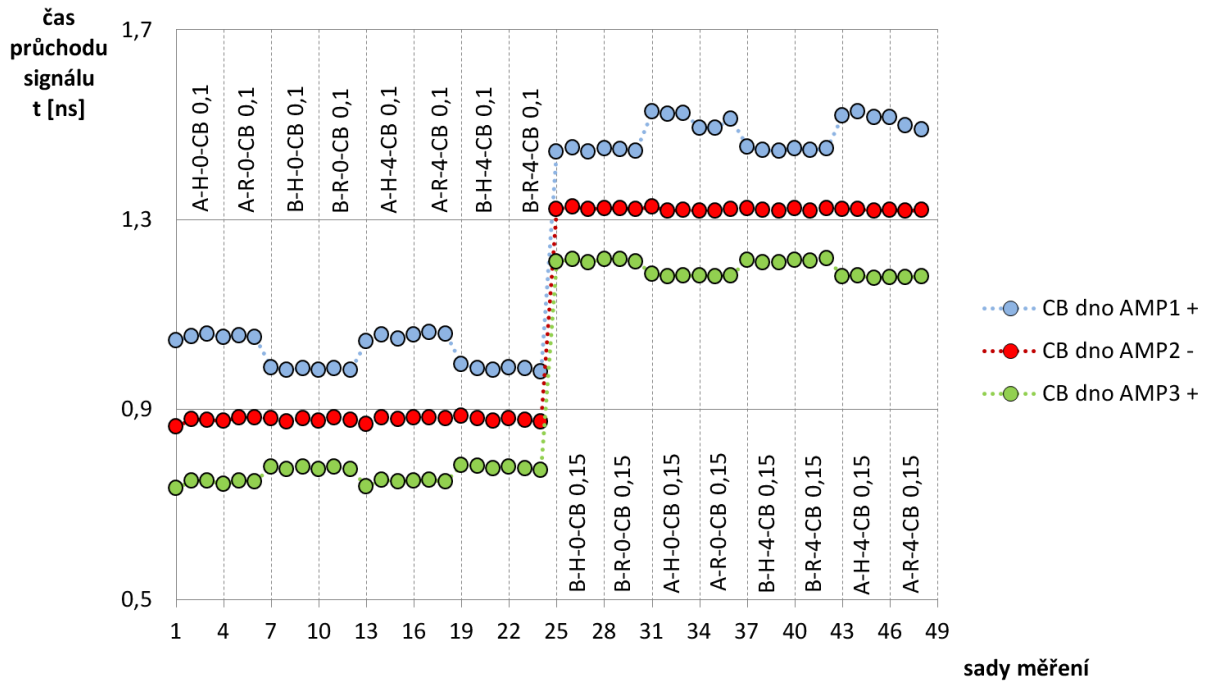
Pro určení a potvrzení správné amplitudy, která vyjadřuje rozhraní mezi betonovou deskou tl. 100 mm a podkladním materiálem, byly vytvořeny histogramy časů průchodu EM signálu mezi sledovanou amplitudou a amplitudou povrchu CB desky ($t/2$) z výsledků jednoho přejezdu (obr. 35).



Obr. 35 Rozdělení četností času průchodu EM signálu CB deskou ($t/2$) z jednoho přejezdu - shora: stanovení pro AMP 1+, stanovení pro AMP 2- a stanovení pro AMP 3+

Četnosti časů průchodu $t/2$ pro amplitudu AMP 3+ jsou proměnlivé oproti četnostem pro amplitudy AMP 1+ a AMP 2+. Toto zjištění je stále předběžné a neupřednostňuje žádnou z amplitud, vyvolává pouze spekulace.

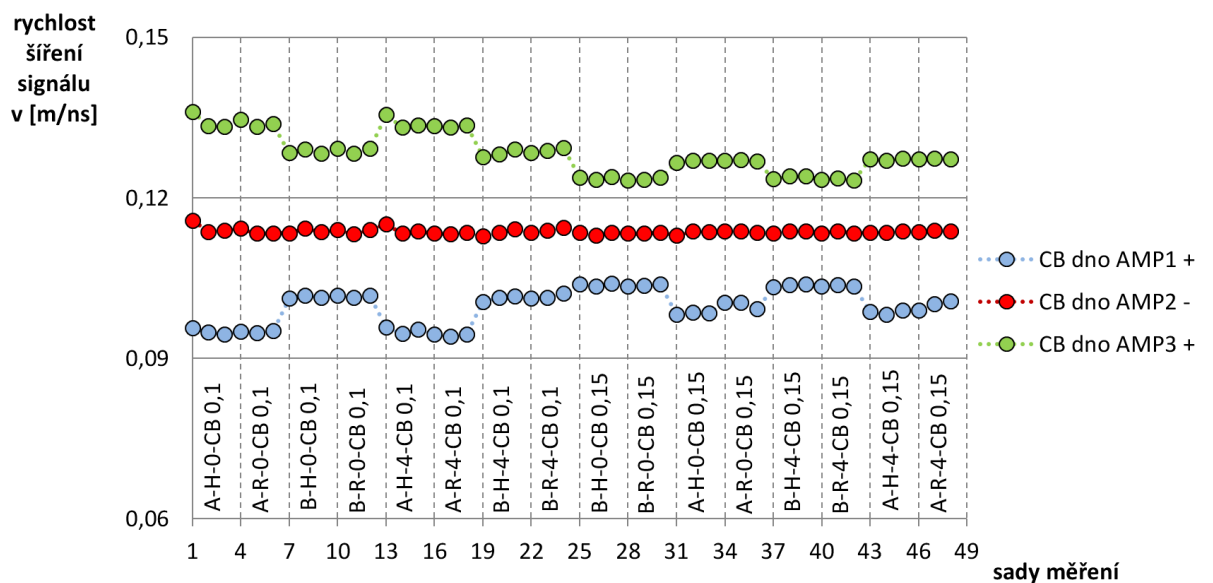
Pokud však porovnáme střední hodnoty času průchodu EM signálu ($t/2$) uvedených tří amplitud, zjištěných při měření obou laboratorních desek v různých kombinacích měření, lze již hodnotit amplitudy mezi sebou. (obr. 36).



Obr. 36 Grafické znázornění zjištěných časů průchodu EM signálu ($t/2$) pro všechny kombinace měření

Konstantní průběh se změnou velikosti časů průchodů deskami různých tloušťek nejlépe vystihuje záporná amplituda AMP 2-. Pokud by bylo tvrzení správné, došlo by při průchodu signálu deskou k záporné změně amplitudy. Tato situace - změna uvažované kladné amplitudy (peaku) na rozhraní vrstev na záporný - nastane pouze v případě, pokud je dielektrická konstanta prvního materiálu nižší než dielektrická konstanta druhého materiálu.

Na základě známých tloušťek CB desek (100 mm a 150 mm) lze dopočítat rychlost šíření EM signálu v těchto laboratorních deskách. Na obr. 37 jsou zobrazeny střední hodnoty rychlosti šíření EM signálu všech tří amplitud, zjištěných v obou laboratorních deskách v různých kombinacích měření. Tato problematika bude dále vysvětlena v kap. 4.5.



Obr. 37 Znázornění stanovených rychlostí šíření EM signálu pro všechny kombinace měření

Z grafického znázornění (obr. 37) lze hodnotit amplitudy mezi sebou a z výsledků zjištěných rychlostí šíření EM signálu lze jednoznačně potvrdit, že rozhraní mezi CB deskou a podkladní vrstvou kameniva je zobrazeno v radargramech (obr. 30-34) peakem se zápornou amplitudou AMP 2- .

Výsledné tabulky (tab. 22 a tab. 23) informují o stanovení rychlosti šíření EM signálu a relativní permitivity laboratorních betonových desek při nasazení různých faktorů měření. Ze stanovené průměrné hodnoty rychlosti lze zpětně přepočítat tloušťky CB desek a simulovat tak situaci, ve které máme k dispozici tento údaj pouze v jednom místě měření.

Můžeme konstatovat, že pokud známe tloušťku betonové desky v kterémkoli místě, lze zcela jednoznačně určit rychlost šíření EM signálu, i při různých faktorech, které mohou ovlivnit měření (střední frekvence antény, natočení antény, rozdílné vlhkosti podkladní vrstvy, apod.). Pokud je CB deska z homogenního materiálu, lze předpokládat i vysoké přesnosti při stanovení její tloušťky.

Tab. 22 Stanovení rychlosti šíření elektromagnetického impulzu cementobetonové desky tl. 100 mm

Faktory měření			Naměřené hodnoty				Stanovené hodnoty		
frekv. antény [GHz]	natočení antény	vlhkost podkl. vrstvy	počet odrazů	čas průchodu EM signálu [ns]	amplituda povrchu	amplituda dna	rychlost šíření [m/ns]	relativní permitivita CB desky	tloušťka CB desky [m]
1,6	bez	0%	549	1,725	18 040	-10 975	0,116	6,7	0,098
1,6	bez	0%	448	1,761	13 802	-10 267	0,114	6,9	0,100
1,6	bez	0%	508	1,757	13 657	-10 324	0,114	6,9	0,100
1,6	kolmo	0%	582	1,755	13 192	-10 178	0,114	6,9	0,100
1,6	kolmo	0%	684	1,766	13 280	-10 340	0,113	7,0	0,100
1,6	kolmo	0%	782	1,764	13 285	-10 491	0,113	7,0	0,100
2,6	bez	0%	490	1,763	12 367	-16 109	0,113	7,0	0,100
2,6	bez	0%	499	1,752	11 525	-12 178	0,114	6,9	0,100
2,6	bez	0%	418	1,761	11 274	-12 697	0,114	6,9	0,100
2,6	kolmo	0%	568	1,755	9 885	-9 938	0,114	6,9	0,100
2,6	kolmo	0%	615	1,768	11 330	-11 721	0,113	7,0	0,101
2,6	kolmo	0%	583	1,754	11 269	-11 705	0,114	6,9	0,100
1,6	bez	4%	430	1,737	15 745	-9 410	0,115	6,7	0,099
1,6	bez	4%	462	1,765	13 522	-10 017	0,113	7,0	0,100
1,6	bez	4%	390	1,758	14 355	-10 147	0,114	6,9	0,100
1,6	kolmo	4%	420	1,767	11 818	-9 159	0,113	7,0	0,100
1,6	kolmo	4%	549	1,769	11 750	-8 970	0,113	7,0	0,101
1,6	kolmo	4%	590	1,763	13 418	-9 960	0,113	6,9	0,100
2,6	bez	4%	480	1,773	13 221	-18 812	0,113	7,0	0,101
2,6	bez	4%	369	1,763	11 658	-12 026	0,113	6,9	0,100
2,6	bez	4%	471	1,753	10 025	-10 568	0,114	6,9	0,100
2,6	kolmo	4%	578	1,762	11 213	-11 404	0,113	6,9	0,100
2,6	kolmo	4%	668	1,756	11 196	-10 944	0,114	6,9	0,100
2,6	kolmo	4%	586	1,748	11 482	-11 309	0,114	6,8	0,099

Tab. 23 Stanovení rychlosti šíření elektromagnetického impulsu cementobetonové desky tl. 150 mm

Faktory měření			Naměřené hodnoty				Stanovené hodnoty		
frekv. antény [GHz]	natočení antény	vlhkost podkl. vrstvy	počet odrazů	čas průchodu EM signálu [ns]	amplituda povrchu	amplituda dna	rychlost šíření [m/ns]	relativní permitivita CB desky	tloušťka CB desky [m]
1,6	bez	0%	405	2,655	18 040	-10 975	0,113	7,0	0,151
1,6	bez	0%	327	2,639	13 802	-10 267	0,114	6,9	0,150
1,6	bez	0%	393	2,641	13 657	-10 324	0,114	6,9	0,150
1,6	kolmo	0%	402	2,637	13 192	-10 178	0,114	6,9	0,150
1,6	kolmo	0%	498	2,637	13 280	-10 340	0,114	6,9	0,150
1,6	kolmo	0%	392	2,642	13 285	-10 491	0,114	6,9	0,150
2,6	bez	0%	446	2,642	12 367	-16 109	0,114	6,9	0,150
2,6	bez	0%	429	2,654	11 525	-12 178	0,113	7,0	0,151
2,6	bez	0%	423	2,643	11 274	-12 697	0,114	6,9	0,150
2,6	kolmo	0%	405	2,648	9 885	-9 938	0,113	7,0	0,150
2,6	kolmo	0%	667	2,648	11 330	-11 721	0,113	7,0	0,150
2,6	kolmo	0%	462	2,643	11 269	-11 705	0,114	6,9	0,150
1,6	bez	4%	445	2,643	15 745	-9 410	0,114	6,9	0,150
1,6	bez	4%	449	2,644	13 522	-10 017	0,113	6,9	0,150
1,6	bez	4%	395	2,636	14 355	-10 147	0,114	6,9	0,150
1,6	kolmo	4%	560	2,639	11 818	-9 159	0,114	6,9	0,150
1,6	kolmo	4%	509	2,637	11 750	-8 970	0,114	6,9	0,150
1,6	kolmo	4%	530	2,639	13 418	-9 960	0,114	6,9	0,150
2,6	bez	4%	438	2,647	13 221	-18 812	0,113	7,0	0,150
2,6	bez	4%	439	2,639	11 658	-12 026	0,114	6,9	0,150
2,6	bez	4%	432	2,638	10 025	-10 568	0,114	6,9	0,150
2,6	kolmo	4%	616	2,647	11 213	-11 404	0,113	7,0	0,150
2,6	kolmo	4%	512	2,638	11 196	-10 944	0,114	6,9	0,150
2,6	kolmo	4%	591	2,647	11 482	-11 309	0,113	7,0	0,150

Dosažené výsledky byly zjištěny pro konstantní tloušťky homogenních CB desek, vyrobených z receptury směsi, která se používá pro cementobetonové kryty vozovek pozemních komunikací (kap. 4.2). Dalšími laboratorními experimenty budeme prokazovat, zda lze získat vysoké přesnosti také pro větší tloušťky. Celkové výsledky z tohoto experimentu jsou uvedeny v tabulce 24 a budou hodnoceny v kapitole 5.1.

Tab. 24 Celkové výsledky experimentu na laboratorních CB deskách tl. 100 mm a 150 mm

Naměřené hodnoty			Stanovené hodnoty					
skutečná tloušťka CB desky [m]	počet kombinací /přejezdů	průměrný počet odrazů	rychlost šíření EM signálu v [m/ns]	výběrová směrodatná odchylka hodnoty v	relativní permitivita CB desky ϵ_r	výběrová směrodatná odchylka hodnoty ϵ_r	průměrná hodnota tloušťky d [m]	výběrová směrodatná odchylka hodnoty d
0,100	12,0	530	0,114	0,001	6,91	0,08	0,100	0,001
0,150	12,0	465	0,114	0,002	6,94	0,03	0,150	0,000

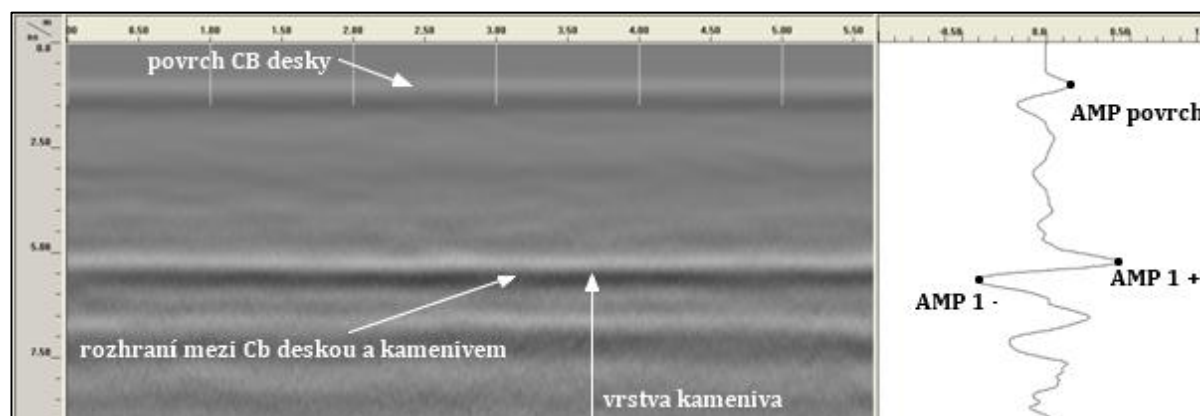
4.4.2 Laboratorní měření CB desky tloušťky 240 mm

Stanovení rychlosti šíření a dielektrické konstanty bylo provedeno také na laboratorní CB desce se zabudovanými kluznými trny (kap. 4.3.2). Měření bylo provedeno v příčném i podélném směru v pěticentimetrových vzdálenostech vozíkem (kap. 4.2) obsahující anténu 2,6 GHz (obr. 38). Měření georadarem této laboratorní desky bylo zaměřeno na zjištění polohy kluzných trnů (kap. 4.6.2), stanovení rychlosti šíření a dielektrické konstanty. Pro stanovení výsledných hodnot bylo použito postupů uvedených v kapitole 4.2.1.



Obr. 38 Měření rychlosti šíření signálu a polohy kluzných trnů na laboratorní zkušební desce

Povrch CB desky je v radargramu zobrazován jako shora první významný peak s maximální kladnou amplitudou – AMP povrch (obr. 39). Rozhraní CB desky s podkladní vrstvou kameniva bylo stanoveno ze všech výsledků jednotlivých měření podobně, jako je tomu v kap. 4.4.1 a 4.5. V georadarových záznamech byly postupně odečteny časy průchodu EM signálu významných peaků s kladnou a zápornou amplitudou (AMP 1+ a AMP 1-), které jsou zobrazeny na obr. 39 vpravo, nacházející se v těsné blízkosti předpokládaného rozhraní CB desky s podkladní vrstvou. Následné zpracování dat bylo provedeno exportem dat ze softwaru Radan 6.6 do tabulkového editoru Excel a hodnoceno dle kap. 4.2.1.1.



Obr. 39 Vzorový příklad radargramu z měření rychlosti šíření EM signálu CB deskou: tloušťka 240 mm, anténa 2,6 GHz

V tomto případě známe tloušťku CB desky a pro stanovení rychlosti šíření a relativní permitivity musíme rozhodnout, která s amplitud představuje dno laboratorní desky. Protože známe také polohu kluzných trnů v této desce, provedeme prozatím tabulkové vyhodnocení (tab. 25 a 26) obou amplitud a posoudíme je v kap. 4.5 při stanovení polohy kluzných trnů.

Tab. 25 Stanovení rychlosti šíření elektromagnetického impulsu CB desky tl. 240 mm pro AMP 1+

Faktory měření		Naměřené hodnoty				Stanovené hodnoty		
frekvence antény [GHz]	profil	počet odrazů	čas průchodu EM signálu [ns]	amplituda povrchu	amplituda dna	rychlost šíření v [m/ns]	relativní permitivita CB desky	tloušťka CB desky [m]
2,6	podélný	1 252	4,161	5 063	11 402	0,115	6,7	0,239
2,6	podélný	1 028	4,163	4 973	13 785	0,115	6,7	0,239
2,6	podélný	1 106	4,165	4 916	12 333	0,115	6,7	0,240
2,6	podélný	995	4,173	4 966	12 187	0,115	6,8	0,240
2,6	podélný	1 910	4,183	4 963	11 918	0,115	6,8	0,241
2,6	podélný	1 118	4,183	4 808	13 502	0,115	6,8	0,241
2,6	podélný	926	4,181	4 771	14 305	0,115	6,8	0,240
2,6	podélný	1 018	4,156	4 802	16 773	0,116	6,7	0,239
2,6	podélný	956	4,174	4 837	14 069	0,115	6,8	0,240
2,6	podélný	956	4,174	4 837	14 069	0,115	6,8	0,240
2,6	podélný	1 487	4,176	4 692	12 070	0,115	6,8	0,240
2,6	podélný	1 189	4,182	4 660	13 952	0,115	6,8	0,241
2,6	podélný	1 163	4,183	4 746	13 038	0,115	6,8	0,241
2,6	podélný	1 072	4,167	4 780	12 091	0,115	6,7	0,240
2,6	podélný	784	4,182	4 679	12 243	0,115	6,8	0,241
2,6	příčný	799	4,173	4 785	11 419	0,115	6,8	0,240
2,6	příčný	988	4,187	4 667	11 731	0,115	6,8	0,241
2,6	příčný	1 030	4,198	4 565	9 957	0,114	6,8	0,241
2,6	příčný	591	4,304	4 669	9 049	0,112	7,2	0,248
2,6	příčný	560	4,172	4 568	11 998	0,115	6,8	0,240
2,6	příčný	600	4,192	4 641	12 996	0,115	6,8	0,241
2,6	příčný	543	4,176	4 635	13 037	0,115	6,8	0,240
2,6	příčný	443	4,173	4 656	12 246	0,115	6,8	0,240
2,6	příčný	460	4,161	4 732	11 268	0,115	6,7	0,239
2,6	příčný	569	4,158	4 614	12 525	0,115	6,7	0,239
2,6	příčný	529	4,114	4 651	10 631	0,117	6,6	0,237
2,6	příčný	359	4,084	4 589	8 406	0,118	6,5	0,235
2,6	příčný	413	4,134	4 597	11 180	0,116	6,6	0,238
2,6	příčný	939	4,196	4 656	12 305	0,114	6,8	0,241
2,6	příčný	1 402	4,169	4 761	12 223	0,115	6,7	0,240
2,6	příčný	1 463	4,177	4 692	12 525	0,115	6,8	0,240
2,6	příčný	1 401	4,168	4 634	13 547	0,115	6,7	0,240
2,6	příčný	1 418	4,173	4 743	12 815	0,115	6,8	0,240
2,6	příčný	1 407	4,177	4 713	11 429	0,115	6,8	0,240

Tab. 26 Stanovení rychlosti šíření elektromagnetického impulzu CB desky tl. 240 mm pro AMP 1-

Faktory měření		Naměřené hodnoty				Stanovené hodnoty		
frekvence antény [GHz]	profil	počet odrazů	čas průchodu EM signálu [ns]	amplituda povrchu	amplituda dna	rychlost šíření v [m/ns]	relativní permitivita CB desky	tloušťka CB desky [m]
2,6	podélný	1 252	4,601	5 063	-8 854	0,104	8,2	0,240
2,6	podélný	1 020	4,602	4 973	-12 076	0,104	8,2	0,240
2,6	podélný	1 107	4,595	4 916	-11 783	0,104	8,2	0,240
2,6	podélný	992	4,585	4 966	-11 488	0,105	8,2	0,240
2,6	podélný	1 922	4,625	4 963	-10 681	0,104	8,3	0,242
2,6	podélný	1 124	4,597	4 808	-13 317	0,104	8,2	0,240
2,6	podélný	922	4,610	4 771	-14 344	0,104	8,2	0,241
2,6	podélný	1 011	4,599	4 802	-14 918	0,104	8,2	0,240
2,6	podélný	951	4,591	4 837	-12 739	0,105	8,2	0,240
2,6	podélný	951	4,591	4 837	-12 739	0,105	8,2	0,240
2,6	podélný	1 486	4,594	4 692	-9 688	0,104	8,2	0,240
2,6	podélný	1 187	4,635	4 660	-11 571	0,104	8,3	0,242
2,6	podélný	1 156	4,611	4 746	-10 319	0,104	8,2	0,241
2,6	podélný	1 078	4,585	4 780	-10 228	0,105	8,2	0,240
2,6	podélný	783	4,619	4 679	-10 134	0,104	8,3	0,241
2,6	příčný	794	4,602	4 785	-8 781	0,104	8,2	0,241
2,6	příčný	990	4,610	4 667	-11 128	0,104	8,2	0,241
2,6	příčný	1 018	4,684	4 565	-9 137	0,102	8,5	0,245
2,6	příčný	582	4,699	4 669	-11 642	0,102	8,6	0,246
2,6	příčný	560	4,559	4 568	-10 258	0,105	8,1	0,238
2,6	příčný	600	4,607	4 641	-14 642	0,104	8,2	0,241
2,6	příčný	543	4,606	4 635	-12 196	0,104	8,2	0,241
2,6	příčný	443	4,574	4 656	-10 264	0,105	8,1	0,239
2,6	příčný	460	4,554	4 732	-9 675	0,105	8,0	0,238
2,6	příčný	569	4,541	4 614	-13 276	0,106	8,0	0,237
2,6	příčný	528	4,488	4 651	-7 959	0,107	7,8	0,235
2,6	příčný	359	4,551	4 589	-4 507	0,105	8,0	0,238
2,6	příčný	412	4,526	4 597	-8 530	0,106	7,9	0,237
2,6	příčný	938	4,585	4 656	-13 043	0,105	8,2	0,240
2,6	příčný	1 393	4,601	4 761	-12 367	0,104	8,2	0,240
2,6	příčný	1 459	4,579	4 692	-12 816	0,105	8,1	0,239
2,6	příčný	1 399	4,576	4 634	-12 993	0,105	8,1	0,239
2,6	příčný	1 419	4,566	4 743	-12 243	0,105	8,1	0,239
2,6	příčný	1 409	4,607	4 713	-11 342	0,104	8,2	0,241

Výsledné tabulky (tab. 22 a tab. 23) informují o stanovení rychlosti šíření EM signálu a relativní permitivity laboratorní betonové desky. Ze stanovené průměrné hodnoty rychlosti lze zpětně přepočítat tloušťky CB desek a simulovat tak situaci, ve které máme k dispozici tento údaj pouze v jednom místě měření.

Dosažené výsledky byly zjištěny na laboratorní CB desce, vyrobené z receptury směsi, která se používá pro stavbu cementobetonových krytů vozovek pozemních komunikací (kap. 4.2).

Celkové výsledky pro obě amplitudy jsou uvedeny v tabulce 27.

Předpokládaná chyba, kterou se můžeme dopustit při záměně amplitudy dna desky pro následné stanovení polohy kluzných trnů je odhadována max. hodnotou 17 mm.

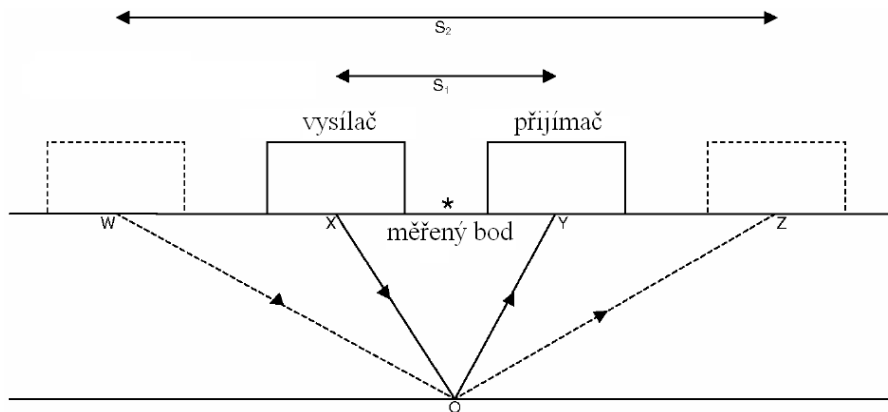
Tab. 27 Stanovení výsledných rychlostí šíření elektromagnetického signálu a stanovení relativní permitivity pro amplitudy dna CB desky tl. 240 mm

Naměřené hodnoty			Stanovené hodnoty					
AMP rozhraní	počet přejezdů	průměrný počet odrazů	rychlost šíření EM signálu v [m/ns]	výběr. sm. odchylka hodnoty v	relativní permitivita CB desky ϵ_r	výběr. sm. odchylka hodnoty ϵ_r	průměrná hodnota tloušťky d [m]	výběr. sm. odchylka hodnoty d
AMP 1+	34	967	0,115	0,001	6,76	0,10	0,240	0,002
AMP 1-	34	965	0,105	0,001	8,19	0,14	0,240	0,002

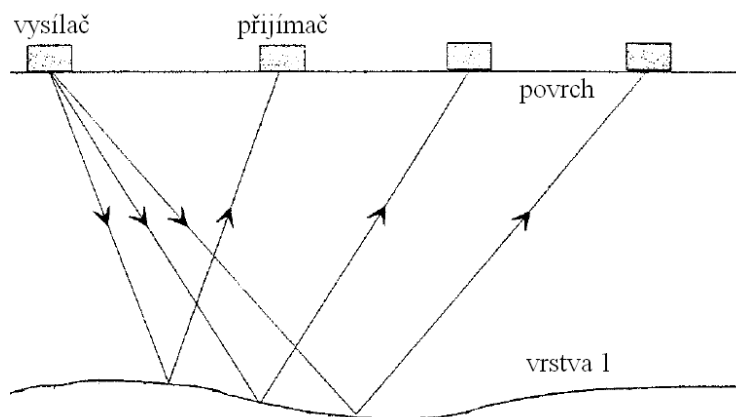
Při georadarovém měření v terénu se na základě zjištěných rozhraní vrstev, stanového času průchodu EM signálu vrstvami a použité rychlosti šíření EM signálu stanovují tloušťky vrstev. Pro zpřesnění výsledku se zpravidla vyžaduje provedení kontrolních vývrtů nebo změření tloušťky na okraji konstrukce. Možností jak limitovat počet vývrtů je stanovení rychlosti šíření EM signálu v betonu pomocí metody CMP nebo WARR (kap. 4.4.3). Těmito metodami budeme prokazovat stanovené hodnoty rychlost šíření EM signálu zjištěné v kapitole 4.4.1.

4.4.3 Laboratorní měření metodami kalibrace CMP a WARR

Obě metody se používají pro stanovení rychlosti šíření EM signálu opakovaným měřením při rozdílné vzdálenosti vysílače a přijímače dipólové-antény. CMP metoda (obr. 40) je založena na vzdalování vysílače (T) a přijímače (R) z jednoho bodu, který leží uprostřed. WARR metoda (obr. 41) je obdoba CMP metody s tím, že se vzdaluje pouze přijímač a vysílač je umístěn stále na stejném místě. Pokud od sebe nelze oddělit vysílač a přijímač antény, použijí se dvě antény stejného typu (obr. 42).



Obr. 40 Schéma pro stanovení rychlosti šíření EM signálu metodou CMP (ASTM D6432-11, 2011)



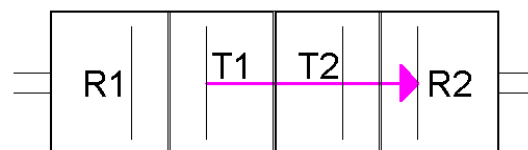
Obr. 41 Schéma pro stanovení rychlosti šíření EM signálu metodou WARR (ASTM D6432-11, 2011)

Vzorec pro výpočet rychlosti šíření EM signálu je následující:

$$v = \sqrt{\frac{s_2^2 - s_1^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (30)$$

kde:

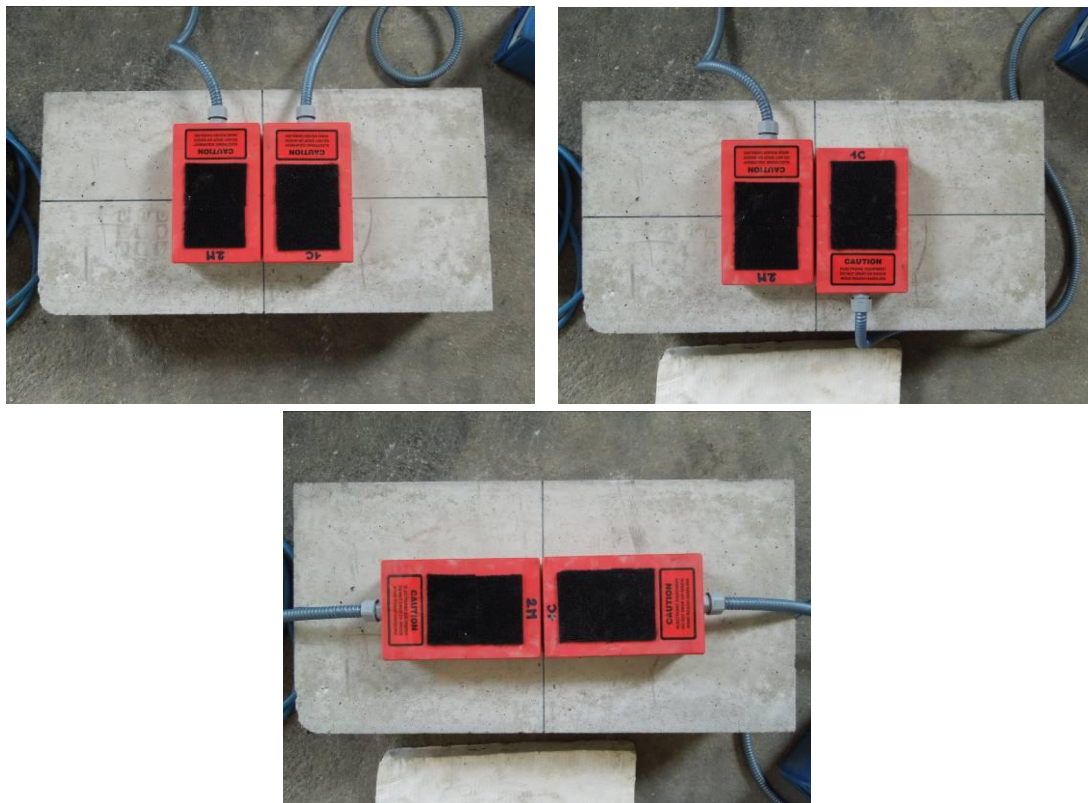
- v - rychlost šíření EM signálu vrstvou vozovky (mm/ns),
- s_2, s_1 - osové vzdálenosti antén vysílače a přijímače (mm),
- t_2, t_1 - časy průchodu EM signálu vrstvou vozovky (mm).



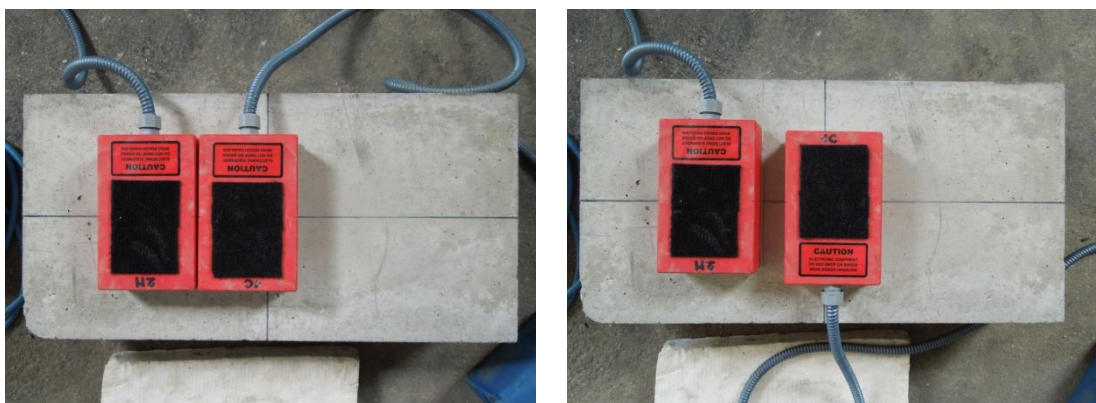
Obr. 42 První pozice při měření metodou CMP/WARR v případě, že od sebe nelze oddělit vysílač a přijímač antény a je nutné použít 2 antény stejného typu: T – vysílač, R – přijímač.

Experiment byl proveden na laboratorní betonové desce tl. 150 mm (kap. 4.3.1) metodou CMP a WARR (obr. 43 a 44). Na základě zjištěné průměrné rychlosti šíření EM signálu z předchozích měření byl proveden výpočet závislosti vzdálenosti vysílač-přijímač a času průchodu EM signálu z vysílače do přijímače pro uvažované průběhy: air wave, ground wave a concrete layer reflection. Anglická označení byla ponechána, protože v obrázcích jsou citována z vlastní publikace (Stryk, 2013). „Air wave“ znamená přímé vlnění mezi přijímačem a vysílačem, „ground wave“ je vlnění, které se odráží od zkoumaného povrchu a „concrete layer reflection“ je vlnění, které se odráží od dna CB desky – prochází tedy vzduchem a deskou.

Následně bylo provedeno měření metodou CMP pomocí dvou dipólových antén o centrální vysílací frekvenci 1,6 GHz (kap. 4.2) pro jejich vzdálenosti 0 až 150 mm se vzorkováním po 1 cm a po 3 cm.



Obr. 43 Foto z měření metodou CMP při pozicích a natočeních antén
nahore vlevo je pozice 1A, nahore vpravo je pozice 2A a dole je pozice 3A

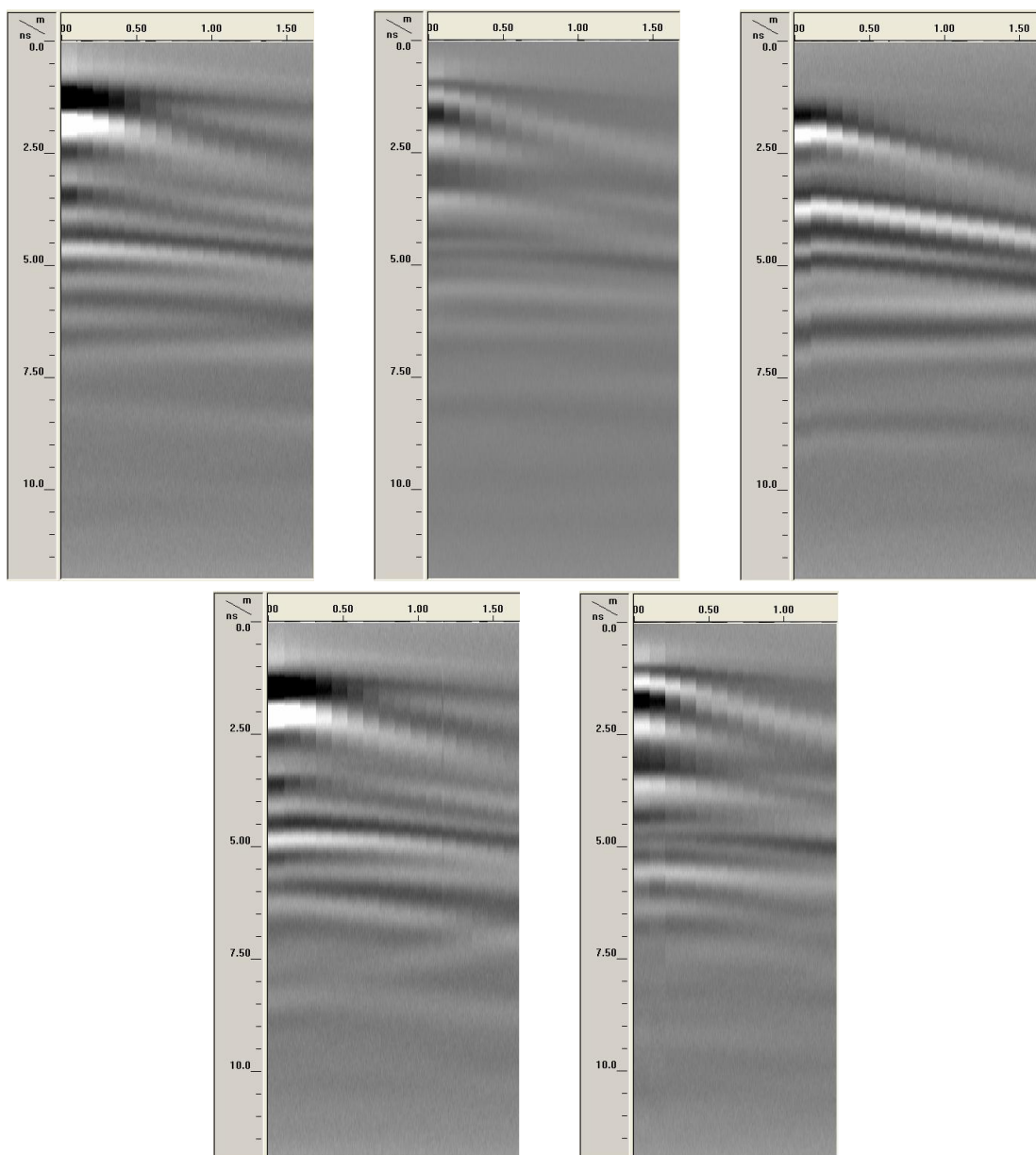


Obr. 44 Foto z měření metodou WARR při pozicích a natočeních antén
vlevo je pozice 1B a vpravo je pozice 2B

Modelováním rychlost šíření EM signálu CB desky v programu Excel byly vypočítány časy průchodů EM signálu pro 3 pozice snímačů z těchto předpokladů:

- tloušťka desky $t = 150$ mm
- rychlost šíření EM signálu vzduchu $v = 0,3$ m/ns
- vzdálenost boxů antén $s: 0 - 0,15$ m
- známá pozice přijímače/vysílače v anténním boxu.

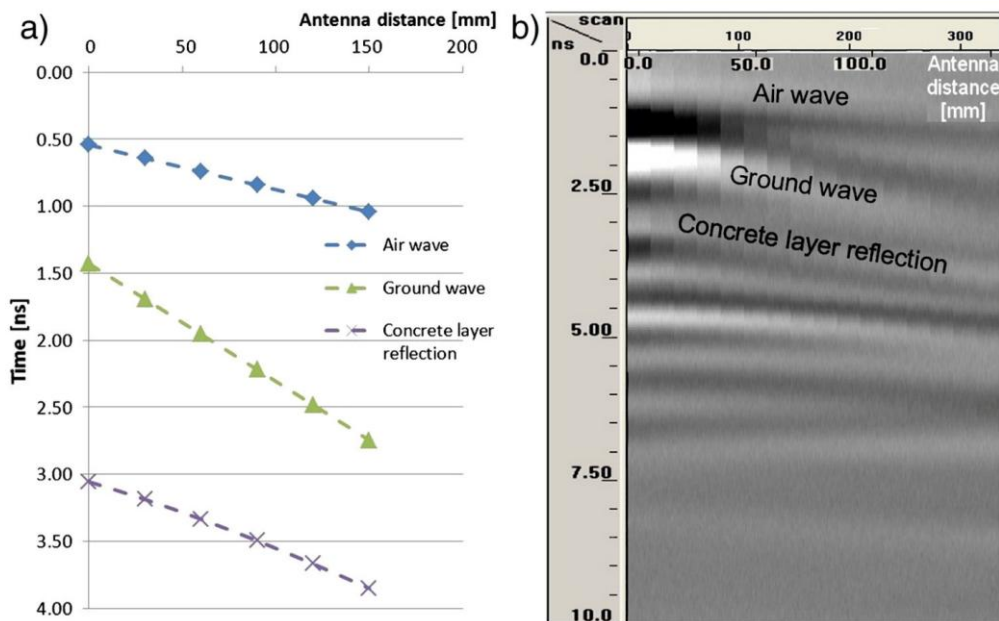
Výsledky z experimentu GPR měření ve formě radargramu a kroku měření 1 cm jsou uvedeny na (obr. 45). Porovnání předem vypočítaných hodnot z modelování a stanovených průběhů ze záznamu měření metodou CMP je uvedeno na (obr. 46).



Obr. 45 Radargramy z měření metodou CMP a WARR se vzorkováním po 1 cm
nahore vpravo je záznam měření metodou CMP s pozicí antén 1A, uprostřed 2A a vlevo 3A, dole
vlevo je záznam měření metodou WARR s pozicí antén 1A a 2A

Záznam 2A na obr. 45 byl změřen s menším počtem skenů při každém kroku měření.

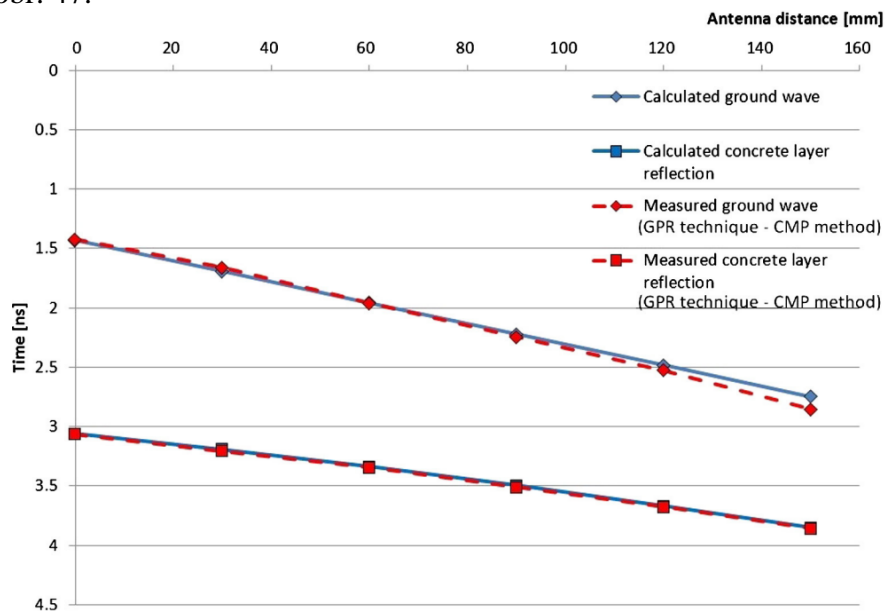
Z výsledku je patrné, že výsledky pro metodu CMP a WARR jsou podobné (podmínky měření a tloušťka desky jsou konstantní).



Obr. 46 Závislost vzdálenosti antén a času průchodu EM signálu z vysílače do přijímače pro air wave, ground wave a dno betonové desky tl. 150 mm (Stryk,2013)

- a) stanovená výpočtem na základě použité rychlosti šíření EM signálu betonem
b) změřená metodou CMP v radargramu

Výsledky z modelování rychlosti šíření EM signálu a získané hodnoty metodou CMP ze záznamu georadaru při pozici natočením antén 1A byly porovnány a sledovala se závislost mezi časy průchodu EM signálů od povrchu a dna CB desky. Závislost z porovnání je uvedena na obr. 47.



Obr. 47: Závislost vzdálenosti antén a času průchodu EM signálu z vysílače do přijímače pro ground wave a dno betonové desky tl. 150 m (Stryk,2013), srovnání hodnot stanovených výpočtem na základě modelované rychlosti šíření EM signálu betonem a hodnot stanovených z měření metodou CMP.

Průměrná rychlost EM signálu vypočtená metodou CMP byla stanovena **0,1128 m/ns**, tedy mírně nižší, než byla stanovena v experimentu při známé tloušťce CB desky (kap. 4.3.1).

4.5 Stanovení rozhraní vrstvy CB desky s podkladní vrstvou vozovky

Pro stanovení rozhraní CB desky s podkladní vrstvou byly použity výsledky z experimentu rychlosti šíření EM signálu a stanovení dielektrické konstanty na zkušebních laboratorních vzorcích (kap. 4.3.1). Zásadním pravidlem pro zjištění rozhraní je předpoklad, že povrch sledovaného materiálu se zobrazuje v radargramech jako první kladný peak amplitudy. Rozhodnutí, zda rozhraní mezi dalšími vrstvami v radargramu je vyjádřeno kladným, anebo záporným peakem nemusí být zpravidla jednoznačně dáno a mělo by se ověřit.

Když elektromagnetická vlna dopadá na rozhraní mezi dvěma materiály s výraznou změnou elektromagnetických vlastností, vznikají odražené a lomené vlny, které se i nadále šíří v materiálu. energii odrazu můžeme popsat reflexním koeficientem:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (31)$$

kde:

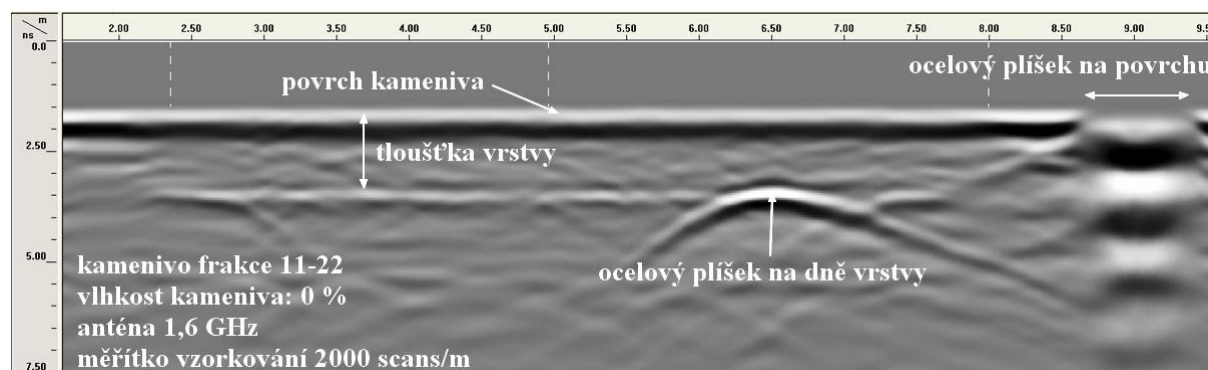
R ...reflexní koeficient

ϵ_{r1} ...dielektrická konstanta prvního materiálu

ϵ_{r2} ...dielektrická konstanta druhého materiálu.

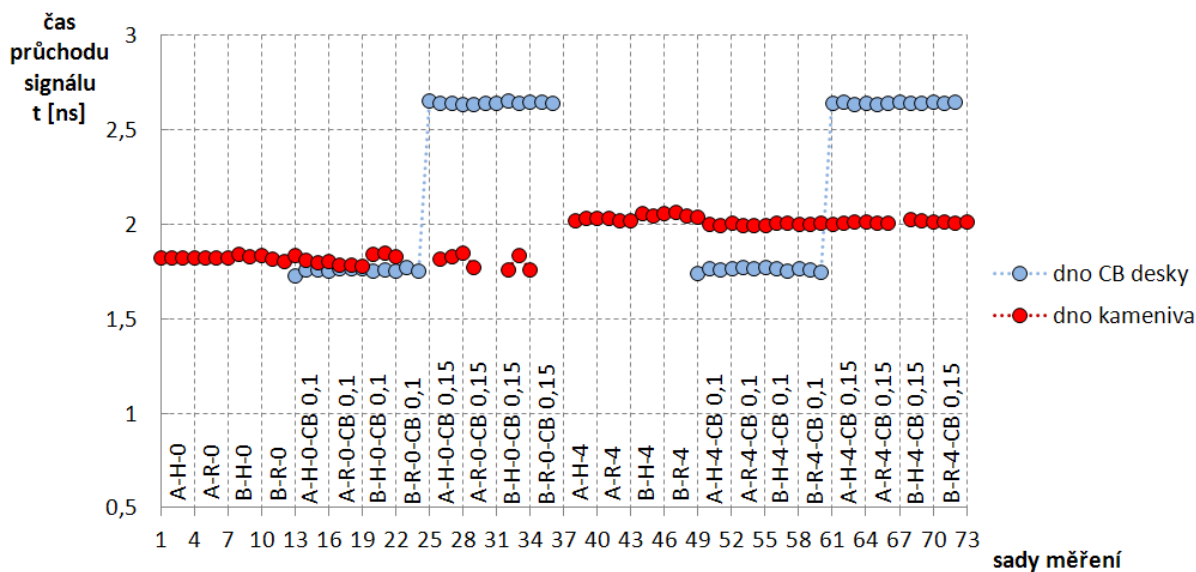
Pokud je dielektrická konstanta prvního materiálu nižší než dielektrická konstanta druhého materiálu, změní se uvažovaný kladný peak na rozhraní vrstev v radargramu na záporný.

Při laboratorním experimentu na zkušebních laboratorních vzorcích (kap. 4.3.1), byla záměrně vlhčena podkladní vrstva kameniva, abychom mohli tuto skutečnost potvrdit. Zároveň v tomto experimentu byla při různých kombinacích také stanovena rychlost šíření podkladní vrstvy kameniva ze známé tloušťky vrstvy a z rozdílu času průchodu vrstvou. Pro jednoznačnou identifikaci v radargramu se na povrch a dno zkoumané vrstvy umístil ocelový plíšek (obr. 48).

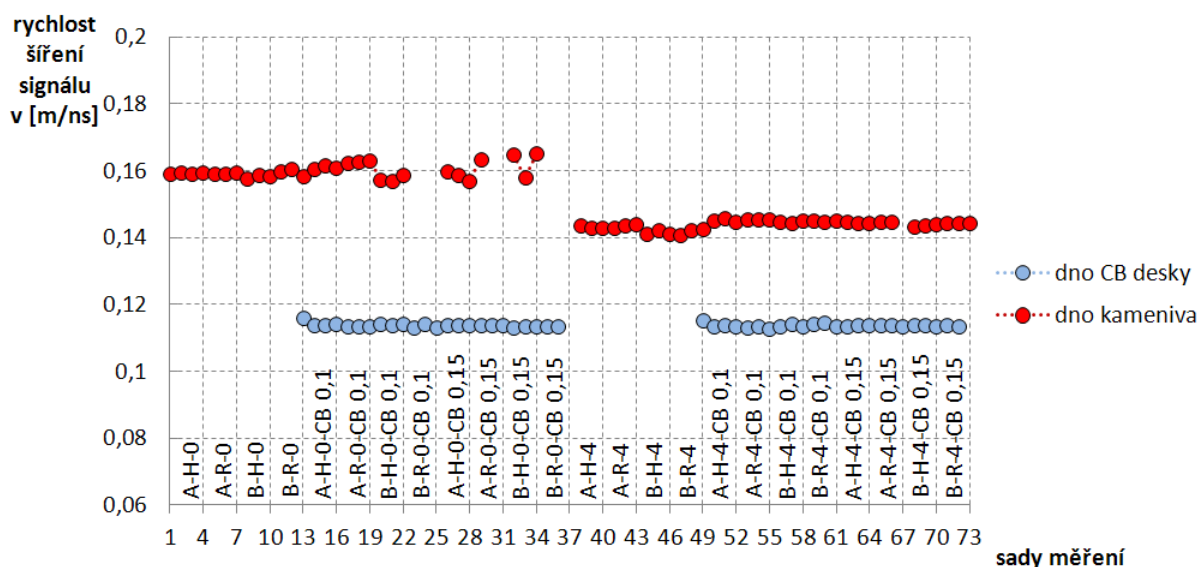


Obr. 48 Vzorový příklad radargramu z měření rychlosti šíření EM signálu podkladní vrstvy kameniva anténou 1,6 GHz

Zjištěné časy průchodu a rychlosti šíření EM signálu pro jednotlivé kombinace a pro obě tloušťky vrstev byly graficky znázorněny na obr. 49 a 50. Stanovení těchto hodnot bylo provedeno stejným způsobem, jako v kap. 4.3.1). Rychlost šíření EM signálu vysušeného kameniva byla stanovena, $v = 0,160$ m/ns a rychlost šíření kameniva o objemové vlhkosti 4 % byla stanovena na $v = 0,144$ m/ns (tab. 28). V tabulce 29 jsou vypočítány hodnoty reflexního koeficientu a porovnány se stanovenou polaritou amplitudy rozhraní vrstev, které splňují teoretické předpoklady.



Obr. 49 Grafické znázornění zjištěných časů průchodu EM signálu ($t/2$) pro všechny kombinace měření



Obr. 50 Grafické znázornění stanovených rychlostí šíření EM signálu ($t/2$) pro všechny kombinace měření

Tab. 28 Stanovení výsledných rychlostí šíření elektromagnetického signálu a stanovení relativní permitivity

Materiál/prostředí/prvek	Rychlost šíření EM signálu [m/ns]	Relativní permitivita
vzduch	0,299	1
CB deska tl. 100 mm	0,114	6,91
CB deska tl. 150 mm	0,114	6,94
vysušené kamenivo	0,160	3,50
kamenivo s obj. vlhkostí 4 %	0,144	4,30

Tab. 29 Stanovení polarity hodnocené amplitudy a reflexního koeficientu na rozhraní vrstev

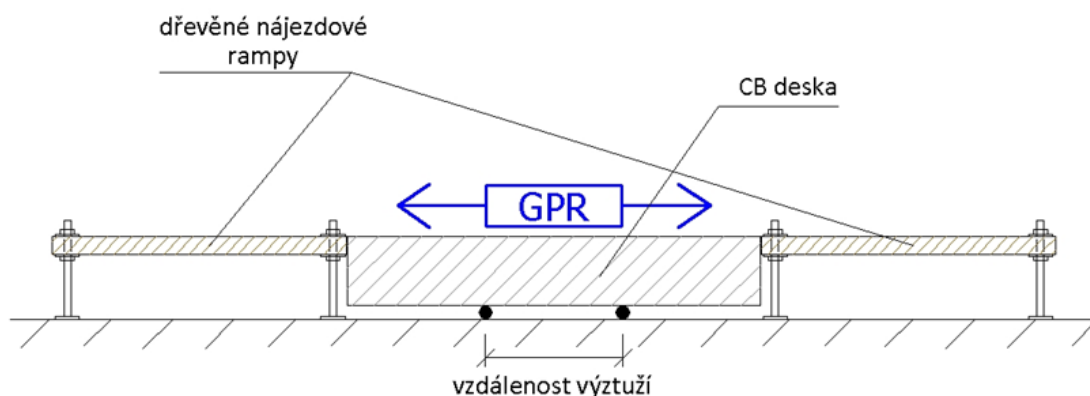
Rozhraní vrstev	Stanovená polarita amplitudy	Reflexní koeficient R
vzduch – CB deska	kladná	-0,45
CB deska – kamenivo	záporná	(0,12; 0,17)
kamenivo – betonový podklad	kladná	(-0,12;-0,17)

4.6 Stanovení polohy výztužných prvků georadarem

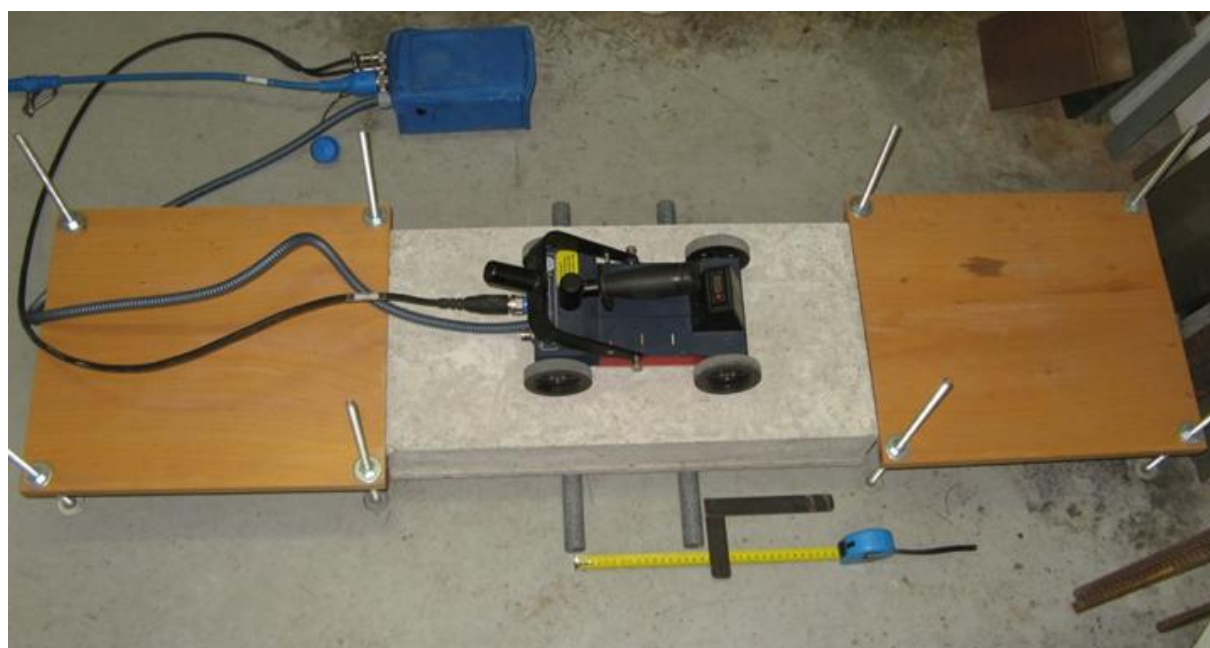
4.6.1 Laboratorní měření minimální horizontální vzdálenosti kluzných trnů a kotev

Kluzné trny jsou od sebe ve vozovkách s CB krytem zabudovány nejčastěji ve vzdálenosti 250 mm, v hloubkách od 100 do 150 mm, podle tloušťek CB krytů. Kotvy se umísťují zpravidla po třech na jednu CB desku délky 5-6 m ve stejných vzdálenostech od sebe. Vzdálenost krajních kotev od příčné spáry musí být maximálně 500 mm.

Na základě těchto skutečností bylo provedeno jako první laboratorní měření na zkušební laboratorní desce tloušťky 100 mm (kap. 4.3.1), pod kterou byly umístěny kluzné trny a kotvy (obr. 51 a 52). Měření bylo provedeno georadarem (kap. 4.2). Postupně byla měněna vzdálenost kluzných trnů s cílem zjistit, jak daleko od sebe mohou být kluzné trny umístěny, aby byly co nejlépe identifikovatelné při interpretaci ve vyhodnoceních georadarem.

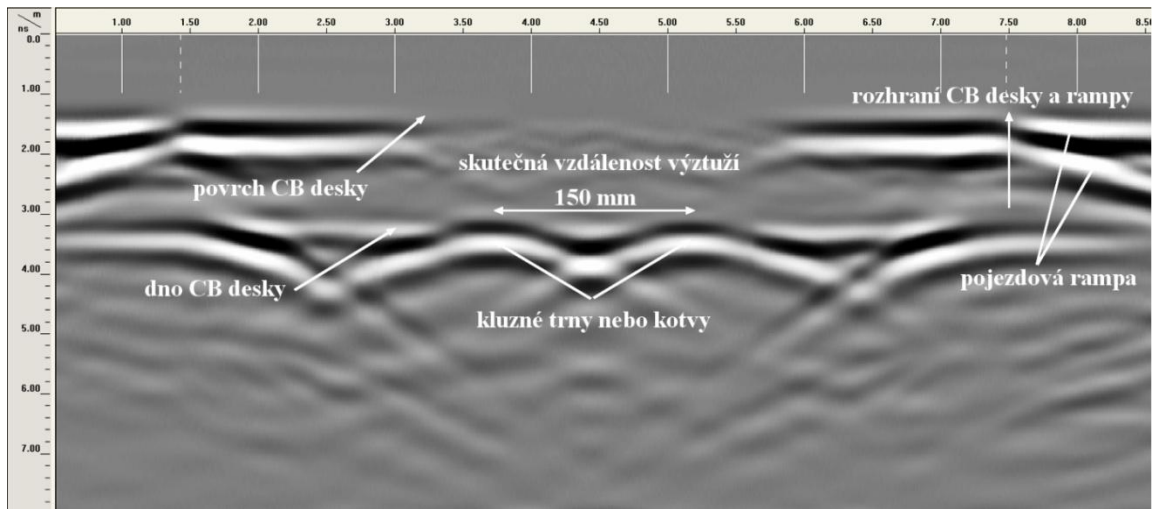


Obr. 51 Schéma umístění výztuží při měření jejich horizontálních vzdáleností georadarem



Obr. 52 Foto z měření vzdálenosti kluzných trnů pod zkušební CB deskou

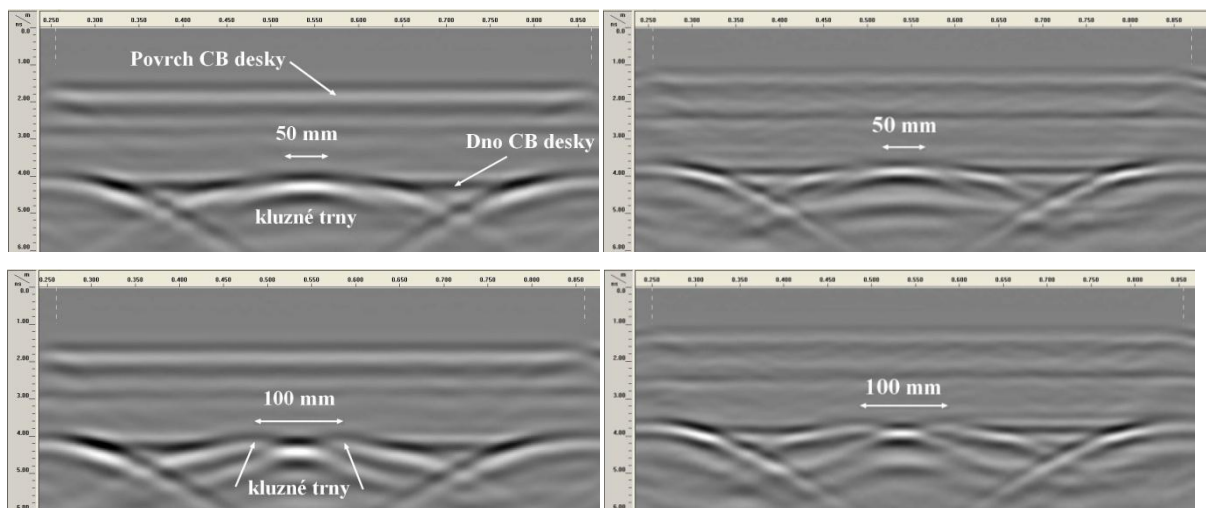
Na obr. 53 je popsán radargram z tohoto měření, s vyznačením skutečné vzdálenosti kluzných trnů nebo kotev.



Obr. 53 Vzorový příklad radargramu z horizontálního vyhodnocení vzdálenosti výztužných prvků v programu Radan 6.6

V radargramech jsou kluzné trny nebo kotevy zobrazeny jako hyperboly, kde vrchol hyperboly s nejvyšší kladnou amplitudou představuje horní povrch výztužného prvku. Jak je patrné ze vzorového příkladu, tvar hyperboly je deformován, protože výztužný prvek je uložen pod laboratorní deskou (není v této desce zabudován).

Pro stanovení minimální horizontální vzdálenosti byly využity postupy při vyhodnocování, zmíněné v kapitole 4.2.1.1 až 4.2.1.3. Pro stanovení hloubky výztuže byla vypočítána rychlost šíření EM signálu ze známé tloušťky CB desky $v = 0,105$ m/ns a rel. permitivita CB desky $\epsilon_r = 8,1$. Tento experiment byl proveden o tři měsíce dříve, než experiment uvedený v kapitole 4.4.1. Záznamy z měření minimálních vzdáleností a porovnatelných záznamů jsou uvedeny na obr. 54. Dále jsou uvedeny také výstupní tabulky zjištěných odchylek při stanovení vzdálenosti na desce tl. 100 mm (tab. 30 a 31).



Obr. 54 Radargramy z měření dvou kluzných trnů umístěných vedle sebe pod betonovou deskou tl. 150 mm osová vzdálenost výztuže 50 mm, anténa 1,6 GHz (nahore vlevo), osová vzdálenost výztuže 50 mm, anténa 2,6 GHz (nahore vpravo), osová vzdálenost výztuže 100 mm, anténa 1,6 GHz (dole vlevo), osová vzdálenost výztuže 100 mm, anténa 2,6 GHz (dole vpravo).

Větší rozlišovací schopnost obrysů desky, dna desky a výztuží bylo dosaženo anténou 2,6 GHz. Výrazné rozdíly v zobrazení kluzných trnů a kotev nebyly při vyhodnocení prokázány.

Při osové vzdálenosti výztuží 50 a 75 mm došlo při vyhodnocení k celkovému, nebo částečnému splynutí obou výztuží do jedné. Při osové vzdálenosti 100 mm již byly s vysokou přesností určeny vzdálenosti výztuží. Bylo ověřeno, že při vzorkování 200 scans/m byly získány stejné výsledky jako při vzorkování 2000 scans/m a vyhodnocené odchylky ve vertikálním i horizontálním směru byly srovnatelné.

Tab. 30 Vyhodnocené odchylky polohy výztužných prvků pod deskou tloušťky 100 mm

Parametry měření				Měření			Stanovení odchylek				
typ výztuže	středová vzdál. výztuží [mm]	střední frekv. [GHz]	měřítka vzork. [scans/m]	čas průch. výztuž č.1 [ns]	čas průch. výztuž č.2 [ns]	rozdíl vzdál. výztuží x [mm]	hloubka výztuže č.1 - h ₁ (mm)	hloubka výztuže č.2 - h ₂ (mm)	odch. h ₁ [mm]	odch. h ₂ [mm]	odch. x [mm]
KT	300	1,6	2000	1,891	1,891	300	99	99	1	1	0
KT	250	1,6	2000	1,891	1,891	245	99	99	1	1	5
KT	200	1,6	2000	1,875	1,891	201	98	99	2	1	-1
KT	150	1,6	2000	1,906	1,875	151	100	98	0	2	-1
KT	100	1,6	2000	1,891	1,891	105	99	99	1	1	-5
KT	50	1,6	2000	splynutí							
kotva	300	1,6	2000	1,891	1,906	299	99	100	1	0	1
kotva	250	1,6	2000	1,875	1,891	249	98	99	2	1	1
kotva	200	1,6	2000	1,891	1,906	200	99	100	1	0	0
kotva	150	1,6	2000	1,922	1,906	151	101	100	-1	0	-1
kotva	100	1,6	2000	1,906	1,922	103	100	101	0	-1	-3
kotva	50	1,6	2000	splynutí							
kotva	50	1,6	200	splynutí							
kotva	100	1,6	200	1,906	1,922	97	100	101	0	-1	3
kotva	150	2,6	200	1,859	1,859	155	97	97	3	3	-5
kotva	100	2,6	200	1,906	1,875	104	100	98	0	2	-4
kotva	50	2,6	200	splynutí							
kotva	50	2,6	2000	splynutí							
kotva	100	2,6	2000	1,938	1,891	101	101	99	-1	1	-1
kotva	150	2,6	2000	1,953	1,859	153	102	97	-2	3	-3
KT	100	2,6	2000	1,891	1,875	100	99	98	1	2	0
KT	50	2,6	2000	splynutí							
KT	50	2,6	200	splynutí							
KT	100	2,6	200	1,875	1,875	95	98	98	2	2	5

Tab. 31 Stanovení odchylek polohy výztužných prvků pod deskou tloušťky 100mm

Tloušťka desky 100mm, stanovená rychlost šíření v = 0,105 m/ns								
Průměr výztuže [mm]	Frekvence antény [GHz]	Měřítka vzorkování [scans/m]	Středová vzdálenost výztuží [mm]					
			50	100	150	200	250	300
20	2,6	2000	N	1/1mm	3/3mm	x	x	x
20	2,6	200	N	2/4mm	3/5mm	x	x	x
20	1,6	2000	N	1/3mm	1/1mm	1/0mm	2/1mm	1/1mm
20	1,6	200	N	1/3mm	x	x	x	x
25	2,6	2000	N	2/0mm	x	x	x	x
25	2,6	200	N	2/5mm	x	x	x	x
25	1,6	2000	N	1/5mm	2/1mm	2/1mm	1/5mm	1/0mm
25	1,6	200	x	x	x	x	x	x

N – splynutí výztuží
n/n mm – odchylka hloubky výztuží (vertikální směr)/odchylka vzdálenosti výztuží (hor. směr) [mm]
x – bez měření

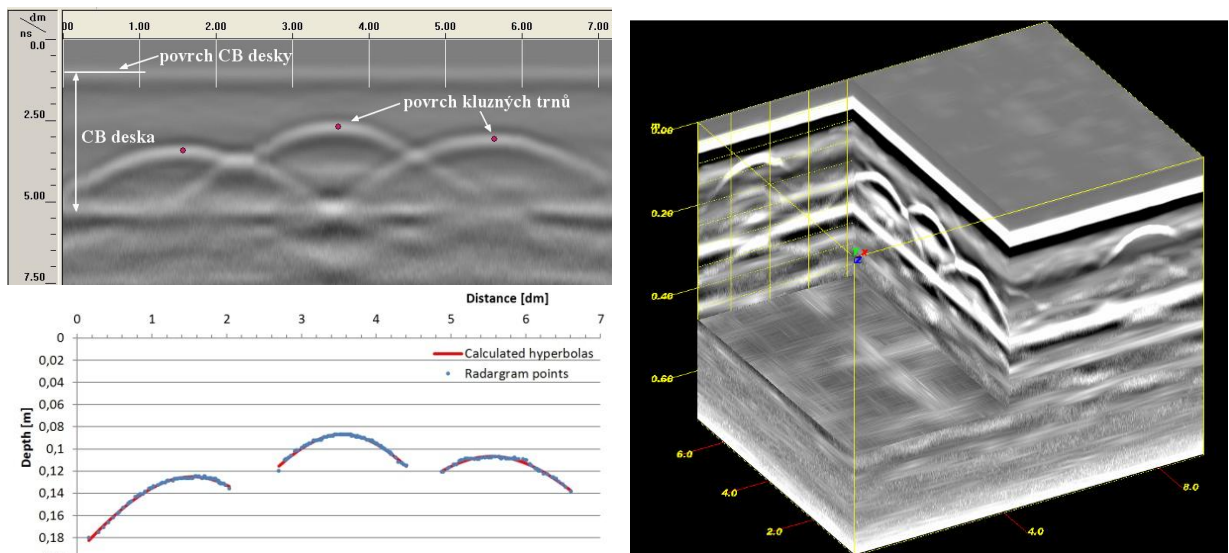
4.6.2 Laboratorní měření polohy kluzných trnů zabudovaných ve zkušební CB desce

Pro tento experiment byla použita vyrobená CB deska tloušťky 240 mm, do které byly uloženy tři kluzné trny (kapitola 4.3.2).

K měření polohy kluzných trnů byly použity antény o centrální vysílací frekvenci 1,6 a 2,6 GHz (kap. 4.2). Před vlastním měřením byla provedena kalibrace zařízení pro měření ujeté vzdálenosti. Následně bylo provedeno 19 přejezdů přes desku ve směru kolmém na směr uložení kluzných trnů. Vzdálenosti jednotlivých přejezdů byly 50 mm. Provedená měření byla vyhodnocena v softwaru RADAN, verze 6.6. Měření bylo provedeno ve stejný den jako u experimentu v kapitole 4.4.2.

Pro vyhodnocení byly použity vztahy pro výpočet vrcholů hyperbol, proložení naměřených hodnot pomocí metody nejmenších čtverců (kapitola 4.2.1.2 a 4.2.1.3). Každý přejezd georadarem byl vyhodnocen jednotlivě a tyto výsledky byly porovnány graficky. Dříve byl vrchol každé z hyperbol stanoven "ručně" jedním bodem, viz obr. 55 vlevo nahoře.

Ukázka radargramu z jednoho přejezdu, srovnání identifikovaných a vypočítaných bodů hyperbol z jednoho radargramu a zobrazení ve 3D je uvedeno na obr. 55.



Obr. 55 Betonová deska tl. 240 mm se třemi zabudovanými kluznými trny – ukázka radargramu z jednoho přejezdu ve 2D (vlevo nahoře), srovnání identifikovaných a vypočítaných bodů aproximací metodou nejmenších čtverců jednoho radargramu (vlevo dole) a zobrazení ve 3D (vpravo).

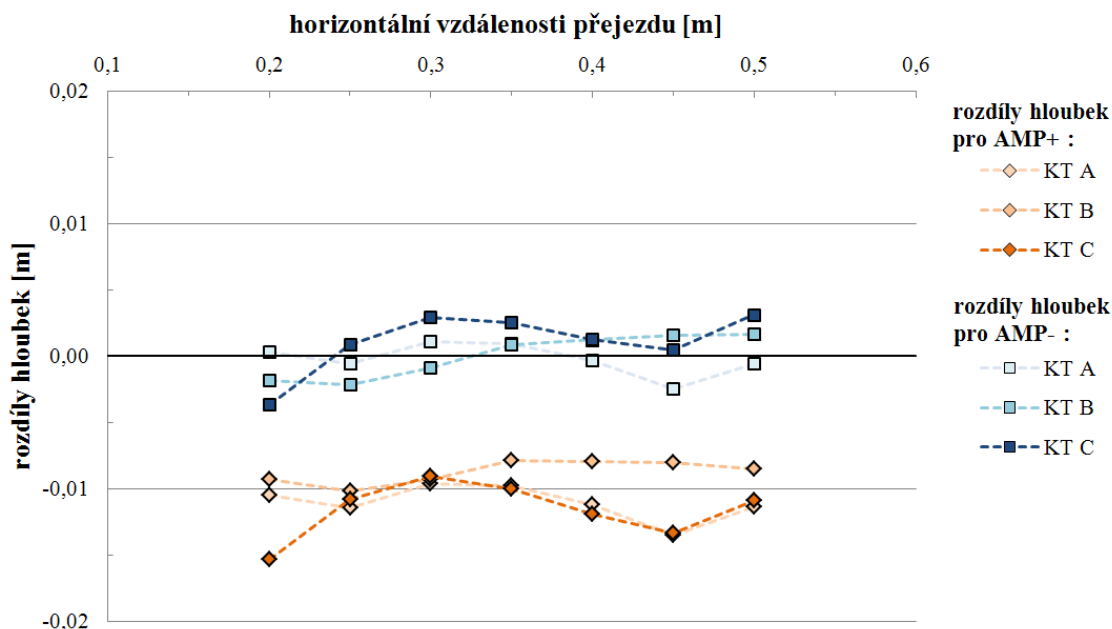
V kapitole 4.4.2 byly na této desce stanoveny rychlosti šíření EM signálu pro amplitudy AMP 1+ a AMP 1-. Prostřednictvím zjištěných rychlosti šíření byl přepočten změřený čas průchodu EM signálu na hloubku povrchu kluzných trnů (h_{AMP+} a h_{AMP-}).

Stanovené hloubky jsou uvedeny v tabulce 32. Červeně označené hodnoty byly změřeny v bezprostřední blízkosti konců trnů a modré nad konci KT. Poloha dřevěných desek, které při výrobě fixovaly trny, jsou značeny hnědě. Barevné hodnoty byly pro další hodnocení vyřazeny.

Porovnáme-li hodnoty naměřených a skutečných hloubek v tabulce 32, můžeme tvrdit, že hloubky h_{AMP-} jsou velmi blízké skutečným. Grafické znázornění rozdílů skutečných hloubek povrchu KT se zjištěnými hloubkami povrchu KT jsou zobrazeny na obrázku č. 56.

Tab. 32 Stanovení hloubek povrchu kluzných trnů z rychlostí šíření EM signálu zjištěných ze známé tloušťky CB desky

ozn. přejezdu [m]	Kluzný trn C				Kluzný trn B				Kluzný trn A			
	t [ns]	h AMP+ [m]	h AMP- [m]	skutečná hloubka KT	t [ns]	h AMP+ [m]	h AMP- [m]	skutečná hloubka KT	t [ns]	h AMP+ [m]	h AMP- [m]	skutečná hloubka KT
0,000	-	-	-		-	-	-		-	-	-	
0,050	-	-	-		1,24	0,071	0,065		2,21	0,127	0,115	
0,100	2,11	0,121	0,110		1,16	0,067	0,061	0,063	2,06	0,118	0,108	
0,150	2,17	0,125	0,114	0,108	1,41	0,081	0,073	0,068	2,25	0,130	0,118	
0,200	2,22	0,128	0,116	0,113	1,42	0,082	0,074	0,073	2,05	0,118	0,107	
0,250	2,23	0,128	0,117	0,118	1,52	0,088	0,080	0,078	2,07	0,119	0,108	
0,300	2,29	0,132	0,120	0,123	1,60	0,092	0,083	0,083	2,04	0,117	0,106	
0,350	2,39	0,138	0,125	0,128	1,66	0,095	0,087	0,088	2,04	0,117	0,107	0,108
0,400	2,51	0,144	0,131	0,133	1,75	0,100	0,091	0,093	2,06	0,119	0,108	
0,450	2,62	0,151	0,137	0,138	1,84	0,106	0,096	0,098	2,10	0,121	0,110	
0,500	2,67	0,153	0,139	0,143	1,93	0,111	0,101	0,103	2,07	0,119	0,108	
0,550	2,77	0,159	0,145	0,148	1,99	0,114	0,104	0,108	2,05	0,118	0,107	
0,600	2,82	0,162	0,147	0,153	2,23	0,128	0,116		2,01	0,115	0,105	
0,650	3,02	0,174	0,158		-	-	-		2,32	0,133	0,121	
0,700	-	-	-		-	-	-		-	-	-	
$\bar{x} =$	2,42	0,139	0,126	0,128	1,67	0,096	0,087	0,085	2,06	0,119	0,108	0,108
								$\sigma_v =$	0,02	0,001	0,001	0,000

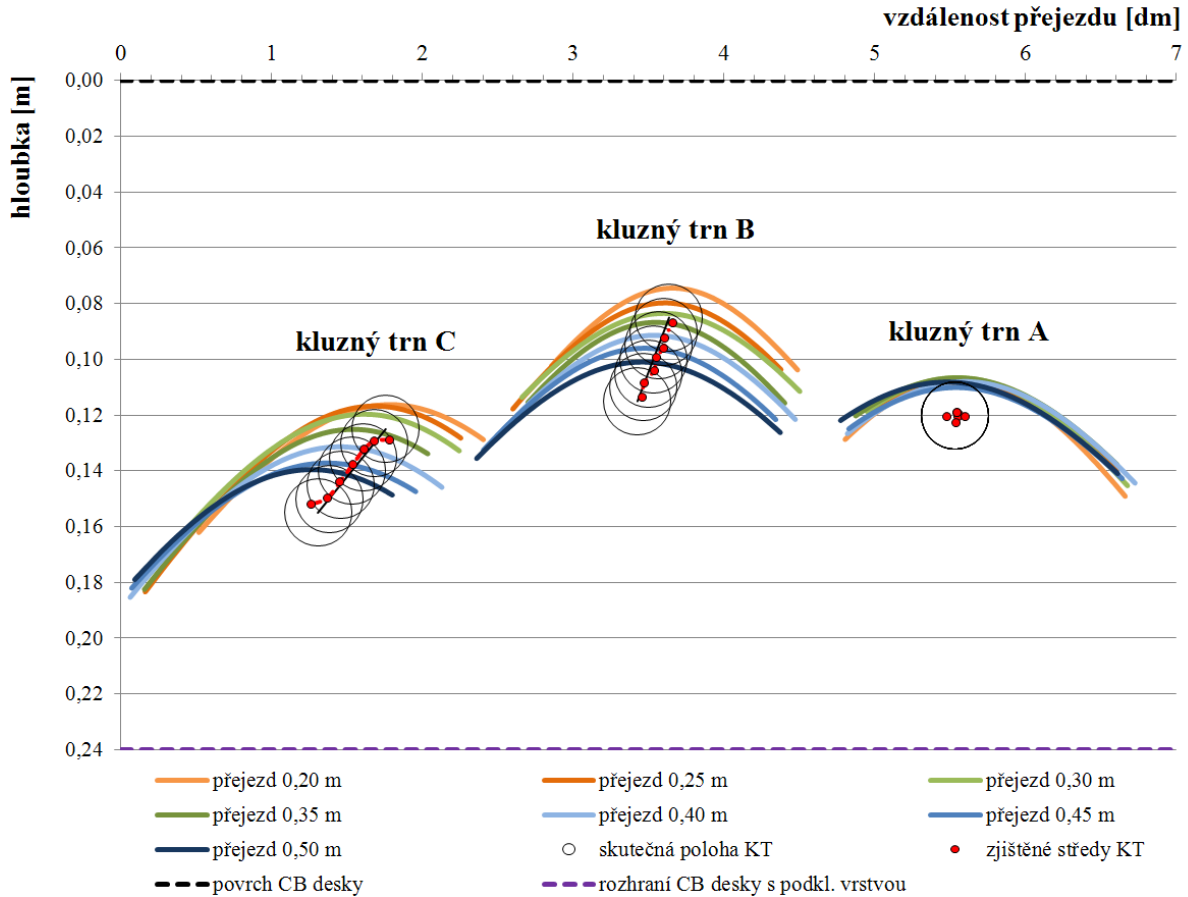


Obr. 56 Grafické znázornění rozdílů skutečných hloubek povrchu KT se zjištěnými hloubkami povrchu KT - rychlost šíření EM signálu byla vypočítána ze známé tloušťky desky a časů průchodu zjištěných z radargramu

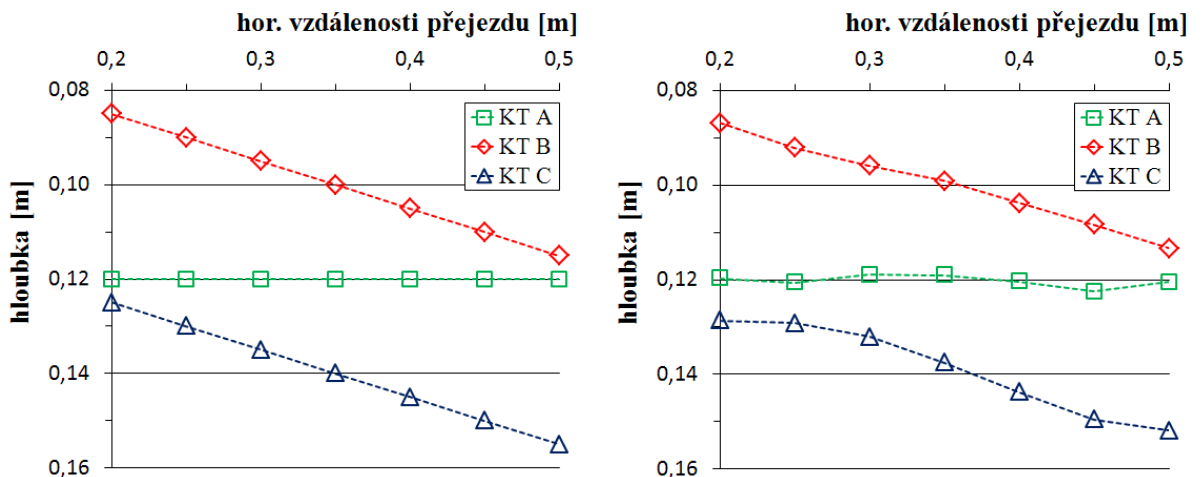
Z rozdílů hloubek lze usuzovat, že nižší odchylky od skutečné hodnoty jsou v případě zjištěných hloubek vypočítaných z rychlosti šíření EM signálu pro amplitudu AMP 1-. To

potvrzuje stanovení záporné amplitudy v předchozích laboratorních experimentech. Rychlosti šíření EM signálu budeme zjišťovat také při měřeních in situ.

Zjištěná poloha kluzných trnů z měření georadarem byla srovnána s jejich skutečnou polohou pro všechny přejezdy, které zaznamenaly výztuž v radargramu. Toto srovnání je uvedeno graficky na obr. 57 a 58 a číselně v tabulce 33 (vyhodnocení bylo provedeno dle kap. 4.2.1.1).



Obr. 57 Polohy tří kluzných trnů průměru 25 mm v betonové desce tl. 240 mm – měření anténou 2,6 GHz pro pozice 200 - 500 mm.



Obr. 58 Srovnání skutečné polohy tří kluzných trnů v betonové desce tl. 240 mm (vlevo) a polohy kluzných trnů zjištěných z měření georadarem (vpravo) pro pozici měření 150 - 550 mm

Tab. 33 Maximální horizontální a vertikální odchyly polohy tří kluzných trnů od skutečné polohy v betonové desce tloušťky 240 mm, měřeno anténou 2,6 GHz pro pozice měření 200 - 500 mm

Kluzný trn	Max. horizontální odchylna [mm]	Směrodatná odchylna horizontální S_d [mm]	Max. vertikální odchylna [mm]	Směrodatná odchylna vertikální S_d [mm]
A	7	3.5	2	1.2
B	4	1.3	2	1.6
C	4	2.1	4	2.3

Dosažení takto vysoké přesnosti bylo dáno tím, že šlo o známou konstantní tloušťku desky vyrobené z homogenního betonu a měření probíhala v délkových vzdálenostech max. 1 m. Z průběhu a výsledku tohoto experimentu je zřejmé, že je nutné si dávat především pozor na správnou lokalizaci antény při měření, aby mohla být zachována co nejvyšší přesnost. Dále se potvrdilo, že při měření v blízkosti konců kluzných trnů dochází ke zkreslení (hyperbola je méně viditelná a dochází ke snížení přesnosti měření).

4.7 Návrh a konstrukce mobilního zařízení pro měření in situ

Předpokládejme, že georadar bude nasazen při kontrole polohy kluzných trnů (KT) a kotev (K) na vozovkách s cementobetonovým krytem. Výstupními parametry polohy výztužných prvků georadarem jsou nadefinovány maximální možné tolerance jejich uložení (kap. 2.2.7).

Z výsledku laboratorních měření bylo prokázáno, že v blízkosti konců trnů a při změně materiálu (v blízkosti spáry) dochází ke zkreslení a ke snížení přesnosti měření (kap. 4.6.2). Při pojezdu zařízením delších vzdáleností, než tomu bylo u laboratorních měření, bude jistě docházet k větším chybám naměřených horizontálních odchylek a to i při nesimultánních měřeních.

V minulosti se při měření polohy kluzných trnů a kotev georadarem běžně postupovalo tak, že se jednou anténou přejíždělo po spáře a následně se provedlo vyhodnocení naměřených dat. Poté se přešlo na měření ve dvou polohách rovnoběžně se spárou, které umožnilo zpřesnit stanovení polohy výztužných prvků. Prováděly se dva nezávislé přejezdy antény za sebou.

Pro zvýšení přesnosti stanovené polohy a snížení časové náročnosti měření byl zkonstruován speciální vozík, který v rámci jednoho přejezdu měří dvěma anténami - mobilní zařízení CDV (obr. 59 a 60), které obsahuje dvě antény se střední frekvencí 1,6 anebo 2,6 GHz. Antény lze umístit v umělohmotném boxu s různou vzdáleností od sebe, nebo natočením.



Obr. 59 Mobilní zařízení pro měření polohy kluzných trnů a kotev se dvěma anténami 1,6 GHz a polohovacím zařízením

Současným použitím dvou antén stejného typu a frekvence je zajištěna vyšší přesnost stanovení vychýlení kluzných trnů a kotev, než kdyby byla použita pouze jedna anténa a měření by se provádělo jednotlivě.

Mobilní zařízení CDV je také vybaveno stabilním zdrojem elektrického napětí, dvěma koly nesoucí vlastní zatížení a odpruženým kolečkem, na kterém je umístěno lokalizační zařízení. Odpružené kolečko rovnoměrně kopíruje povrch CB krytu a nedochází tak k nazvedávání kolečka.

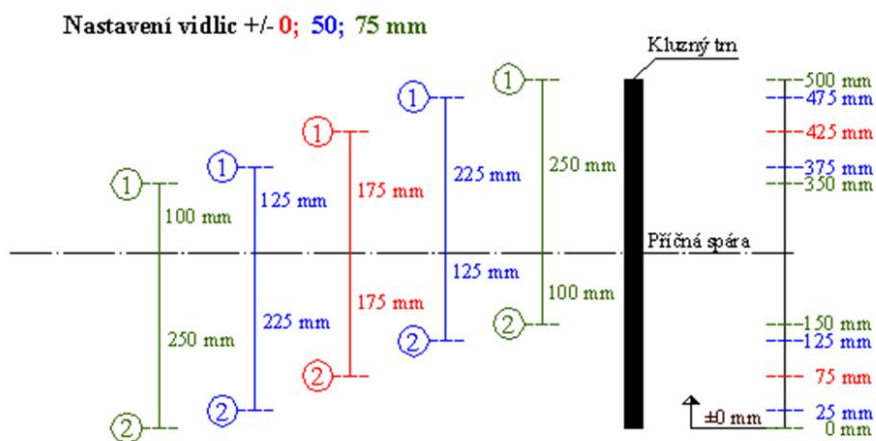
Příčná nebo podélná spára je měřena ve třech od sebe vzdálených profilech dle nastavení předních vidlic měřicího vozíku. Vzdálenost profilů je určena pomocí délky zabudovaného výztužného prvku (v současné době se nejčastěji používá nastavení vidlic +/- 50 mm při měření příčných spár a nastavení vidlic +/- 75 mm při měření podélných spár (obr. 61 a 62). Při vyhodnocení dostáváme nejvýše 6 bodů pro stanovení polohy kluzného trnu. Tyto body

jsou započítávány do trojrozměrné lineární regrese se známou polohou naměřených bodů od měřené spáry.



Obr. 60 Mobilní zařízení pro měření polohy kluzných trnů a kotev - foto z měření in situ

Pro snadnější interpretaci výsledků bývá zvoleno grafické vyjádření polohy kluzných trnů i kotev půdorysně a v řezu (kapitola 6.1.1 a 6.1.2). Tabulkově jsou uvedeny konkrétní hodnoty staničení a hloubky osy kluzného trnu ve spáře a v určených vzdálenostech od měřené spáry (např. pro odběr jádrových vývrtů a ověření polohy), vertikální a horizontální rozdíl konců KT, a podélný posun KT. Podobně tomu je také u kotev.

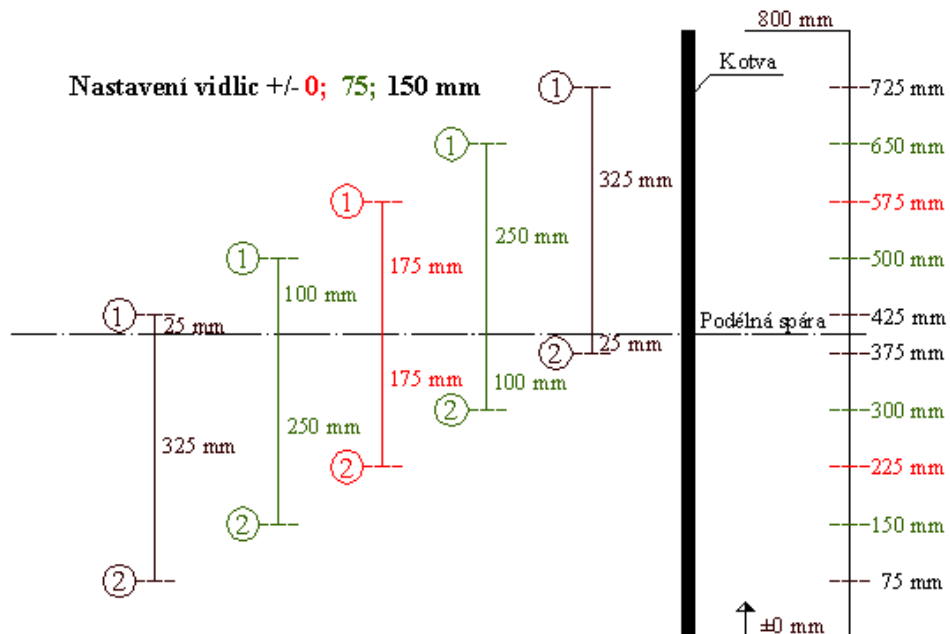


Obr. 61 Schéma půdorysu nastavení vidlic mobilního zařízení pro měření polohy kluzných trnů

Přesnost v horizontálním směru se dále zvyšuje pomocí systému pevného začátku a konce. Na vozíku jsou umístěny ukazatele polohy, které zajistí přesnou lokalizaci měřeného signálu:

- ukazatel začátku přejezdu – středy obou antén jsou vždy na začátku měření ve stejné vzdálenosti od začátku desky – jednoznačné zadání začátku přejezdu, i když je na začátku desky překážka (převýšení, svodidlo, odvodnění, nečistoty),

- ukazatel kolmých spár – středy obou antén, které se nacházejí na rozhraní dvou desek, jsou vždy při měření označeny markerem v radargramech - ve vyhodnocení v radargramech bývá při vhodném filtrování prokázána správnost jejich určení,
- ukazatel konce přejezdu – středy obou antén jsou vždy na konci měření ve stejné vzdálenosti od konce desky – jednoznačné zadání konce přejezdu, i když je deska zakončena překážkou (převýšení, svodidlo, odvodnění, nečistoty).



Obr. 62 Schéma půdorysu nastavení vidlic mobilního zařízení pro měření polohy kotev

Při vyhodnocení jsou pomocí těchto ukazatelů lineárně upravovány nepřesnosti vzniklé při přejezdu georadarem (např. nepřesné určení kalibrace měřicího zařízení, povrchové nerovnosti apod.). Vzdálenosti spár jsou měřeny pásmem.

Pro stanovení rychlosti šíření elektromagnetického signálu deskou CB krytu (kalibrace ve vertikálním směru) je potřeba znát alespoň některou z těchto vzdáleností:

- hloubka kluzného trnu v místě, kde bylo provedeno měření, zjištěná odebráním jádrového vývrtu po stanovení horizontální polohy georadarem, anebo vrtáním,
- projektová nebo změřená poloha kluzných trnů vkládaných do předem navrtaných otvorů po jednodenní betonáži, nebo vkládaných do bednění na konci denní betonáže (ovlivněno přesností uložení bednění na stavbě a způsobem skladování mimo stavbu), anebo vkládaných pomocí trubiček do čerstvého betonu na konci denní betonáže (ovlivněno pokládkou kluzných trnů finišerem),
- tloušťka desky na vývrtu v místě, kde bylo provedeno měření georadarem a není osazena výztuž a v okolí nejsou trhliny ani spáry, které by ovlivnily výsledky měření (méně přesná metoda - pracujeme s dvojnásobnou tloušťkou a navíc nepřesností při stanovení tloušťky desky),
- předpokládaná hloubka kluzného trnu uložená ve spáře do armokoše (problém přesnosti uložení a dostatečného upevnění koše a kluzného trnu).

4.8 Srovnávací měření polohy výztužných prvků georadarem a vybranými jinými nedestruktivními zařízeními

Tak jako u jiných zařízení i u georadaru by se mělo pravidelně provádět ověřování funkce jednotlivých jeho částí a celého systému. Pro tyto účely je ideální zřízení zkušebního úseku/desky s různou skladbou vrstev nebo se zabudovanými objekty z různých materiálů a v různé poloze.

V tomto ohledu nejsou stanoveny žádné požadavky a proto je na každém provozovateli georadarového systému, aby si tuto činnost zajistil sám, nebo se domluvil s výrobcem GPR, nebo jinou organizací. Další možností je zapojení se do srovnávacího (harmonizačního) měření, které se občas organizuje. V rámci tohoto měření se hodnotí opakovatelnost a reprodukovatelnost dosažených výsledků měření.

V rámci systému jakosti v oboru pozemních komunikací v ČR platí technické podmínky Ministerstva dopravy TP 207: Experiment přesnosti zařízení pro měření povrchových vlastností a průhybů vozovek pozemních komunikací, z roku 2009. Georadar zatím zde ale uveden není. Řeší se zde následující proměnné parametry vozovek:

- protismykové vlastnosti (součinitel podélného tření - fp),
- makrotextura (střední hloubka profilu - MPD),
- podélné nerovnosti (mezinárodní index nerovnosti - IRI),
- průhyby při zatížení rázovým zařízením FWD (bez parametru - mm).

V současné době, jak bylo uvedeno v kapitole 2.4.9 je posláno k připomínkování, začlenění georadaru do TP 207, konkrétně pro aplikaci stanovení tloušťek vrstev georadarem.

Ani v rámci evropského výboru pro normalizaci CEN se nevěnuje této zkušební metodě a jejímu uplatnění při diagnostice vozovek pozemních komunikací zvýšená pozornost. V rámci technické skupiny TC 227: Silniční materiály, existuje pracovní skupina WG5: Povrchové vlastnosti vozovek, která ale nezahrnuje diagnostické metody jako je rázové zařízení FWD a georadar, které se spíše týkají diagnostiky konstrukce vozovek.

4.8.1 Srovnávací měření na dálnici D1

První zjednodušené srovnávací měření georadarem v ČR v rámci měření polohy kluzných trnů v cementobetonovém krytu dálnice, které organizovalo Ředitelství silnic a dálnic.

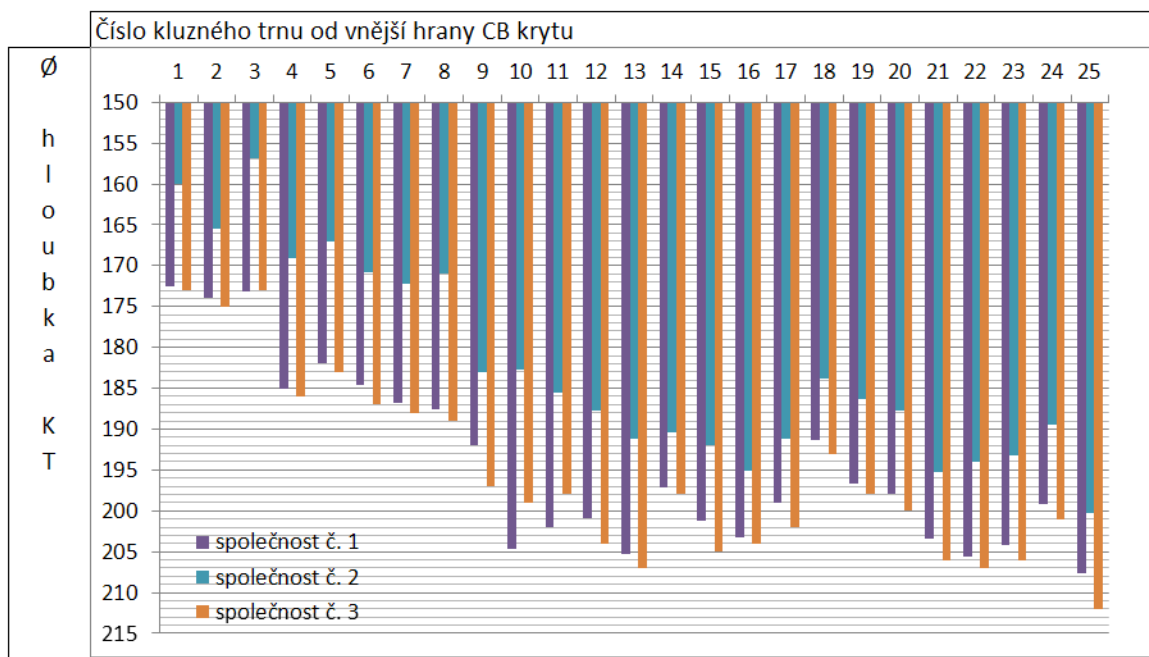
Měření prováděly 3 různé firmy georadarem. Účelem bylo ověření přesnosti této metody při zjišťování polohy těchto prvků. Výsledky tohoto měření byly publikovány v časopise Silniční obzor v čísle 6/2012 s názvem článku: „*Přesnost nedestruktivního měření polohy kotev a kluzných trnů cementobetonových krytů*“. Na základě srovnání výsledků měření polohy vybraných třech kluzných trnů s jejich skutečnou polohou, zjištěnou jádrovými vývrty byly zformulovány **následující závěry**:

- georadarové měření **není schopno** určit přesně počet jednotlivých trnů,
- přesnost metody je zatím **nedostačující** k tomu, aby byla tato měření použita pro přijímací zkoušky,
- **návrh na revizi** odstavce 4.4 TP 233.

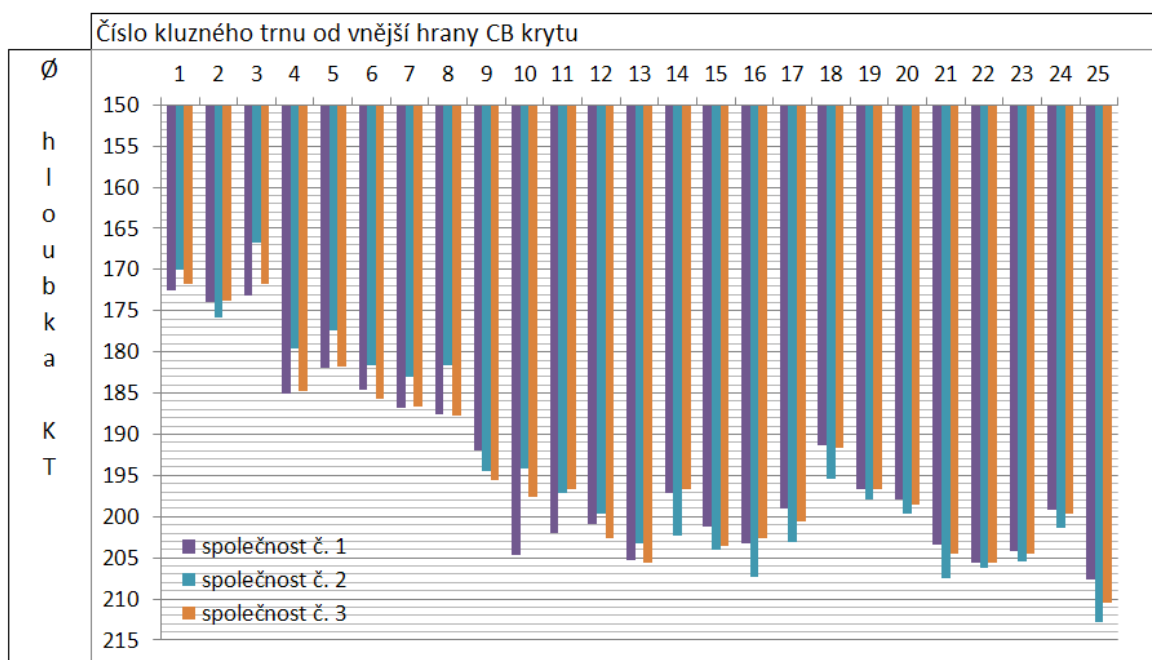
Při prvním srovnávacím georadarovém měření byla vyhodnocena poloha kluzných trnů v CB desce – hloubky středů a konců kluzných trnů a jejich horizontální a vertikální vychýlení pro **vybrané tři kluzné trny**.

Výsledky hloubek kluzných trnů jedné příčné spáry, které jsem získal od tří společností, jsou uvedeny na obr. 63. Pokud se zaměříme na průběhy hloubek každé společnosti, můžeme

konstatovat, že měly podobný průběh, ale jsou výškově posunuty. Kalibraci rychlosti šíření signálu v betonu si určila každá společnost podle jejich zkušeností, nebyla jednoznačně daná známá hloubková vzdálenost, podle které by se pro každé zařízení nakalibrovala rychlost šíření EM signálu. V našem případě byla rychlost šíření určena ze známé polohy výztuži v pracovní spáře. Jiná interpretace rychlosti šíření EM signálu mohla mít za následek posunutí průběhu hloubek. Pokud bychom upravili rychlost šíření, dojdeme k velmi podobným interpretacím, které jsou uvedeny na obr. 64. Protože se jednalo o vůbec první srovnávací měření georadaru a z důvodu nekompletního a nekontrolovaného množství dat se dále tímto měřením nebudeme zabývat.



Obr. 63 Stanovení hloubek kluzných trnů v příčné spáře na dálnici D1



Obr. 64 Stanovení hloubek KT v příčné spáře na dálnici D1 po úpravě rychlosti šíření signálu

4.8.2 Srovnávací měření v Pelhřimově

Druhé srovnávací měření polohy kluzných trnů bylo provedeno v areálu společnosti Strabag v Pelhřimově. Celková délka úseku byla 8 metrů. Celý úsek byl osazen kluznými trny.

Měření se zúčastnily dvě firmy měřící georadarem. Měření georadarem za CDV bylo provedeno mobilním vozíkem s krokem měření 0,003 metrů (kap. 4.7). Směrové vidlice měřicího vozíku byly nastaveny na hodnotu 50 mm (kap. 4.7). Na místě byla provedena kalibrace vzdálenosti měřicího kola a kalibrace rychlosti šíření EM signálu metodou CMP (obr. 65).



Obr. 65 Kalibrace rychlosti šíření elektromagnetického signálu metodou CMP

Po dodání výsledků georadaru bylo provedeno destruktivní změření polohy tak, že z CB desky byl vyřezán a vyjmut trámec obsahující 30 kluzných trnů. Pohled na oranžově značenou měřenou spáru před řezáním je na obr. 66.



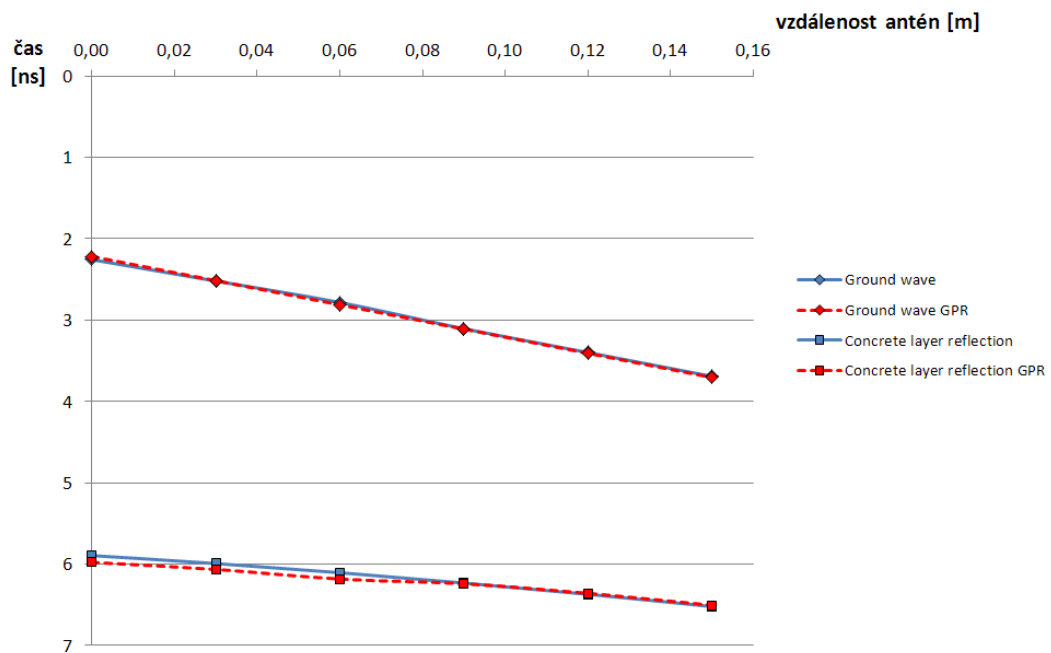
Obr. 66 Destruktivní stanovení polohy kluzných trnů – řezání trámce s osazenými kluznými trny

Vyjmutý trámec se rozpadl na několik kusů a nebylo možné určit s dostatečnou přesností horizontální parametry polohy kluzných trnů. Spolehlivě však byly změřeny hloubky kluzných trnů na bočních stěnách trámce ve vzdálenosti 200 mm od příčné spáry na obě strany.

Výsledky správnosti nebyly nikde publikovány, ani formou zprávy. Bylo přislíbeno, že výsledky budou opublikovány v odborném článku. Vyhodnocení výsledků správnosti provedl Ing. Kovář, který organizoval srovnávací měření.

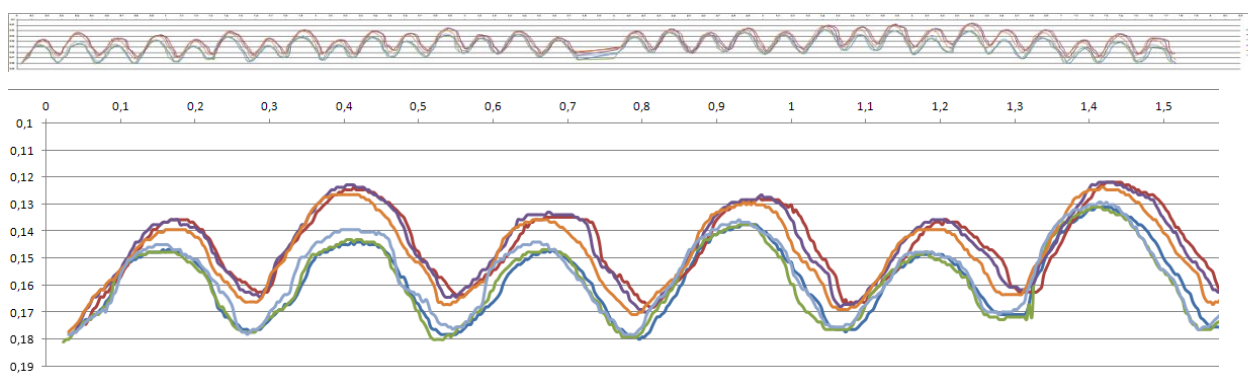
Srovnávací měření na zkušebním úseku v Pelhřimově bylo zařazeno mezi měření in situ, protože kluzné trny byly uloženy do cementobetonového krytu finišerem. Výsledky druhé společnosti, která také měřila georadarem nám nebyly poskytnuty.

Pro stanovení polohy kluzných trnů bylo nejdříve provedeno zjištění rychlosti šíření elektromagnetického signálu z provedené metody CMP (obr. 67). Stanovené časy pro jednotlivé pozice antén byly vykresleny graficky a modelováním rychlosti šíření EM signálu. Z laboratorního stanovení rychlosti šíření EM signálu metodou CMP (kap. 4.4.3) byla zjištěna rychlost šíření EM signálu: $v = 0,101 \text{ m/ns}$, která odpovídá rel. permitivitě $\epsilon_r = 8,86$.



Obr. 67 Grafické stanovení rychlosti šíření metodou CMP na zkušebním úseku v Pelhřimově

Kluzné trny byly vyhodnoceny v programu Radan 6.6 pro 3 přejezdy mobilním zařízením a tato data byla importována do programu Excel, ve kterém byly graficky zobrazeny kluzné trny, tak jak jsou viditelné v georadarových záznamech (obr. 68). Z grafu lze vyčíst proměnnost hloubek uložených kluzných trnů, jejich jednostranné vertikální vychýlení a různé horizontální vychýlení. Uprostřed příčné spáry nebyl záměrně vložen kluzný trn.



Obr. 68 Porovnání hyperbol představujících kluzné trny v radargramech ze všech měření na zkušební spáře (nahore) a pro názornost v detailu (dole)

Jednotlivé naměřené body představující hyperboly byly aproximovány metodou nejmenších čtverců proložením naměřených bodů a pro každou získanou rovnici hyperboly byl stanoven vrchol se souřadnicemi X v horizontálním směru přejezdu a souřadnicemi Z ve vertikálním směru (kap. 4.2.1.2 a 4.2.1.3). Tyto hodnoty pro všech šest přejezdů byly proloženy metodou lineární regrese (kapitola 4.2.1.4) a byly stanoveny regresní rozdíly ve vertikálním směru a v horizontálním směru (tab. 34). Z této tabulky lze vyčíst, že přesnější stanovení polohy kluzných trnů metodou lineární regrese bylo ve vertikálním směru.

Tab. 34 Znárodnění výpočtu polohy kluzných trnů metodou lineární regrese s rozdíly stanovených bodů rovnice s naměřenými souřadnicemi X a Y

Dx						Dz						Lineární regrese															
25	75	125	375	425	475	25	75	125	375	425	475	rce přímky		25	75	125	375	425	475	rce přímky		25	75	125	375	425	475
x(m)	x(m)	x(m)	x(m)	x(m)	x(m)	z(m)	z(m)	z(m)	z(m)	z(m)	z(m)	a	b	Rozdíl dx v mm	Rozdíl dx v mm	Rozdíl dx v mm	Rozdíl dx v mm	Rozdíl dx v mm	Rozdíl dx v mm	a	b	Rozdíl dz v mm	Rozdíl dz v mm	Rozdíl dz v mm	Rozdíl dz v mm	Rozdíl dz v mm	Rozdíl dz v mm
0,262	0,262	0,269	0,249	0,245	0,242	0,158	0,157	0,161	0,167	0,170	0,168	-5E-05	0,2677	4	2	-8	-1	1	1	3E-05	0,1569	-1	2	-1	0	-2	2
0,508	0,505	0,498	0,508	0,505	0,495	0,141	0,143	0,147	0,161	0,166	0,166	-9E-06	0,5053	-3	0	6	-6	-3	6	6E-05	0,1398	0	1	0	0	-2	1
0,765	0,768	0,762	0,752	0,758	0,748	0,153	0,154	0,157	0,166	0,170	0,170	-4E-05	0,7676	2	-3	1	2	-5	3	4E-05	0,152	0	1	0	1	-1	1
1,038	1,042	1,022	1,032	1,028	1,028	0,149	0,149	0,150	0,157	0,159	0,160	-3E-05	1,0424	4	-2	4	8	-4	-2	3E-05	0,1478	-1	0	1	0	0	0
1,291	1,291	1,281	1,281	1,275	1,258	0,157	0,157	0,161	0,170	0,170	0,170	-6E-05	1,2945	-2	-1	6	-8	-5	9	3E-05	0,1562	0	1	-1	-2	0	1
1,535	1,535	1,521	1,508	1,501	1,501	0,147	0,142	0,145	0,150	0,152	0,151	-7E-05	1,5326	-4	2	3	-2	2	-1	2E-05	0,144	-3	3	1	0	-1	1
1,768	1,778	1,775	1,768	1,771	1,758	0,156	0,155	0,158	0,170	0,169	0,171	-2E-05	1,7753	7	-4	-3	-1	-5	7	4E-05	0,1539	-1	2	0	-2	1	1
2,005	2,021	2,011	2,005	2,001	1,991	0,137	0,140	0,141	0,150	0,154	0,152	-4E-05	2,0152	9	-9	-1	-4	-2	6	4E-05	0,1368	0	0	0	0	-2	2
2,251	2,258	2,244	2,254	2,244	2,241	0,163	0,157	0,160	0,167	0,168	0,168	-2E-05	2,2531	2	-6	7	-8	2	4	2E-05	0,1589	-4	3	1	-1	-1	0
2,494	2,484	2,478	2,464	2,478	2,458	0,142	0,140	0,142	0,153	0,153	0,150	-6E-05	2,4901	-5	2	5	5	-12	5	3E-05	0,1401	-2	2	1	-3	-1	3
2,731	2,731	2,714	2,711	2,708	2,688	0,143	0,145	0,148	0,160	0,162	0,158	-5E-05	2,732	-1	-4	9	-6	-7	9	4E-05	0,1439	1	1	0	-2	-2	4
2,974	2,984	2,967	2,974	2,967	2,957	0,134	0,135	0,138	0,147	0,150	0,147	-3E-05	2,9731	3	-8	7	-7	-2	7	4E-05	0,1329	0	1	-1	-1	-2	3
3,217	3,214	3,201	3,201	3,207	3,187	0,147	0,148	0,150	0,155	0,155	0,153	-4E-05	3,2148	-3	-2	9	-2	-10	8	2E-05	0,1475	1	0	-1	-2	-1	2
3,479	3,472	3,462	3,449	3,462	3,449	0,143	0,141	0,142	0,147	0,148	0,147	-5E-05	3,4752	-5	-1	7	7	-9	1	1E-05	0,1416	-1	1	1	-1	-1	1
3,725	3,728	3,722	3,722	3,728	3,708	0,156	0,153	0,155	0,159	0,159	0,158	-2E-05	3,7271	2	-2	3	-2	-9	10	1E-05	0,1543	-2	2	0	-1	-1	1
4,152	4,155	4,242	4,235	4,242	4,218	0,144	0,141	0,145	0,150	0,153	0,151	-6E-05	4,2546	1	-5	6	-1	-11	10	2E-05	0,1422	-2	2	0	0	-2	1
4,501	4,485	4,475	4,471	4,475	4,465	0,149	0,137	0,139	0,143	0,143	0,141	-5E-05	4,492	-10	3	10	1	-6	2	3E-07	0,1423	-7	6	3	-1	-1	1
4,745	4,745	4,728	4,731	4,728	4,715	0,150	0,143	0,146	0,149	0,149	0,148	-5E-05	4,7441	-2	-5	10	-5	-4	6	5E-06	0,1466	-4	4	1	-1	-1	1
4,985	4,995	4,981	4,961	4,968	4,948	0,140	0,135	0,138	0,141	0,144	0,144	-4E-05	4,9931	6	-8	2	-9	7	7	2E-05	0,1385	-4	3	1	-1	-1	0
5,234	5,248	5,234	5,238	5,234	5,214	0,144	0,143	0,145	0,148	0,149	0,148	-3E-05	5,242	7	-9	4	-8	-6	12	1E-05	0,1436	-1	1	0	0	-1	1
5,524	5,528	5,511	5,508	5,508	5,501	0,131	0,131	0,131	0,137	0,140	0,138	-6E-05	5,525	0	-6	8	-1	-3	2	2E-05	0,1291	-1	0	1	0	-1	1
5,744	5,761	5,744	5,744	5,754	5,741	0,134	0,133	0,137	0,147	0,148	0,145	-1E-05	5,7505	6	-11	5	3	-8	5	4E-05	0,1314	-1	2	0	-1	0	1
5,981	5,991	5,978	5,971	5,981	5,971	0,129	0,129	0,131	0,140	0,140	0,142	-3E-05	5,9851	3	-9	4	5	-7	2	3E-05	0,1269	-1	1	0	0	0	0
6,247	6,257	6,234	6,234	6,227	6,217	0,137	0,137	0,140	0,149	0,155	0,154	-6E-05	6,2515	3	-10	10	-6	-2	5	4E-05	0,1346	-1	1	0	1	-2	1
6,497	6,501	6,481	6,481	6,474	6,467	0,129	0,127	0,131	0,140	0,140	0,140	-6E-05	6,4983	0	-7	10	-5	-1	3	3E-05	0,1264	-1	2	0	-2	0	1
6,717	6,731	6,717	6,717	6,717	6,704	0,151	0,139	0,142	0,156	0,160	0,161	-3E-05	6,7241	6	-9	4	-3	-5	7	4E-05	0,142	-8	6	0	-2	-1	1
6,987	6,994	6,977	6,964	6,967	6,964	0,137	0,139	0,144	0,153	0,154	0,153	-6E-05	6,9904	2	-8	6	4	-2	-2	4E-05	0,1372	2	1	-2	-2	-1	2
7,244	7,250	7,244	7,240	7,254	7,250	0,157	0,155	0,163	0,171	0,174	0,173	-2E-05	7,2475	3	-4	2	2	-13	10	4E-05	0,1567	0	1	-2	0	-1	2
7,494	7,494	7,470	7,480	7,464	7,454	0,146	0,146	0,149	0,160	0,162	0,164	-5E-05	7,4916	-4	-6	15	-7	-13	14	4E-05	0,1443	-1	1	0	0	0	0
7,743	7,747	7,727	7,737	7,753	7,723	0,153	0,154	0,158	0,168	0,174	0,173	-1E-05	7,7412	-2	-7	13	0	-17	13	5E-05	0,1517	0	1	-1	1	-2	1

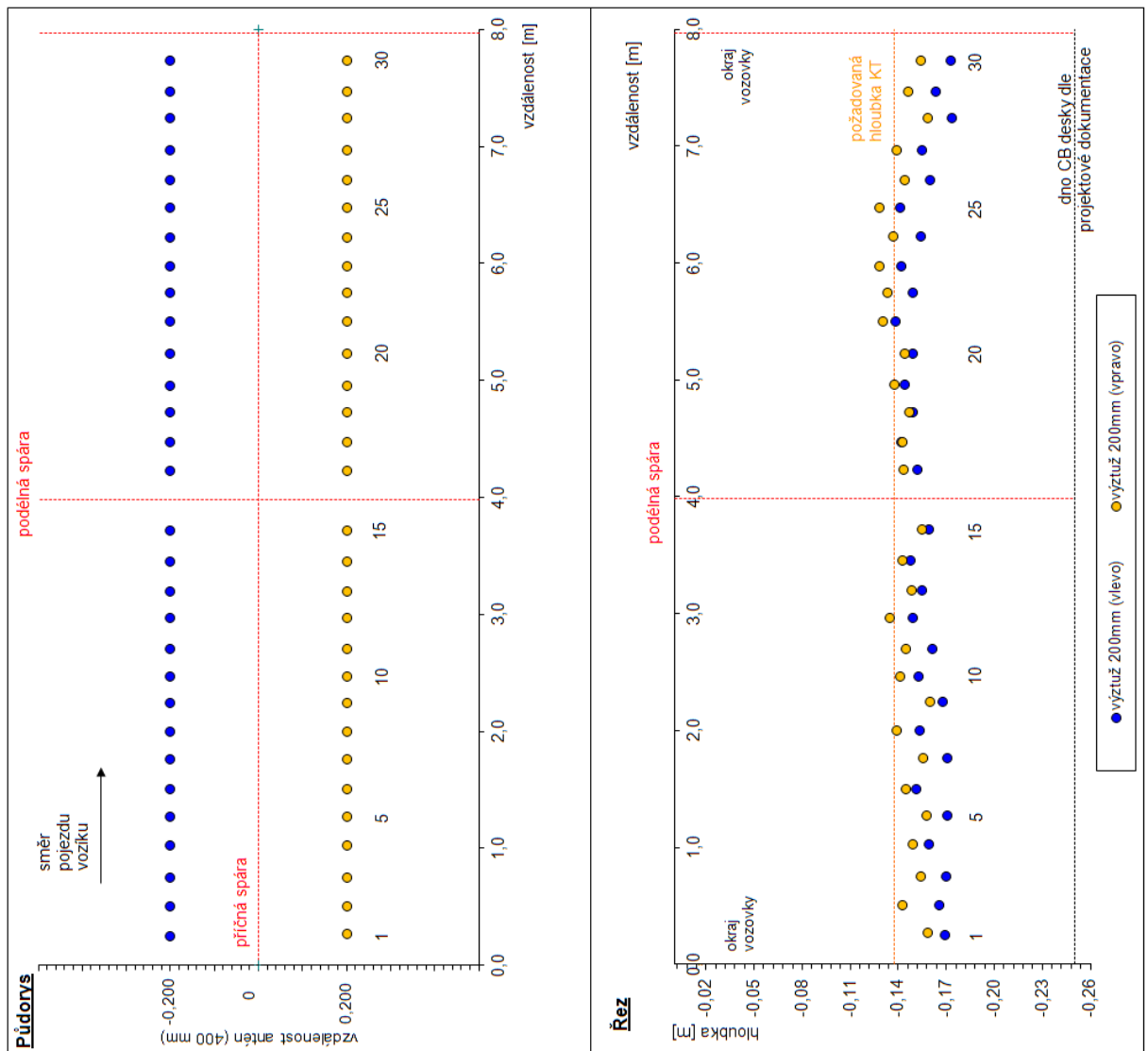
Hodnoty výstupních sledovaných parametrů jsou dále vypočítány ze stanovených rovnic průmek.

Dle požadavku koordinátora srovnávacího měření byly stanoveny hloubky kluzných trnů ve vzdálenosti 0,2 m vpravo i vlevo od příčné spáry a vertikální i horizontální rozdíly konců kluzných trnů (tab. 35).

Tab. 35 Znárodnění výpočtové tabulky při stanovení výstupních sledovaných parametrů kluzných trnů georadarem v programu Excel

Poloha výtuže									Vertikální rozdíl konců KT [mm]	Horizontální rozdíl konců KT [mm]
-200			střed			200				
x(m)	z(m)	z(m)	x(m)	z(m)	z(m)	x(m)	z(m)	z(m)		
0,245	-0,169	0,2	0,255	-0,164	0,2	0,265	-0,158	-0,2	13	-26
0,501	-0,166	0,2	0,503	-0,154	0,2	0,505	-0,143	-0,2	29	-4
0,752	-0,170	0,2	0,759	-0,162	0,2	0,766	-0,154	-0,2	20	-18
1,027	-0,159	0,2	1,034	-0,154	0,2	1,041	-0,149	-0,2	13	-17
1,269	-0,171	0,2	1,280	-0,164	0,2	1,292	-0,158	-0,2	16	-29
1,501	-0,151	0,2	1,515	-0,148	0,2	1,529	-0,145	-0,2	8	-35
1,765	-0,171	0,2	1,770	-0,163	0,2	1,774	-0,156	-0,2	19	-11
1,998	-0,153	0,2	2,006	-0,146	0,2	2,013	-0,139	-0,2	18	-19
2,245	-0,168	0,2	2,249	-0,164	0,2	2,252	-0,160	-0,2	10	-9
2,465	-0,153	0,2	2,476	-0,147	0,2	2,487	-0,141	-0,2	14	-28
2,699	-0,161	0,2	2,714	-0,153	0,2	2,728	-0,145	-0,2	20	-36
2,964	-0,149	0,2	2,971	-0,142	0,2	2,977	-0,135	-0,2	18	-15
3,196	-0,155	0,2	3,205	-0,152	0,2	3,213	-0,148	-0,2	8	-21
3,452	-0,148	0,2	3,462	-0,145	0,2	3,473	-0,142	-0,2	7	-26
3,718	-0,159	0,2	3,722	-0,157	0,2	3,726	-0,155	-0,2	5	-10
4,230	-0,152	0,2	4,241	-0,148	0,2	4,252	-0,143	-0,2	11	-28
4,468	-0,142	0,2	4,479	-0,142	0,2	4,489	-0,142	-0,2	0	-27
4,722	-0,149	0,2	4,732	-0,148	0,2	4,742	-0,147	-0,2	2	-24
4,957	-0,144	0,2	4,973	-0,140	0,2	4,989	-0,137	-0,2	8	-40
5,227	-0,149	0,2	5,234	-0,147	0,2	5,240	-0,144	-0,2	6	-17
5,504	-0,139	0,2	5,513	-0,134	0,2	5,523	-0,130	-0,2	11	-23

Výsledky z Excelu byly interpretovány graficky a tabulkově v protokolu o vyhodnocení polohy kluzných trnů georadarem dle kap. 6.1.1 (obr. 69). Červeným písmem jsou označeny zjištěné hodnoty, které přesahují hodnoty z požadavků normy s připočtením teoretické chyby georadaru



Obr. 69 Interpretace výsledků naměřené polohy kluzných trnů v grafickém a tabulkovém vyhodnocení

min. hloubka 134 mm
 max. hloubka 166 mm
 průměrná hloubka 150,4 mm
 požadovaná hloubka 137,5 mm

Podrobný výpis

Číslo KT	Staničení středů KT [m]	Hloubka střed	Hloubka -200	Hloubka 200	VR	HR	PP
1	0,255	164	169	158	13	-26	< 75 mm
2	0,503	154	166	143	29	-4	< 75 mm
3	0,759	162	170	154	20	-18	< 75 mm
4	1,034	154	159	149	13	-17	< 75 mm
5	1,280	164	171	158	16	-29	< 75 mm
6	1,515	148	151	145	8	-35	< 75 mm
7	1,770	163	171	156	19	-11	< 75 mm
8	2,006	146	153	139	18	-19	< 75 mm
9	2,249	164	168	160	10	-9	< 75 mm
10	2,476	147	153	141	14	-28	< 75 mm
11	2,714	153	161	145	20	-36	< 75 mm
12	2,971	142	149	135	18	-15	< 75 mm
13	3,205	152	155	148	8	-21	< 75 mm
14	3,462	145	148	142	7	-26	< 75 mm
15	3,722	157	159	155	5	-10	< 75 mm
16	4,241	148	152	143	11	-28	< 75 mm
17	4,479	142	142	142	0	-27	< 75 mm
18	4,732	148	149	147	2	-24	< 75 mm
19	4,973	140	144	137	8	-40	< 75 mm
20	5,234	147	149	144	6	-17	< 75 mm
21	5,513	134	139	130	11	-23	< 75 mm
22	5,748	141	149	133	20	-5	< 75 mm
23	5,979	135	142	129	16	-13	< 75 mm
24	6,236	145	154	137	22	-31	< 75 mm
25	6,484	136	141	128	16	-30	< 75 mm
26	6,717	152	160	144	20	-14	< 75 mm
27	6,976	147	156	139	19	-30	< 75 mm
28	7,244	166	174	159	19	-8	< 75 mm
29	7,479	155	163	146	21	-25	< 75 mm
30	7,738	163	173	154	24	-6	< 75 mm

Hl. střed - Hloubka KT ve spaře [mm]

Hl. -200 - Hloubka KT ve vzdálenosti 200 mm vlevo od příčné spáry [mm]

Hl. 200 - Hloubka KT ve vzdálenosti 200 mm vpravo od příčné spáry [mm]

VR - Vertikální rozdíl konců KT [mm]

HR - Horizontální rozdíl konců KT [mm]

PP - Podélný posun KT

červeně jsou vyznačeny odchylky od projektové dokumentace větší než:

norma chyba GPR celkové
 +/-20 +/-10 +/-30 mm
 +/-20 +/-15 +/-35 mm

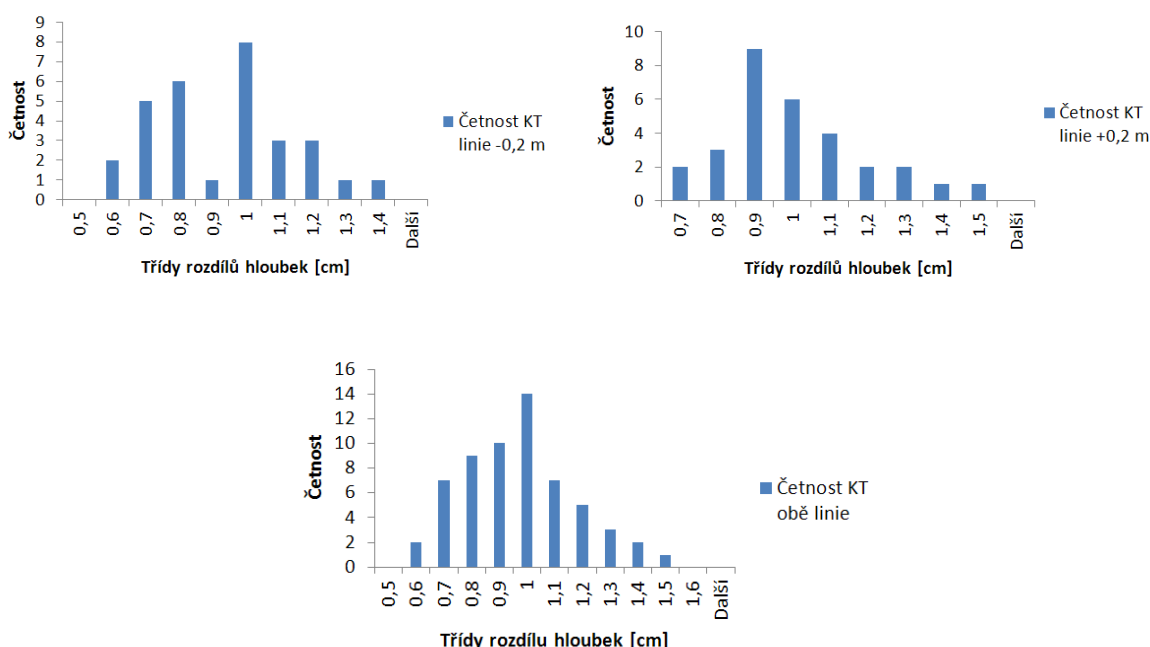
vertikální směr
 horizontální směr

Pro srovnání výsledků georadaru a výsledků z destruktivního stanovení kluzných trnů na vyjmutém trámci byla Ing. Kovářem vytvořena tabulka v Excelu (tab. 36), která popisuje rozdíly těchto dvou metod změření. Hloubky středů kluzných trnů, vyhodnocených georadarem byly přepočítány na hloubky povrchu KT a byl změněn popis označení řezu -200 a 200.

Tab. 36 Výsledky ze stanovení polohy kluzných trnů (Ing Kovář)

č. trnu	CDV Brno							
	Měření nedestr.		Měření ned. red. -13mm		Měření destr.		Rozdíl destr.-nedestr.	
	- 0,2	+ 0,2	- 0,2	+ 0,2	- 0,2	+ 0,2	- 0,2	+ 0,2
1	-15,80	-16,90	-14,55	-15,65	-13,82	-14,72	0,73	0,93
2	-14,30	-16,60	-13,05	-15,35	-12,30	-14,28	0,75	1,07
3	-15,40	-15,90	-14,15	-14,65	-13,38	-14,92	0,77	-0,27
4	-14,90	-14,90	-13,65	-13,65	-12,55	-13,91	1,10	-0,26
5	-15,80	-15,80	-14,55	-14,55	-13,88	-14,95	0,67	-0,40
6	-14,50	-15,10	-13,25	-13,85	-11,94	-13,25	1,31	0,60
7	-15,60	-17,10	-14,35	-15,85	-13,66	-14,93	0,69	0,92
8	-13,90	-15,30	-12,65	-14,05	-11,67	-12,66	0,98	1,39
9	-16,00	-16,80	-14,75	-15,55	-13,73	-14,78	1,02	0,77
10	-14,10	-15,30	-12,85	-14,05	-11,98	-13,18	0,87	0,87
11	-14,50	-16,10	-13,25	-14,85	-12,30	-13,84	0,95	1,01
12	-13,50	-14,90	-12,25	-13,65	-11,55	-12,59	0,70	1,06
13	-14,80	-15,50	-13,55	-14,25	-13,02	-13,33	0,53	0,92
14	-14,20	-14,80	-12,95	-13,55	-11,93	-12,25	1,02	1,30
15	-15,50	-15,90	-14,25	-14,65	-13,37	-13,74	0,88	0,91
16	-14,30	-15,20	-13,05	-13,95	-12,12	-12,98	0,93	0,97
17	-14,20	-14,20	-12,95	-12,95	-11,83	-12,08	1,12	0,87
18	-14,70	-14,90	-13,45	-13,65	-12,42	-12,66	1,03	0,99
19	-13,70	-14,40	-12,45	-13,15	-11,32	-12,03	1,13	1,12
20	-14,40	-14,90	-13,15	-13,65	-12,44	-12,49	0,71	1,16

Stanovené rozdílné hloubky kluzných trnů z obou měření byly interpretovány v histogramech, (obr. 70).



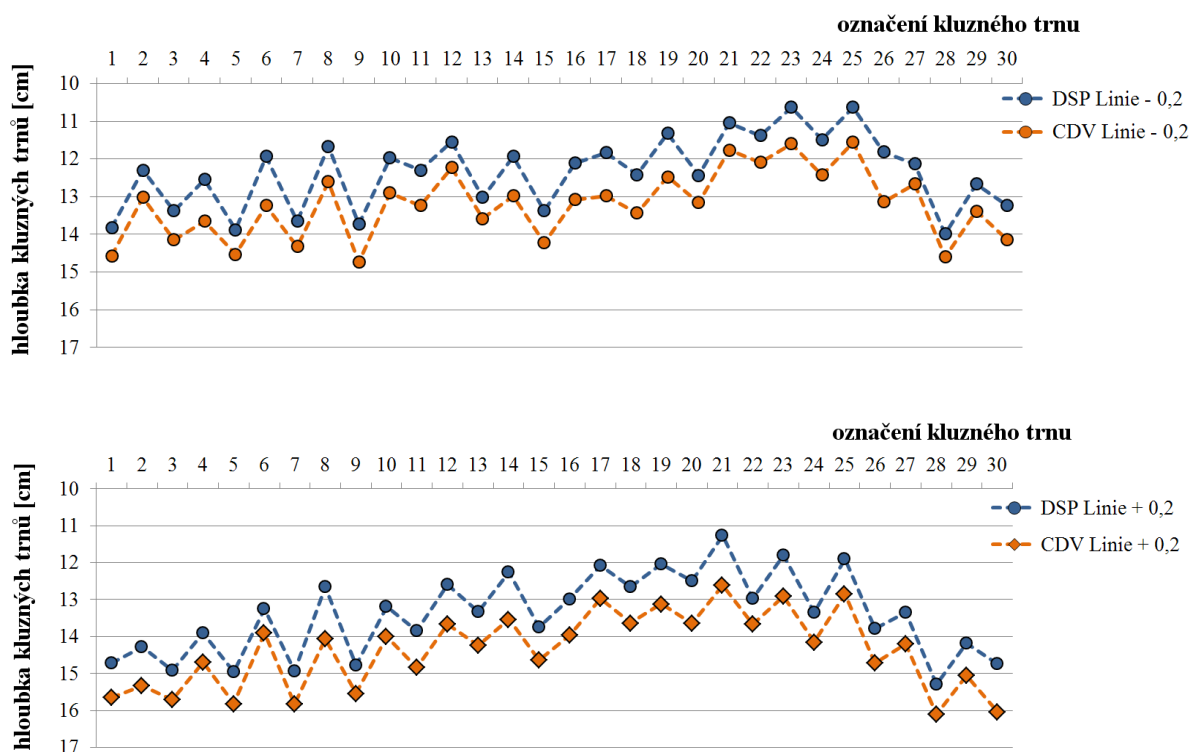
Obr. 70 Histogramy uvádějící četnosti rozdílů hloubek kluzných trnů (přímé změření minus GPR)
nahore jsou histogramy pro jednotlivé linie a dole pro obě linie

Pro porovnání výsledků stanovených georadarem (GPR) a výsledků z přímého měření bylo provedeno statistické vyhodnocení základních veličin a je uvedeno v tab. 37 (kap. 4.2.1.1).

Tab. 37 Statistické stanovení výsledků srovnávacího měření v Pelhřimově

	Linie	- 0,2	+ 0,2
Střední hodnoty hloubek povrchu KT [cm]	DSP	-12,34	-13,41
	CDV	-13,22	-14,37
Minimální hodnoty hloubek povrchu KT [cm]	DSP	-10,63	-11,27
	CDV	-11,56	-12,61
Maximální hodnoty hloubek povrchu KT [cm]	DSP	-13,99	-15,29
	CDV	-14,74	-16,11
Směrodatná odchylka hloubek povrchu KT [cm]	DSP	0,95	1,09
	CDV	0,90	1,02
Střední hodnota rozdílů hloubek povrchu KT [cm]	DSP + CDV	0,88	0,96
Maxima rozdílů hloubek povrchu KT [cm]	DSP + CDV	1,33	1,40
Minima rozdílů hloubek povrchu KT [cm]	DSP + CDV	0,53	0,65
Směrodatná odchylka rozdílů hloubek povrchu KT [cm]	DSP + CDV	0,21	0,18

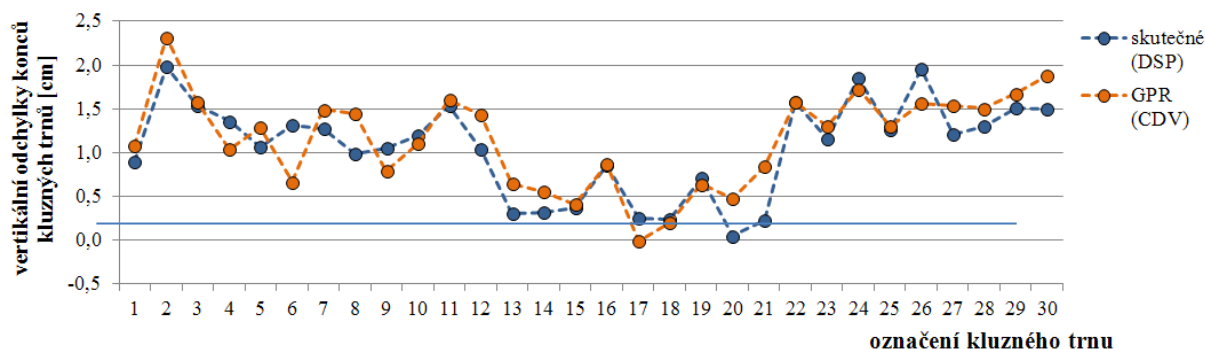
Dalším krokem při vyhodnocení bylo grafické srovnání naměřených hloubek (obr. 71) a jejich rozdílů, pro obě linie, vzdálené od příčné spáry o 0,2 metru.



Obr. 71 Grafické znázornění hloubek kluzných trnů (dz) stanovených destruktivně (DSP) a georadarem (CDV) ($v=0,1008$ m/ns) pro linie přejezdu -0,2 m (nahore) a pro linie přejezdu +0,2 m (dole)

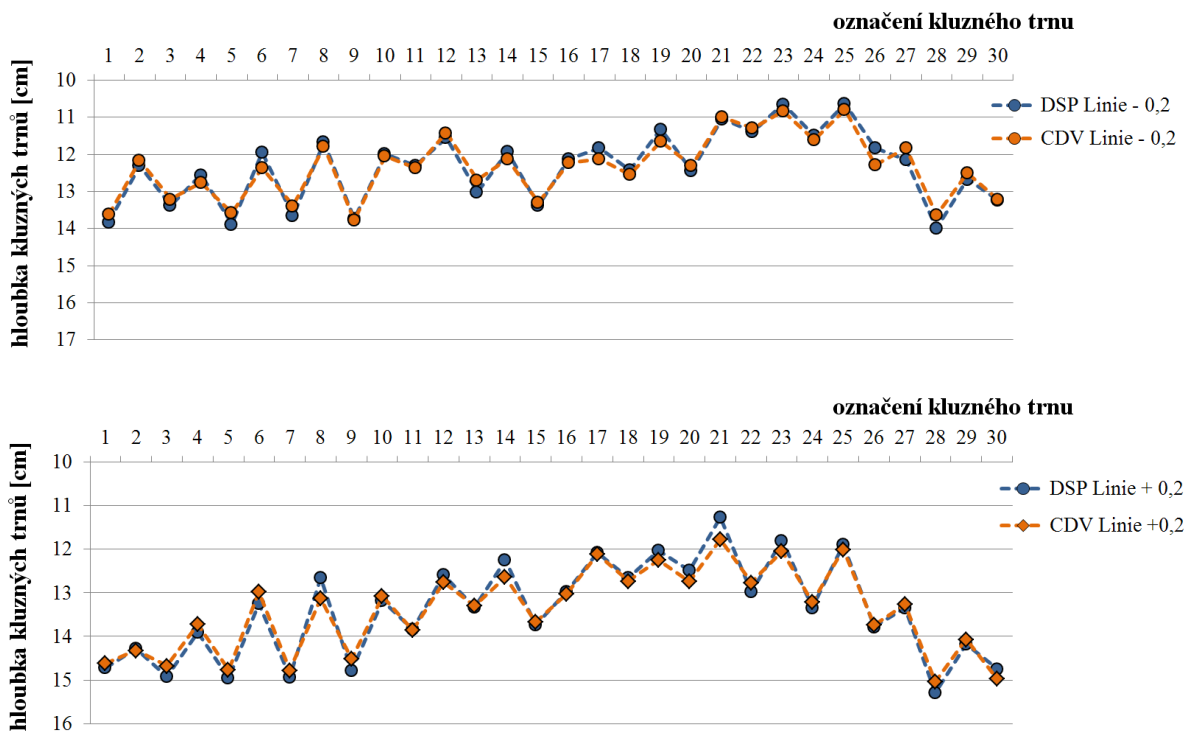
Výsledky vertikálních odchylek konců kluzných trnů a rozdíly mezi nimi jsou graficky znázorněny na obr. 72. Důležitým zjištěním je skutečnost, že georadar zachytil pouze

jednostranné vertikální odchylky konců kluzných trnů podobně, jak tomu bylo zjištěno destruktivním měřením.



Obr. 72 Grafické znázornění vertikálních odchylek konců kluzných trnů (*s*) stanovených destruktivně (DSP) a stanovených georadarem (CDV), $v=0,1008$ m/ns

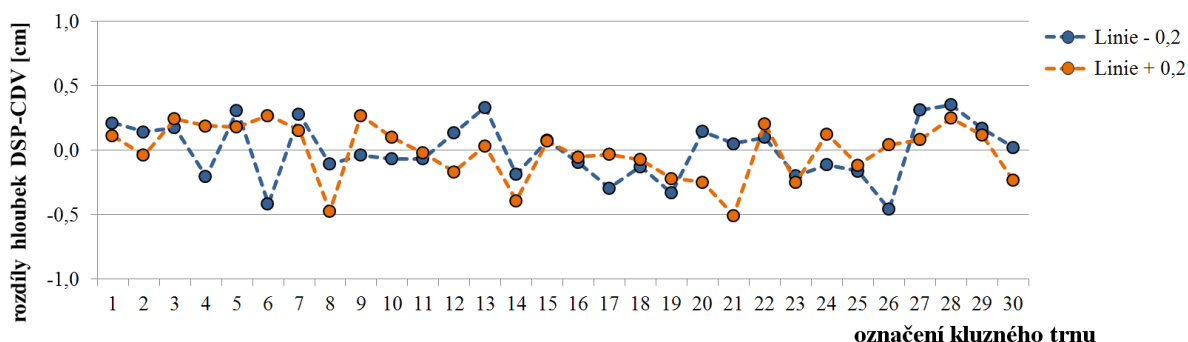
Z výsledků statistického vyhodnocení hloubky kluzných trnů je patrné, že rychlost šíření EM signálu určená metodou CMP byla stanovena vyšší, než když by byla známa hloubka jednoho kluzného trnu. Stanovené hodnoty hloubky kluzných trnů naměřených georadarem byly tedy poměrně sníženy tak, aby součet čtverců rozdílů hloubek CDV-DSP byl co nejmenší. Následně byla přepočítána rychlost šíření EM signálu na hodnotu $v = 0,0941$ m/ns a hloubky kluzných trnů byly graficky znovu porovnány (obr. 73).



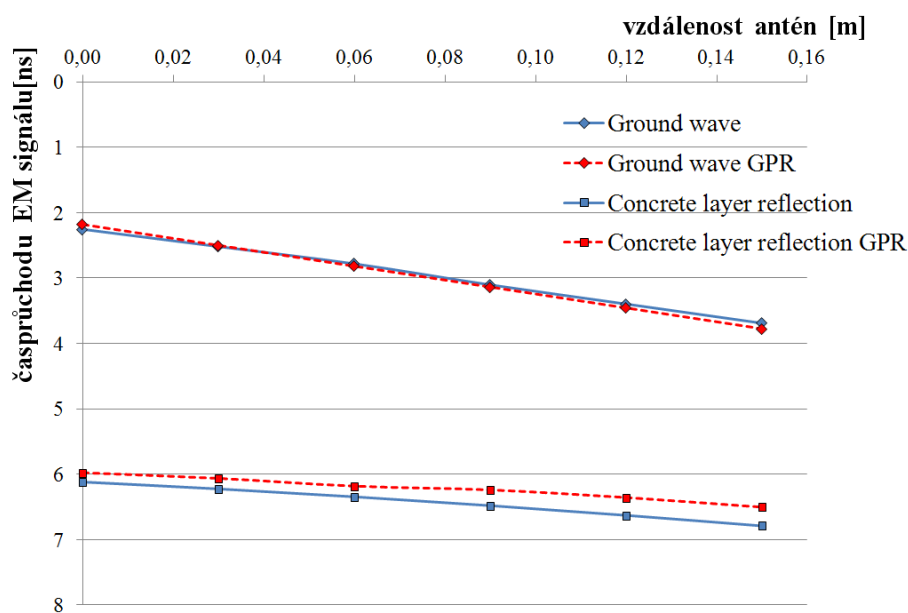
Obr. 73 Grafické znázornění hloubek kluzných trnů (*dz*) stanovených destruktivně (DSP) a stanovených georadarem (CDV), $v = 0,0941$ m/ns) pro linie přejezdu -0,2 m (nahore) a +0,2 m (dole)

Pokud stanovíme správně rychlost šíření EM signálu, můžeme očekávat velmi dobré výsledky, tzn. průběhy hloubek kluzných trnů mohou být téměř identické. Rozdíly skutečných hloubek KT zjištěných přímým změřením a hloubek zjištěných georadarem (obr. 74) jsou chybami při stanovení polohy výztuže ve vertikálním směru. Maximální chyba ve vertikálním směru pro toto měření in situ je 5 mm.

Zjištěná rychlost šíření EM signálu byla použita v grafickém zpracování CMP metody (obr. 75) a následně byly pro obě stanovené rychlosti vypočítány statistické veličiny (tab. 38).



Obr. 74 Grafické znázornění rozdílů hloubek kluzných trnů (d_z) stanovených destruktivně (DSP) a stanovených georadarem (CDV, $v = 0,0941$ m/ns) pro linie přejezdu $-0,2$ m (nahore) a $+0,2$ m (dole)



Obr. 75 Grafické zpracování CMP metody pro $v = 0,0941$ m/ns

Tab. 38 Rozdíly ve stanovené poloze kluzných trnů při použití různých rychlostí šíření EM signálu betonem, měření dvoukanálovým vozíkem s anténami s centrální vysílací frekvencí 1,6 GHz

Typ metody	Průměrná hloubka kluzných trnů z [mm]	Výběrová směrodatná odchylka hloubky $S_{d,z}$ [mm]	Průměrný rozdíl hloubek KT Δz [mm]	Průměrné vertikální natočení KT s [mm]	Výběrová sm. odch. vertikálního natočení KT $S_{d,s}$ [mm]	Průměrný rozdíl vertikálního natočení KT Δs [mm]
Destruktivní	128.7	11.6	-	13.3	6.8	-
Georadar – CMP metoda $v = 100.8$ mm/ns	137.9	11.3	9.2	14.4	6.8	1.1
Georadar – skutečná rychlost: $v = 94.1$ mm/ns	128.8	10.5	0.1	13.4	6.3	1.0

Závěrem lze konstatovat, že změnou rychlosti šíření EM signálu se zlepšily výsledky pro experiment správnosti ve vertikálním směru (průměrný rozdíl metod pro stanovení hloubky KT a pro stanovení rozdílu ve vertikálním natočení konců výztuže). Výsledky pro metodu CMP zjištěné pro skutečnou rychlost šíření nejsou prokazatelné.

4.8.3 Srovnávací měření georadaru se zařízením MIT-Scan-2

Do výsledků měření in situ je zahrnuto také porovnání dvou nedestruktivních metod, které bylo v ČR provedeno poprvé na pracovní spáře dálnice D1.

Zařízení MIT-Scan-2 umožňuje také nedestruktivní kontrolu polohy kluzných trnů a kotev ve vozovkách s CB krytem (obr. 76). Pomocí měřicího vozíku vedeného po kolejnicích se mohou určovat odchylky od předepsané polohy výztužných prvků. Určuje se hloubka uložení, podélný posun, vertikální a horizontální vychýlení konců kluzných trnů a kotev.

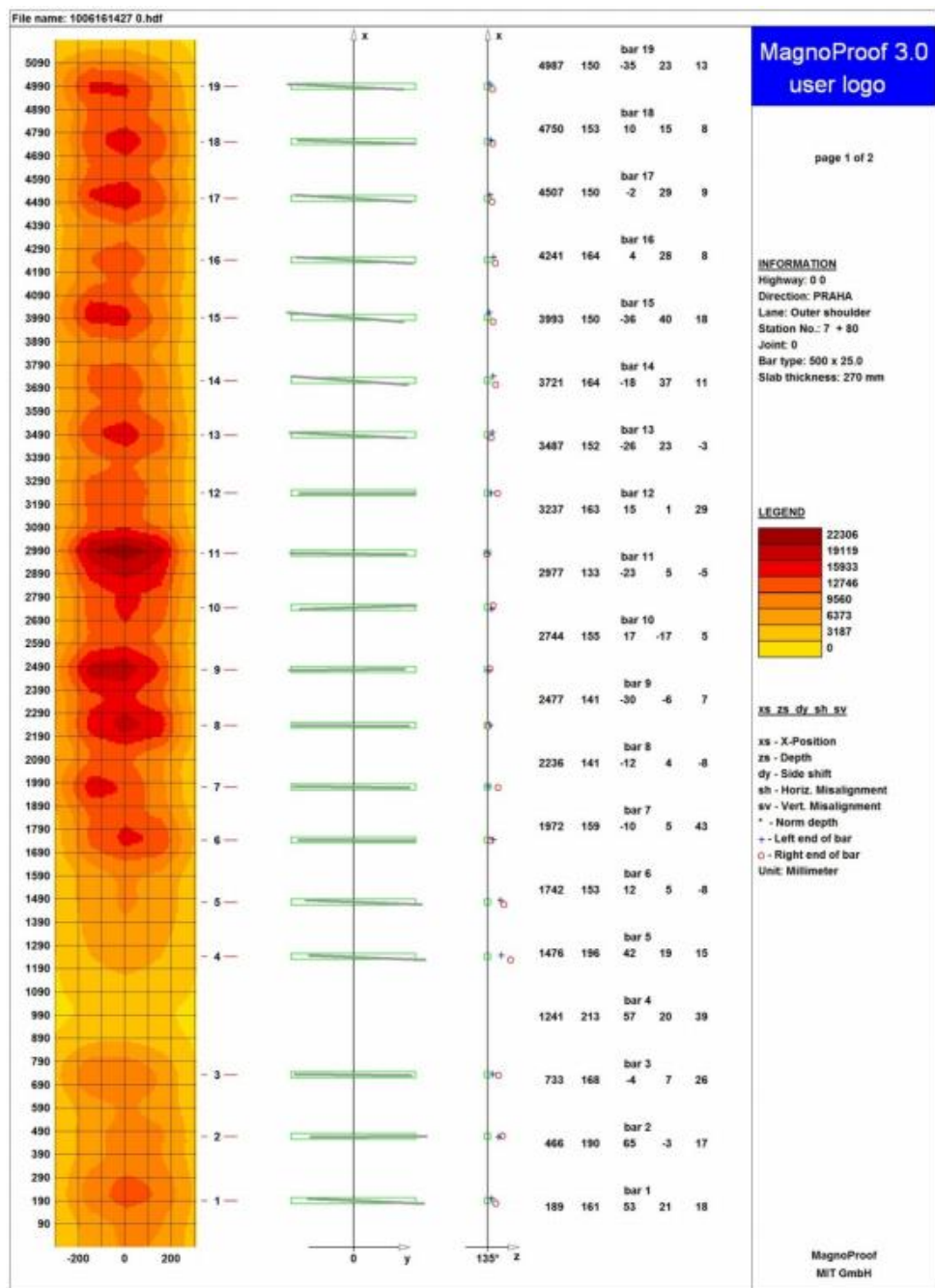


Obr. 76 Ukázka zařízení MIT-Scan při měření polohy kluzných trnů

Princip metody je založen na pulzně – indukční technologii. Přístroj vysílá slabý pulzující magnetický signál a detekuje magnetické odezvy signálu indukované v kovových tělesech. Slabé vyzařované magnetické pole je neškodné pro okolí a nemá vliv na fyzikální vlastnosti výztuži, ani betonu. Zjištěné hodnoty signálu jsou zaznamenávány vysokou vzorkovací frekvencí.

Metoda využívá zobrazovací techniku magnetické tomografie. V magnetické tomografii je odezva zkoumaných objektů vnějších polí měřena v prostoru a čase. Tyto signály obsahují informace o rozdělení elektrické vodivosti a magnetických vlastností, které umožňují ve zkoumaném prostředí určit polohu, velikost, tvar, orientaci a typ kovových těles a indikaci vad v těchto tělesech. Pokud přístroj měří více objektů najednou, je detekován celkový účinek všech měřených objektů. Neschopnost rozpoznat odezvy signálu jednotlivých objektů zvláště komplikuje analýzu dat. Kontrolní měření mohou být prováděna i za nízkých teplot a mírného deště.

Software pro vyhodnocení MagnoProof vytváří barevné mapy a detailní tabulky dat (obr. 77), které představují úplnou zprávu ve formátu programu Excel.

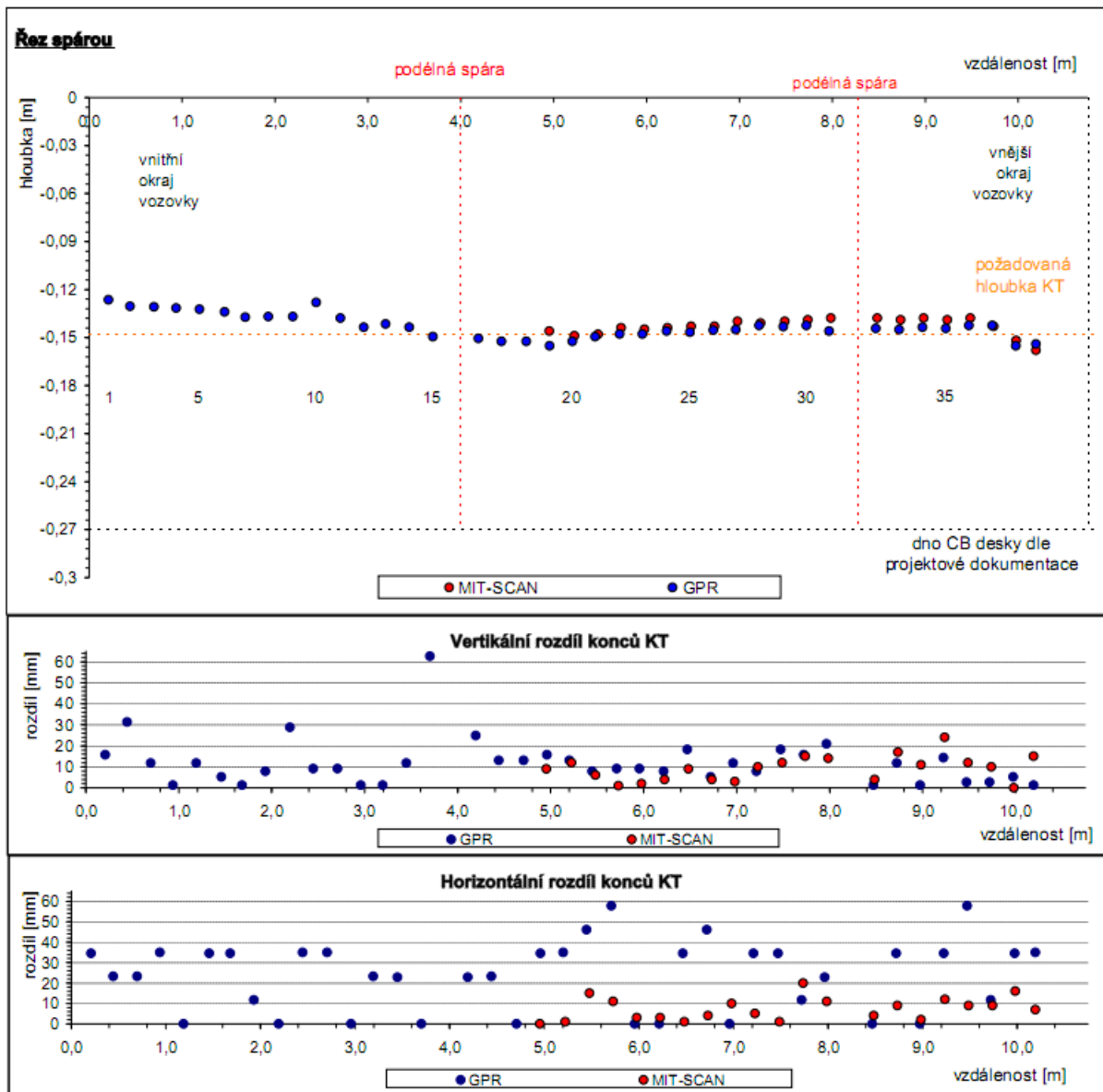


Obr. 77 Ukázka vizualizace naměřených dat v programu MagnoProof

Výsledky z prvního srovnávacího měření georadarů s metodou MIT-Scan 2 jsou na obr. 78 znázorněny červeně a výsledky z georadarů jsou znázorněny modře. Měření a vyhodnocení georadarových dat bylo obdobné jako v kap. 4.8.2.

Horní graf „Řez spárou“ na obr. 78 ukazuje průběhy naměřených hloubek oběma metodami. Obecně lze předpokládat, že v pracovní spáře jsou hloubky kluzných trnů ve správném uložení.

Pracovní spára Km 18,410



Obr. 78 Interpretace výsledků z měření nedestruktivními metodami na pracovní spáře

Výsledky obou nedestruktivních metod ukazují podobný průběh hloubek kluzných trnů, můžeme tedy uvést, že se tyto metody v průběhu stanovení hloubek kluzných trnů shodují, ale uložení nejsou ve stejné hloubce. Správnost výsledků metod zde nebyla ověřena.

Při stanovení vertikálních a horizontálních odchylek kluzných trnů jsou však výsledky velmi rozdílné a lze tvrdit, že mezi výsledky není žádná závislost. Další srovnávací měření snad objasní tuto skutečnost a stanoví shodnost a správnost výsledků těchto nedestruktivních metod.

4.8.4 Srovnávací měření NDT metod na pokusném úseku se zabudovanými trny a kotvami

Pro správnost měření polohy kluzných trnů a kotev byl vybudován zkušební úsek délky cca 28 m v areálu firmy Skanska, a.s. Výztužné prvky byly osazeny do navrtaných otvorů do vybetonované pravé poloviny betonového krytu vozovky (obr. 79) s různým vychýlením a posuny oproti požadované (středové) poloze. Skutečná poloha prvků byla přesně zaměřena akreditovanou laboratoří před betonáží levé poloviny betonového krytu vozovky. Na zkušebním úseku byly odchylky jednotlivých prvků voleny jako velmi extrémní, vzhledem k polohám na reálné stavbě.



Obr. 79 Pohled na zkušební úsek se zabudovanými kotvami a pohled shora na kluzné trny

Měření georadarem a zařízením MIT-Scan proběhlo 14 dní po betonáži. Měření georadarem bylo provedeno mobilním zařízením (kap. 4.7) a vyhodnoceno dle kap. 4.2.1. Uprostřed zkušební spáry byla ručně změřena výška betonu. Na základě této informace mělo být provedeno měření georadarem nad tímto místem a provedena kalibrace (stanovení rychlosti šíření elektromagnetického signálu deskou CB krytu).

V rámci tohoto srovnávacího měření byly porovnány výsledky polohy výztužných prvků zjištěných georadarem a zařízením MIT-Scan.

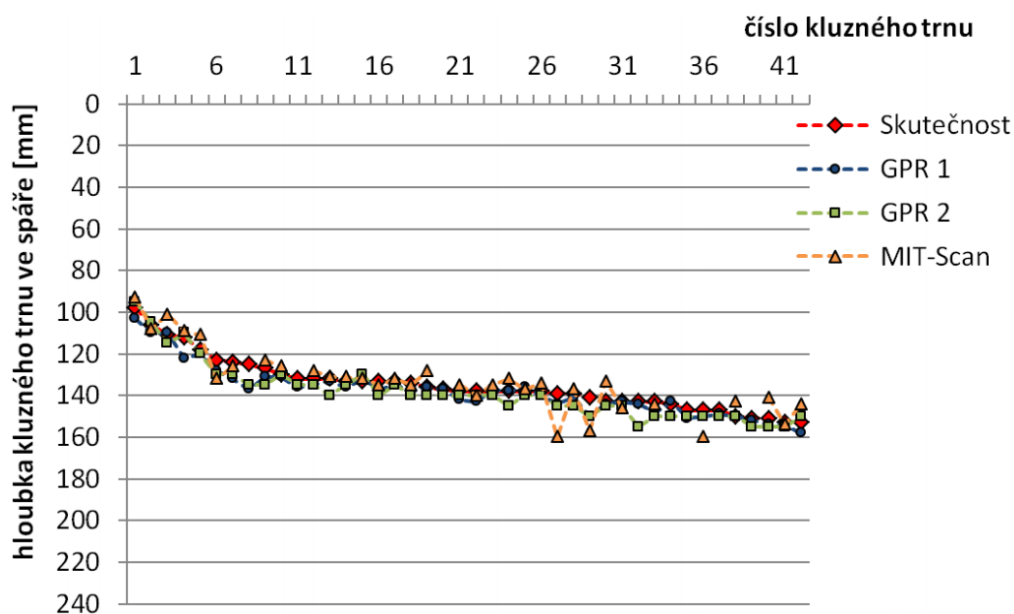
Cílem srovnávacího měření bylo zjistit přesnost jednotlivých měřicích zařízení. Při vyhodnocení se sledovaly následující parametry:

- hloubka uložení kluzných trnů a kotev ve spáře,
- vertikální rozdíly konců kluzných trnů a kotev,
- horizontální rozdíly konců kluzných trnů a kotev,
- podélný posun kluzných trnů a kotev.

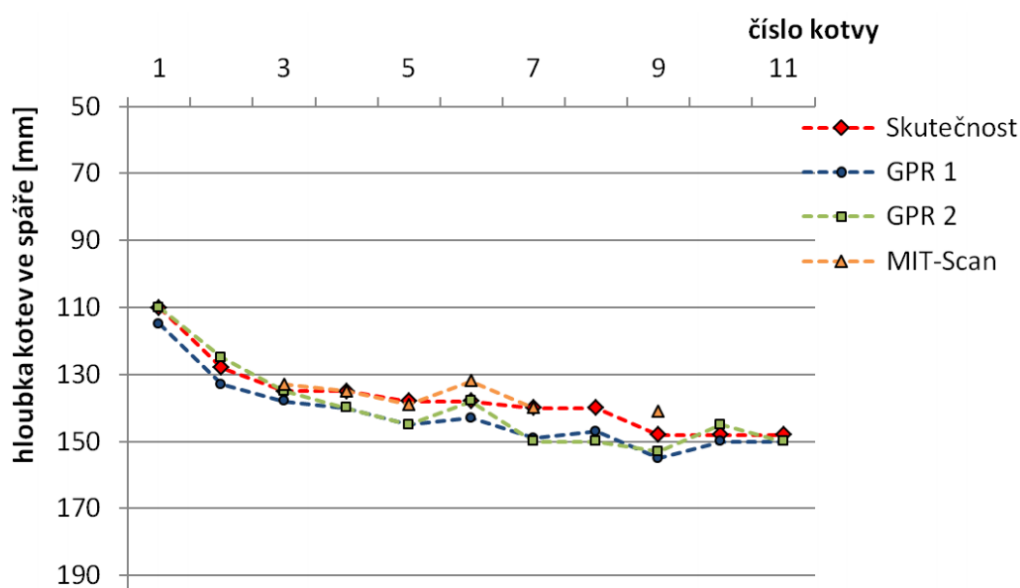
Pro zmíněné parametry byla provedena tabulková a grafická porovnání uvedených parametrů (tab. 39 - 42 a obr. 80 - 87). V grafických vyhodnoceních byly seřazeny hodnoty skutečných změření sestupně a jim byly přiřazeny stanovené hodnoty nedestruktivních metod.

Tab. 39 Stanovené hloubky kluzných trnů a kotev naměřených ve spáře vzhledem ke skutečnému změření

Metoda:	Hloubky kluzných trnů [mm]				Hloubky kotev [mm]			
	Skutečnost	GPR1	GPR2	MIT-Scan	Skutečnost	GPR1	GPR2	MIT-Scan
průměrná hodnota	135,0	137,9	138,6	132,7	137,1	142,3	140,1	136,7
max. hodnota	153,0	158,0	155,0	160,0	148,0	155,0	153,0	141,0
min. hodnota	98,0	103,0	95,0	93,0	110,0	115,0	110,0	132,0
počet změření	42	42	42	34	11	11	11	6
správnost výsledků metod v porovnání se skutečností:								
max. odchylka	-	12,0	12,0	21,0	-	9,0	10,0	7,0
prům. odchylka	-	3,1	4,1	5,2	-	5,2	4,5	2,7
směrod. odchylka	-	2,8	2,8	4,8	-	2,3	3,6	3,1



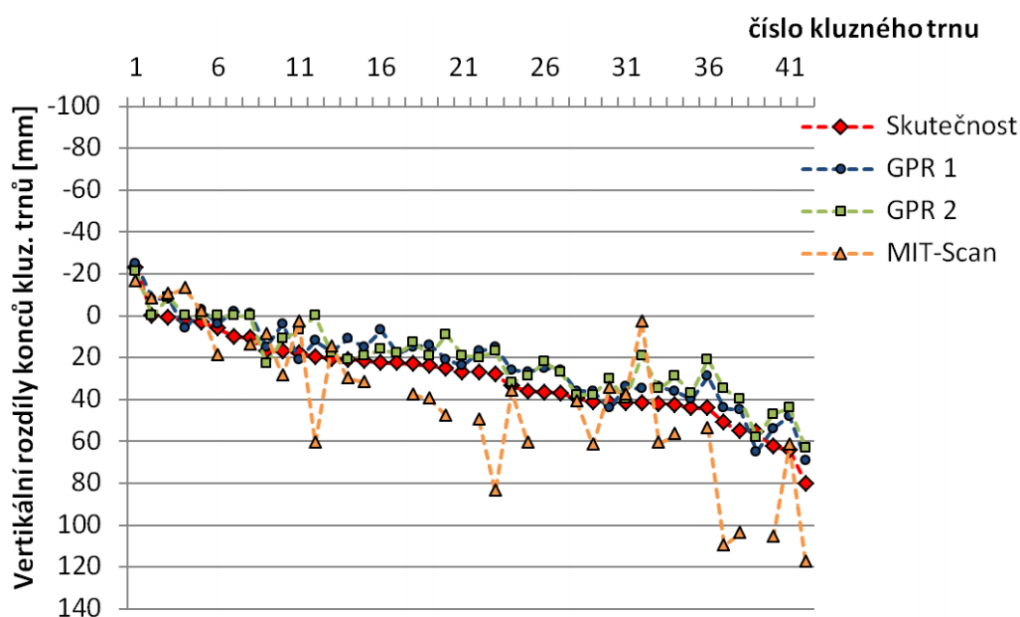
Obr. 80 Grafické vyhodnocení hloubky kluzných trnů naměřených ve spáře vzhledem ke skutečnému změření



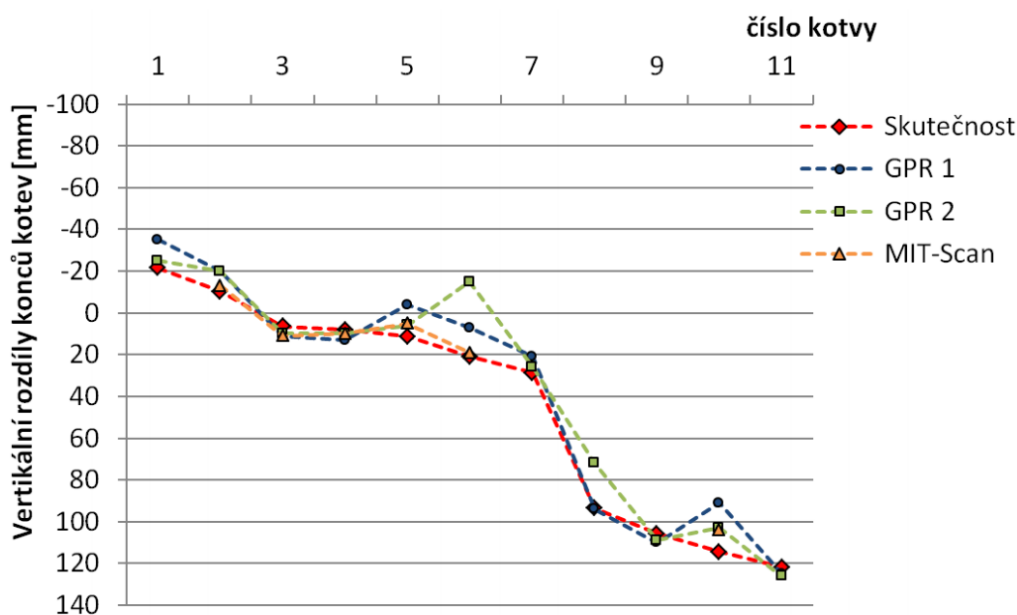
Obr. 81 Grafické vyhodnocení hloubky kotev naměřených ve spáře vzhledem ke skutečnému změření

Tab. 40 Zjištěné vertikální rozdíly konců kluzných trnů a kotev vzhledem ke skutečnému změření

Metoda:	Vertikální rozdíly konců KT [mm]				Vertikální rozdíly konců kotev [mm]			
	Skutečnost	GPR1	GPR2	MIT-Scan	Skutečnost	GPR1	GPR2	MIT-Scan
průměrná hodnota	29,3	22,4	21,0	40,3	43,5	37,5	36,5	22,7
max. hodnota	80,0	69,0	63,0	118,0	121,6	125,0	126,0	104,0
min. hodnota	-23,0	-25,0	-21,0	-16,0	-21,6	-35,0	-25,0	-13,0
počet změření	42	42	42	34	11	11	11	6
správnost výsledků metod v porovnání se skutečností:								
max. odchylka	-	16,0	23,0	59,0	-	23,4	35,8	10,4
prům. odchylka	-	7,8	8,8	18,5	-	9,2	9,4	4,6
směrod. odchylka	-	3,8	6,3	16,1	-	6,7	10,5	3,3



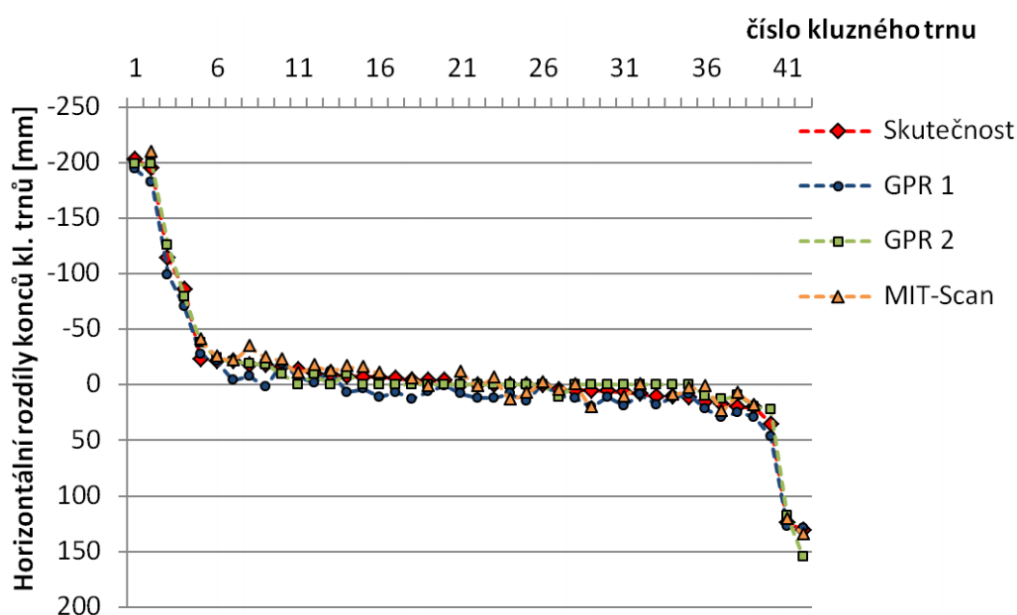
Obr. 82 Grafické vyhodnocení vertikálních rozdílů konců kluzných trnů vzhledem ke skutečnému změření



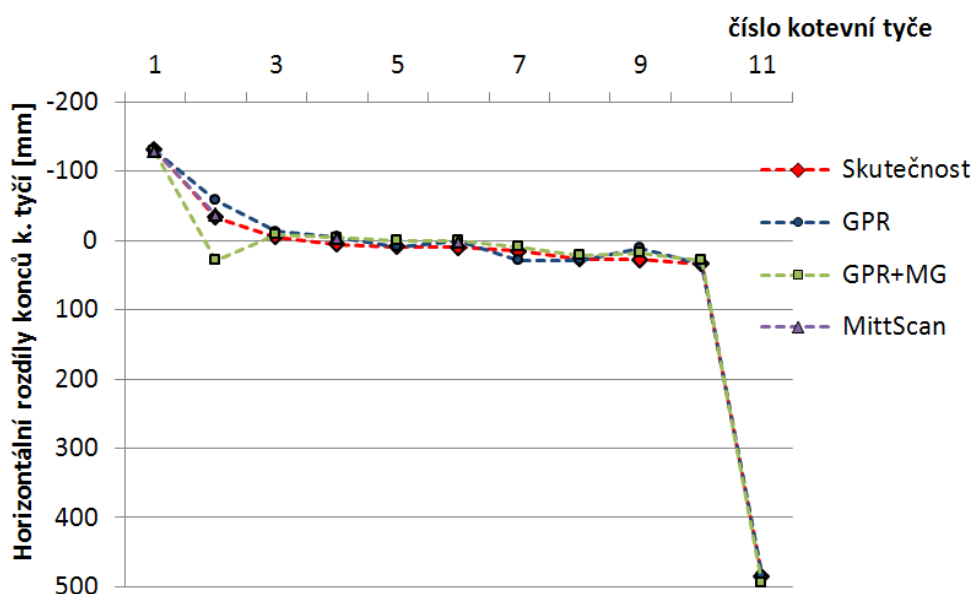
Obr. 83 Grafické vyhodnocení vertikálních rozdílů konců kotev vzhledem ke skutečnému změření

Tab. 41 Zjištěné horizontální rozdíly konců kluzných trnů a kotev vzhledem ke skutečnému změření

Metoda:	Horizontální rozdíly konců KT [mm]				Horizontální rozdíly konců kotev [mm]			
	Skutečnost	GPR 1	GPR 2	MIT-Scan	Skutečnost	GPR 1	GPR 2	MIT-Scan
průměrná hodnota	-8,6	-0,3	-9,3	-2,7	40,2	35,3	41,6	-22,0
max. hodnota	130,7	129,0	155,2	135,0	484,8	483,0	494,0	20,0
min. hodnota	-202,4	-194,0	-198,1	-209,0	-131,8	-131,0	-129,0	-130,0
počet změření	42	42	42	34	11	11	11	6
správnost výsledků metod v porovnání se skutečností:								
max. odchylka	-	19,9	24,5	16,6	-	24,0	63,0	14,4
prům. odchylka	-	8,9	5,7	6,7	-	8,0	12,2	7,7
směrodatná odchylka	-	5,4	5,1	5,0	-	7,8	17,0	4,7



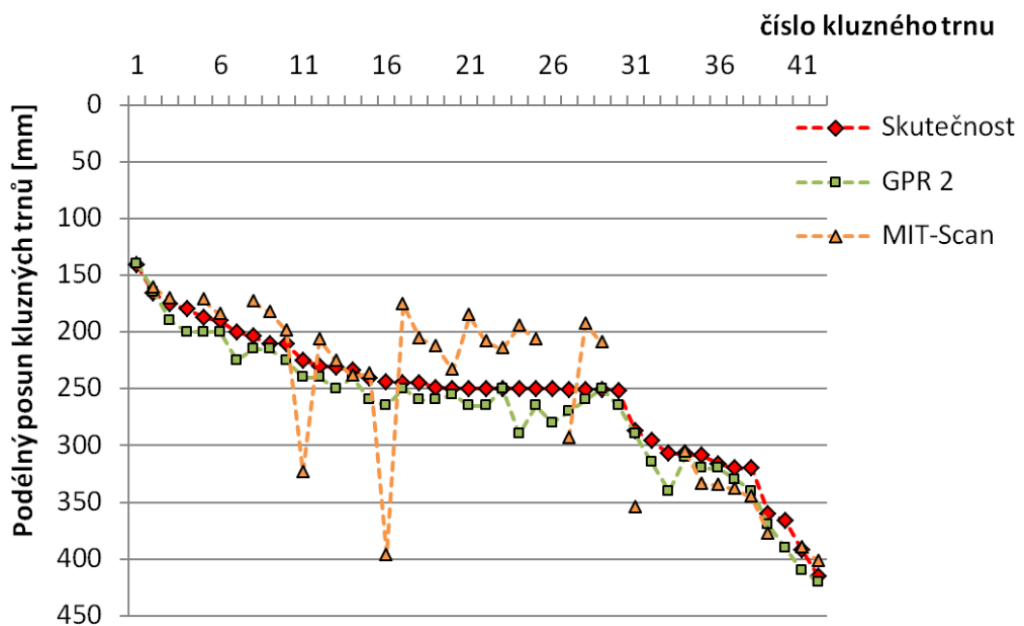
Obr. 84 Grafické vyhodnocení horizontálních rozdílů konců kluzných trnů vzhledem ke skutečnému změření



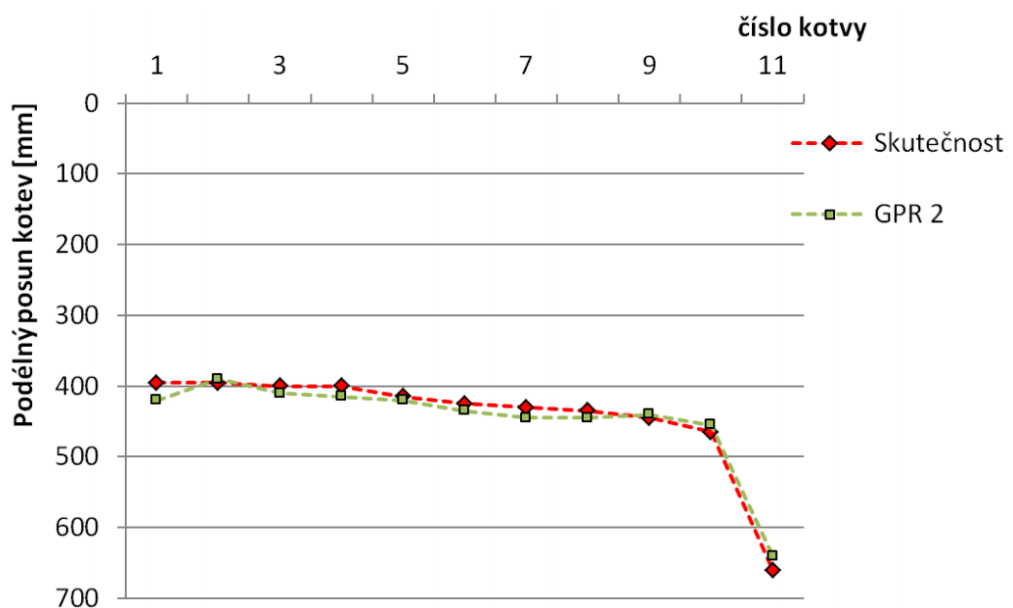
Obr. 85 Grafické vyhodnocení vertikálních rozdílů konců kotev vzhledem ke skutečnému změření

Tab. 42 Zjištěné podélné posuny kluzných trnů a kotev vzhledem ke skutečnému změřeni

Metoda:	Podélný posun kluzných trnů [mm]				Podélný posun kotev [mm]			
	Skutečnost	GPR1	GPR2	MIT-Scan	Skutečnost	GPR1	GPR2	MIT-Scan
průměrná hodnota	256,2	-	269,3	252,9	442,3	-	446,8	-
max. hodnota	415,0	-	420,0	402,0	660,0	-	640,0	-
min. hodnota	141,0	-	140,0	162,0	395,0	-	390,0	-
počet změřeni	42	-	42	34	11	-	11	-
správnost výsledků metod v porovnání se skutečností:								
max. odchylka	-	-	153,0	153,0	-	-	25,0	-
prům. odchylka	-	-	19,1	32,9	-	-	11,8	-
směrod.odchylka	-	-	28,2	31,6	-	-	6,4	-



Obr. 86 Grafické vyhodnocení podélných posunů konců kluzných trnů vzhledem ke skutečnému změřeni



Obr. 87 Grafické vyhodnocení podélných posunů konců kotev vzhledem ke skutečnému změřeni

V tabulkách 43 a 44 je provedeno statistické vyhodnocení maximálních, minimálních a průměrných hodnot polohy kluzných trnů a kotev, zjištěných nedestruktivními metodami. V tabulkách 45 a 46 byly sledovány maximální, průměrné a směrodatné odchylky stanovené z rozdílů výsledků georadaru od skutečnosti (správnost výsledků georadaru v porovnání se skutečností) a také výsledků obou georadarů mezi sebou (shodnost výsledků georadarů).

Tab. 43 Výsledky metod zjištění polohy kluzných trnů nedestruktivními metodami

n=42	Hloubka ve spáře z [mm]				Vertikální rozdíl konců KT s_v [mm]				Horizontální rozdíl konců s_h [mm]				Podélný posun x [mm]		
	skutečnost	GPR 1	GPR 2	MIT scan	skutečnost	GPR 1	GPR 2	MIT scan	skutečnost	GPR 1	GPR 2	MIT scan	skutečnost	GPR	MIT scan
max. hodnota	153	158	155	160	80	69	63	118	131	129	155	135	415	420	402
průměrná hodnota	135	138	139	133	29	22	21	40	-9	0	-9	-3	256	269	253
min. hodnota	98	103	95	93	-23	-25	-21	-16	-202	-194	-198	-209	141	140	162

Tab. 44 Výsledky metod zjištění polohy kotev nedestruktivními metodami

n=11	Hloubka ve spáře z [mm]				Vertikální rozdíl konců KT s_v [mm]				Horizontální rozdíl konců s_h [mm]				Podélný posun x [mm]		
	skutečnost	GPR 1	GPR 2	MIT scan	skutečnost	GPR 1	GPR 2	MIT scan	skutečnost	GPR 1	GPR 2	MIT scan	skutečnost	GPR	MIT scan
max. hodnota	148	155	153	141	122	125	126	104	485	483	494	20	660	640	-
průměrná hodnota	135	138	139	133	44	38	37	23	40	35	42	-22	442	447	-
min. hodnota	137	142	140	137	-22	-35	-25	-13	-132	-131	-129	-130	395	390	-

Tab. 45 Správnosti a shodnost výsledků nedestruktivních metod určení polohy kluzných trnů

n=42	Správnost výsledků metod v porovnání se skutečností:									Shodnost výsledků GPR:					
	δ_{1z}			δ_{1s_v}			δ_{1s_h}			δ_{1x}		δ_{2z}	δ_{2s_v}	δ_{2s_h}	δ_{2x}
Metoda:	GPR 1	GPR 2	MIT scan	GPR 1	GPR 2	MIT scan	GPR 1	GPR 2	MIT scan	GPR	MIT scan	GPR	GPR	GPR	GPR
směrodatná odchylka	3	3	5	4	6	16	5	5	5	9	32	3	6	9	-
průměrná odchylka	3	4	5	8	9	19	9	6	7	13	33	1	1	3	-
max. odchylka	12	12	21	16	23	59	20	25	17	40	153	11	16	23	-

Tab. 46 Správnosti a shodnost výsledků nedestruktivních metod určení polohy kotev

n=11	Správnost výsledků metod v porovnání se skutečností:									Shodnost výsledků GPR:					
	δ_{1z}			δ_{1s_v}			δ_{1s_h}			δ_{1x}		δ_{2z}	δ_{2s_v}	δ_{2s_h}	δ_{2x}
Metoda:	GPR 1	GPR 2	MIT scan	GPR 1	GPR 2	MIT scan	GPR 1	GPR 2	MIT scan	GPR	MIT scan	GPR	GPR	GPR	GPR
směrodatná odchylka	2	4	3	7	10	3	24	63	14	6	-	3	11	13	-
průměrná odchylka	5	4	3	9	9	5	9	12	8	12	-	1	0	4	-
max. odchylka	9	10	7	23	36	10	24	63	14	25	-	5	22	39	-

Metody stanovení statistických výsledků jsou popsány v kapitole 4.2.1.1.

Extrémní polohy výztužných prvků měly zásadní vliv na vyhodnocování naměřených hodnot pomocí zařízení MIT-scan. Ukázalo se, že přístroj (software) není na takto extrémní odchylky připraven a ve výsledcích nebylo vyhodnoceno 8 z celkového počtu 42 kluzných trnů a 5 z celkového počtu 11 kotev v extrémních polohách (tab. 39 – 42). Rozdíly od skutečných a georadarových výsledků jsou poměrně dobře viditelné ve výše uvedených grafech. Do výsledků nebyl započítán kluzný trn, který nebyl záměrně osazen do zkušebního úseku a výsledky georadaru i zařízení MIT-Scan tuto skutečnost potvrdily.

Všeobecně lze předpokládat, že tyto výsledky budou přinejmenším dosažitelné i na reálné stavbě. Velký význam má porovnání tří nedestruktivních metod (MIT-Scan a 2 x georadar) s přímým změřením akreditovanou zkušební laboratoří. Výrobce zařízení MIT-scan byl upozorněn na výsledky tohoto měření, zařízení by již mělo pracovat spolehlivěji a to také prověří nový pokusný úsek, na kterém budou v příštím roce prováděna další srovnávací měření.

4.8.5 Zkoušky přenosu zatížení na spárách rázovým zařízením FWD a stanovení polohy kluzných trnů na dvou pokusných úsecích

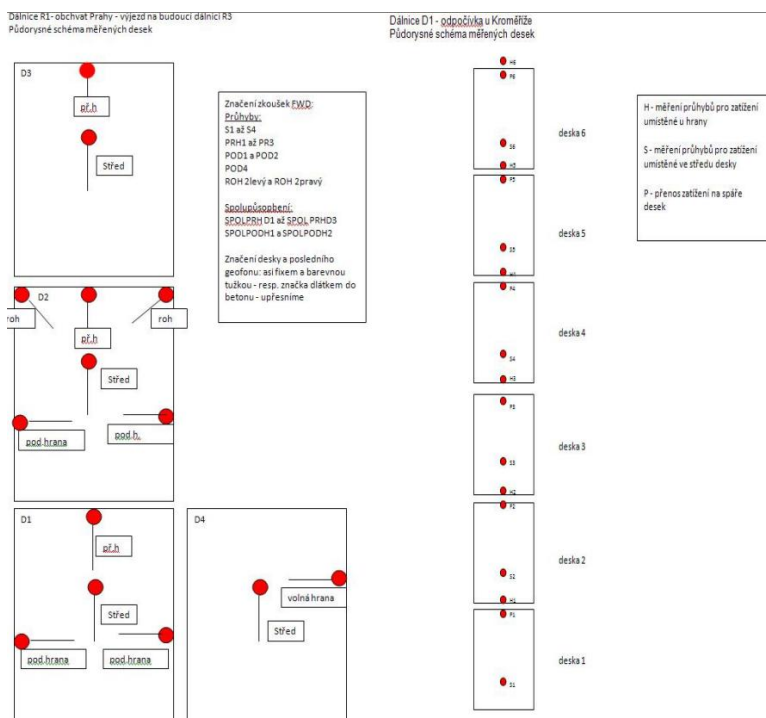
V roce 2012 byly vybrány 2 pokusné úseky, na kterých se přednostně provádělo měření přenosu zatížení na spárách rázovým zařízením. Na těchto úsecích bylo provedeno také měření polohy kluzných trnů georadarem (obr. 88).



Obr. 88 Nasazení nedestruktivních metod při hodnocení polohy kluzných trnů a kotev na pokusných úsecích

Spolupůsobení desek je vyhodnoceno jako podíl průhybů geofonu D3 (na nezatížené hraně desky ve vzdálenosti 300 mm od středu zatěžovací desky) a geofonu D2 (na zatížené hraně desky ve vzdálenosti 200 mm od středu zatěžovací desky) vyvolaných při zkoušce rázovým zařízením FWD.

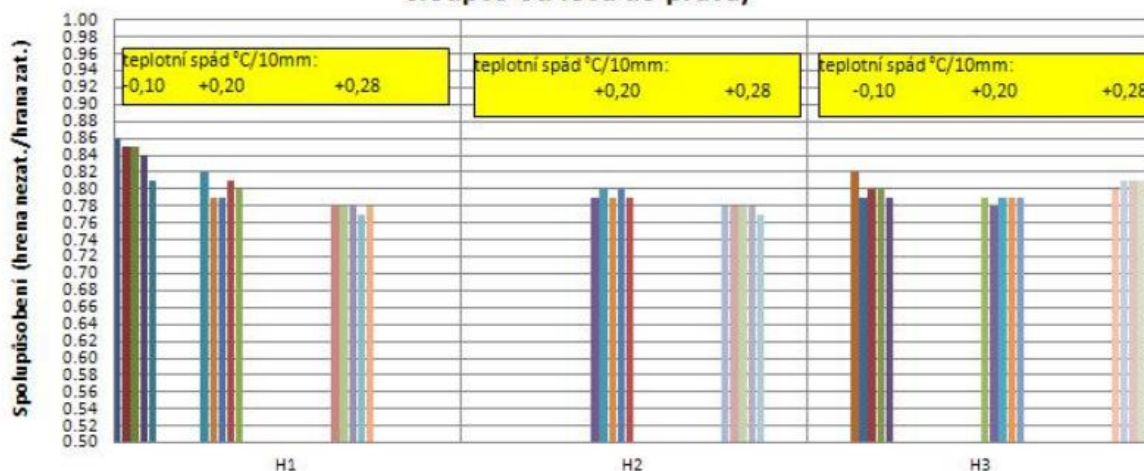
Na pokusném úseku rychlostní silnice R1 - Pražském okruhu, výjezdu na budoucí dálnici R3 - byly měřeny příčné spáry tří desek při různých teplotních spádech. Na pokusném úseku dálnice D1 - odpočívce před Kroměříží - byly měřeny příčné spáry šesti desek při jediném teplotním spádu $-0,10^{\circ}\text{C}/10\text{mm}$ (obr. 89).



Obr. 89 Schéma měřených příčných spár na rychlostní silnici R1 (vlevo) a dálnici D1 (vpravo)

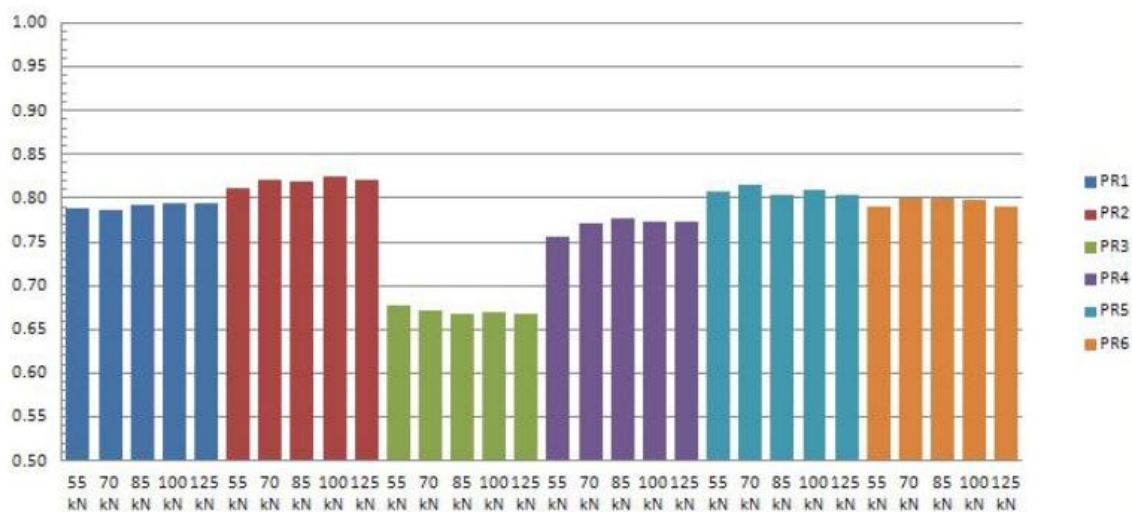
Na rychlostní silnici R1 se spolupůsobení pohybovalo v rozmezí 0,79 až 0,86, viz obr. 90. Na dálnici D1 se spolupůsobení pohybovalo v rozmezí 0,67 až 0,87 (obr. 91) - příčiny nízké hodnoty spolupůsobení u hrany H3 nebyly jednoznačně zjištěny. Podle zahraničních poznatků by se mělo spolupůsobení pohybovat nad hodnotou 0,90.

**R1 Praha obchvat - Spolupůsobení desek na příčných hranách H1 až H3
(10.10.2012 - pro zatížení : 55, 85, 110, 125 a 150 kN
sloupce od leva do prava)**



Obr. 90 Spolupůsobení 3 desek na rychlostní silnici R1 při různých teplotních spádech

D1 Spolupůsobení - přenos zatížení na příčných hranách desek (podíl průhybů D3/D2)



Obr. 91 Spolupůsobení 6ti desek na dálnici D1 při jednom teplotním spádu

Georadarová měření umístění kluzných trnů se prováděla na všech měřených příčných hranách (podobně jako v kapitole 4.8.4) a jednoznačně neprokázala u hrany H3 (mezi deskami č. 3 a 4 – D34) výrazné anomálie v uložení kluzných trnů. Výsledky ukazují, že poloha kluzných trnů je odlišná od správné polohy zejména v horizontálních posunech a natočeních. Z výsledků spolupůsobení bylo usuzováno, že na rychlostní silnici R1 se příznivě projevuje vliv cementem stmelené podkladní vrstvy, na rozdíl od dálnice D1 (odpočívce), kde je podkladní vrstva tvořena mechanicky zpevněným kamenivem.

Na obr. 92 – 94 jsou interpretace polohy kluzných trnů v příčných spárách popsány v kap. 6.1.

Výsledky z měření polohy kluzných trnů georadarem na zkušební úseku na R1

Hloubka uložení kluzných trnů v místě příčné spáry (k ose KT)

min. hloubka 114,9 mm
 max. hloubka 153,9 mm
 průměrná hloubka 133,2 mm
 požadovaná hloubka 137,5 mm

Podrobný výpis

Číslo KT	Staničení středů KT [m]	Hloubka střed	Hloubka -200	Hloubka 200	VR	HR	PP
1	0,181	117	112	122	13	24	< 75 mm
2	0,432	115	104	126	28	0	< 75 mm
3	0,674	123	119	127	10	4	< 75 mm
4	0,929	125	119	131	15	19	< 75 mm
5	1,180	125	120	129	11	14	< 75 mm
6	1,432	128	125	130	7	10	< 75 mm
7	1,680	129	129	130	2	14	< 75 mm
8	2,036	151	168	134	-43	-14	< 75 mm
9	2,285	127	120	134	17	-19	< 75 mm
10	2,529	130	123	137	17	-14	< 75 mm
11	2,779	136	129	142	15	-14	< 75 mm
12	3,034	138	135	141	8	-9	< 75 mm
13	3,286	141	140	142	2	-14	< 75 mm
14	3,536	142	142	142	0	-14	< 75 mm
15	3,795	140	133	147	17	-14	< 75 mm
16	4,059	145	151	139	-15	-14	< 75 mm
17	4,339	154	149	158	11	-4	< 75 mm

HI. střed - Houbka KT ve spáře [mm]
 HI. -200 - Houbka KT ve vzdálenosti 200 mm vlevo od příčné spáry [mm]
 HI. 200 - Houbka KT ve vzdálenosti 200 mm vpravo od příčné spáry [mm]
 VR - Vertikální rozdíl konců KT [mm]
 HR - Horizontální rozdíl konců KT [mm]
 PP - Početný posun KT

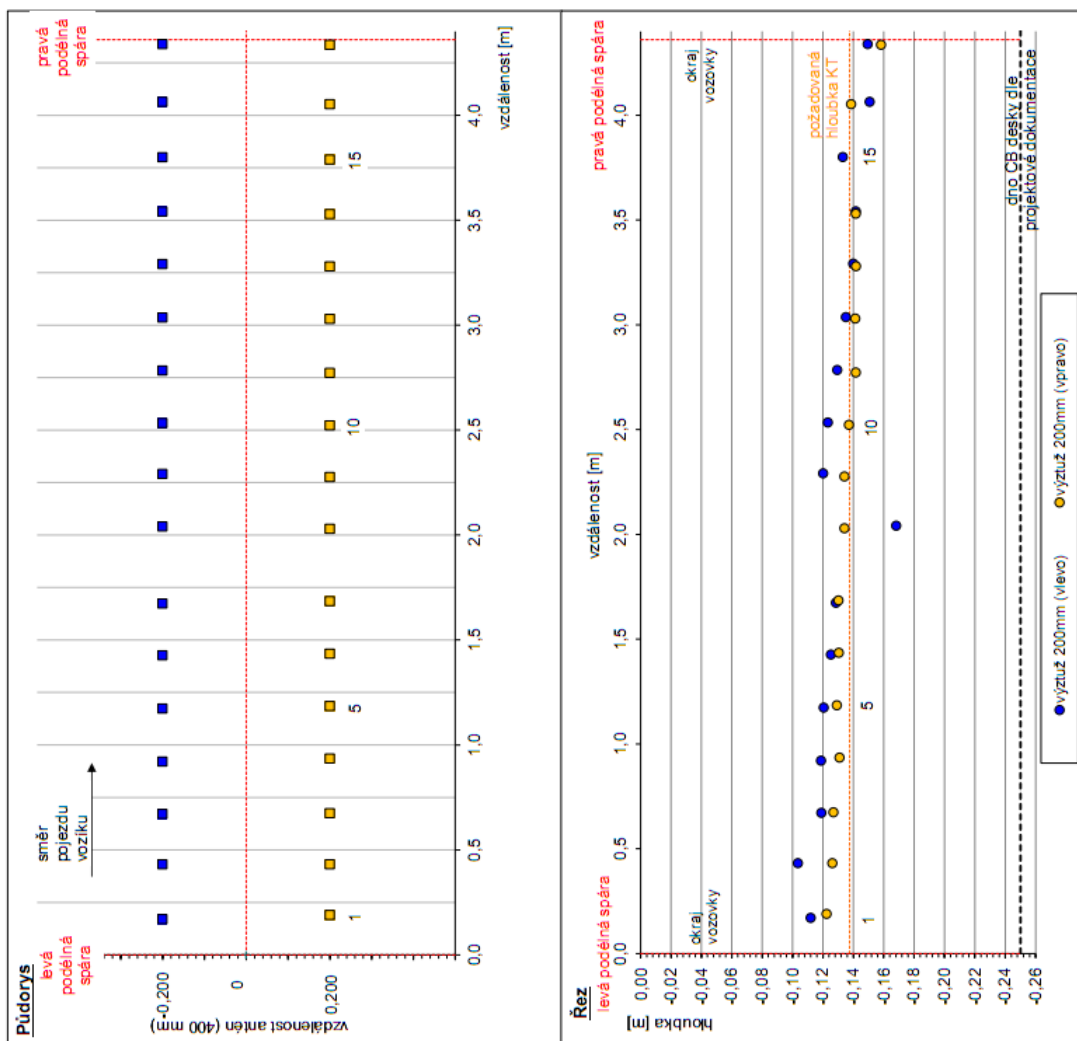
červeně jsou vyznačeny odchylky od projektové dokumentace větší než:

norma chyba GPR
 +/-20 +/-10
 +/-20 +/-15

vertikální směr
 horizontální směr

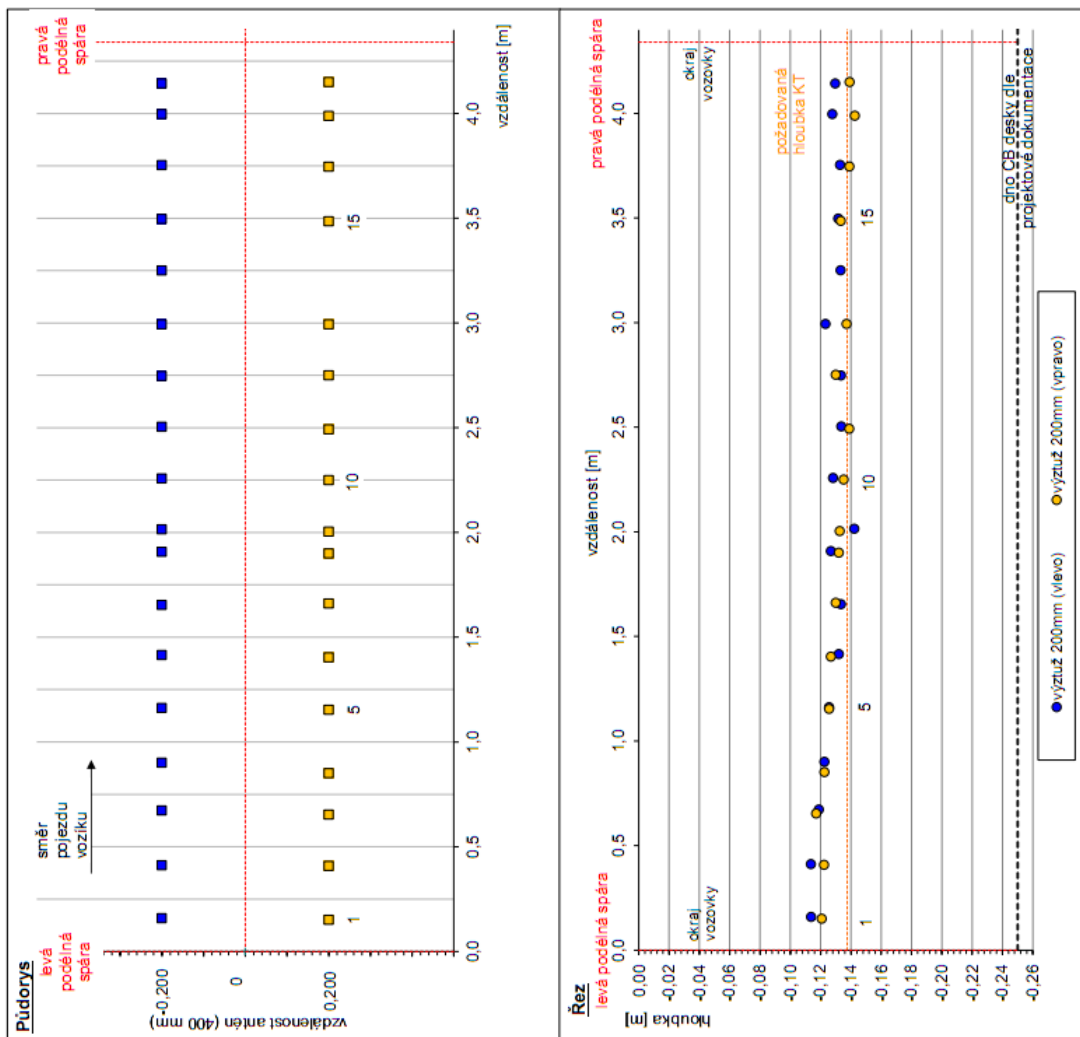
celkové
 +/-30 mm
 +/-35 mm

Příčná spára D12



Obr. 92 Interpretace výsledků příčné spáry D12 zkušební úseku R1

Příčná spára D23



Houbka uložení kluzných trnů v místě příčné spáry (k ose KT)

min. houbka 117,2 mm
 max. houbka 137,4 mm
 průměrná houbka 129,2 mm
 požadovaná houbka 137,5 mm

Podrobný výpis

Číslo KT	Staničení středů KT [m]	Houbka střed	Houbka -200	Houbka 200	VR	HR	PP
1	0,156	117	114	121	9	-10	< 75 mm
2	0,411	118	114	122	11	-4	< 75 mm
3	0,664	118	119	117	-2	-24	< 75 mm
4	0,877	123	123	123	0	-61	< 75 mm
5	1,159	126	126	126	0	-10	< 75 mm
6	1,410	129	132	127	-7	-14	< 75 mm
7	1,658	132	133	130	-4	9	< 75 mm
8	1,905	129	127	132	7	-10	< 75 mm
9	2,010	137	142	133	-12	-14	< 75 mm
10	2,255	132	128	135	9	-10	< 75 mm
11	2,499	136	134	139	7	-14	< 75 mm
12	2,750	132	133	130	-4	4	< 75 mm
13	2,994	130	123	137	17	0	< 75 mm
14							> 75 mm
15	3,492	132	132	133	2	-14	< 75 mm
16	3,751	136	133	139	8	-10	< 75 mm
17	3,994	135	128	143	19	-10	< 75 mm
18	4,147	134	130	139	12	9	< 75 mm

Hl. střed - Houbka KT ve spáře [mm]
 Hl. -200 - Houbka KT ve vzdálenosti 200 mm vlevo od příčné spáry [mm]
 Hl. 200 - Houbka KT ve vzdálenosti 200 mm vpravo od příčné spáry [mm]
 VR - Vertikální rozdíli konců KT [mm]
 HR - Horizontální rozdíli konců KT [mm]
 PP - Podélný posun KT

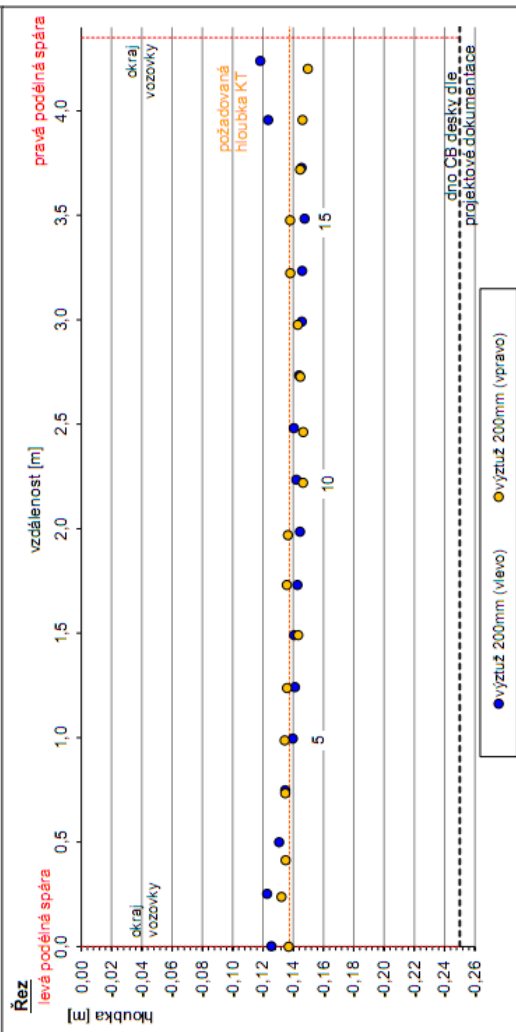
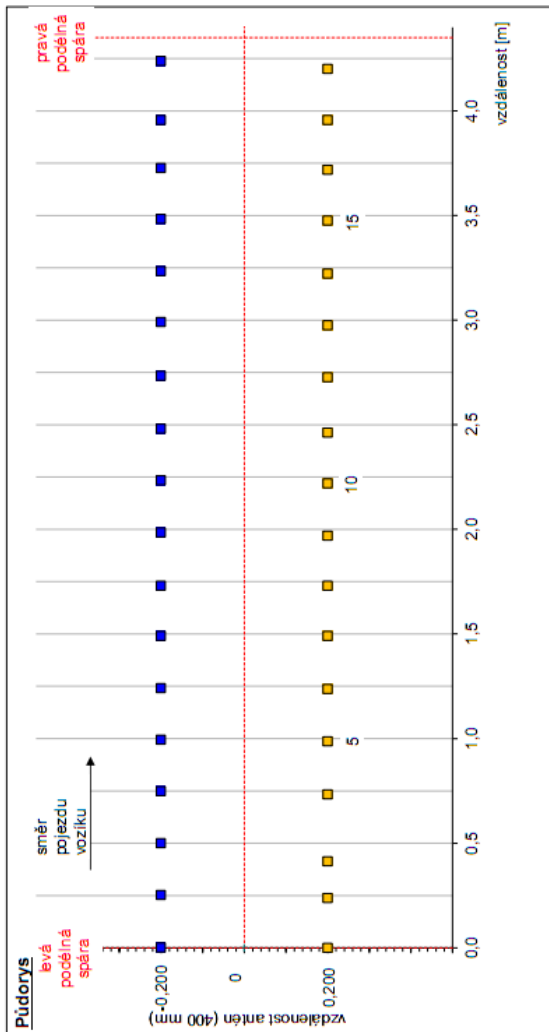
červeně jsou vyznačeny odchylky od projektové dokumentace větší než:

norma chyba GPR celkové
 +/20 +/10 +/30 mm
 +/20 +/15 +/35 mm

vertikální směr
 horizontální směr

Obr. 93 Interpretace výsledků příčné spáry D23 zkušebního úseku R1

Příčná spára D34



Hloubka uložení kluzných trnů v místě příčné spáry (k ose KT)

min. hloubka 127,5 mm
 max. hloubka 145,1 mm
 průměrná hloubka 138,8 mm
 požadovaná hloubka 137,5 mm

Podrobný výpis

Číslo KT	Stanění síředu KT [m]	Hloubka síředu	Hloubka -200	Hloubka 200	VR	HR	PP
1	0,000	131	126	137	14	-4	< 75 mm
2	0,246	127	123	132	12	-19	< 75 mm
3	0,467	133	131	135	5	-10,9	< 75 mm
4	0,742	135	135	135	0	-19	< 75 mm
5	0,992	137	140	134	-7	-10	< 75 mm
6	1,240	139	141	136	-7	-6	< 75 mm
7	1,491	142	141	143	3	0	< 75 mm
8	1,731	139	143	136	-9	0	< 75 mm
9	1,978	140	144	137	-10	-20	< 75 mm
10	2,228	144	142	146	5	-19	< 75 mm
11	2,473	144	140	147	8	-24	< 75 mm
12	2,731	144	144	145	1	-9	< 75 mm
13	2,984	144	146	143	-3	-20	< 75 mm
14	3,229	142	146	138	-10	-14	< 75 mm
15	3,481	143	148	138	-12	-10	< 75 mm
16	3,724	145	146	145	-1	-10	< 75 mm
17	3,957	135	123	146	28	0	< 75 mm
18	4,221	134	118	150	39	-47	< 75 mm

HI - sířed - Hloubka KT ve spáře [mm]
 HI -200 - Hloubka KT ve vzdálenosti 200 mm vlevo od příčné spáry [mm]
 HI -200 - Hloubka KT ve vzdálenosti 200 mm vpravo od příčné spáry [mm]
 VR - Vertikální rozdíli konců KT [mm]
 HR - Horizontální rozdíli konců KT [mm]
 PP - Podélný posun KT

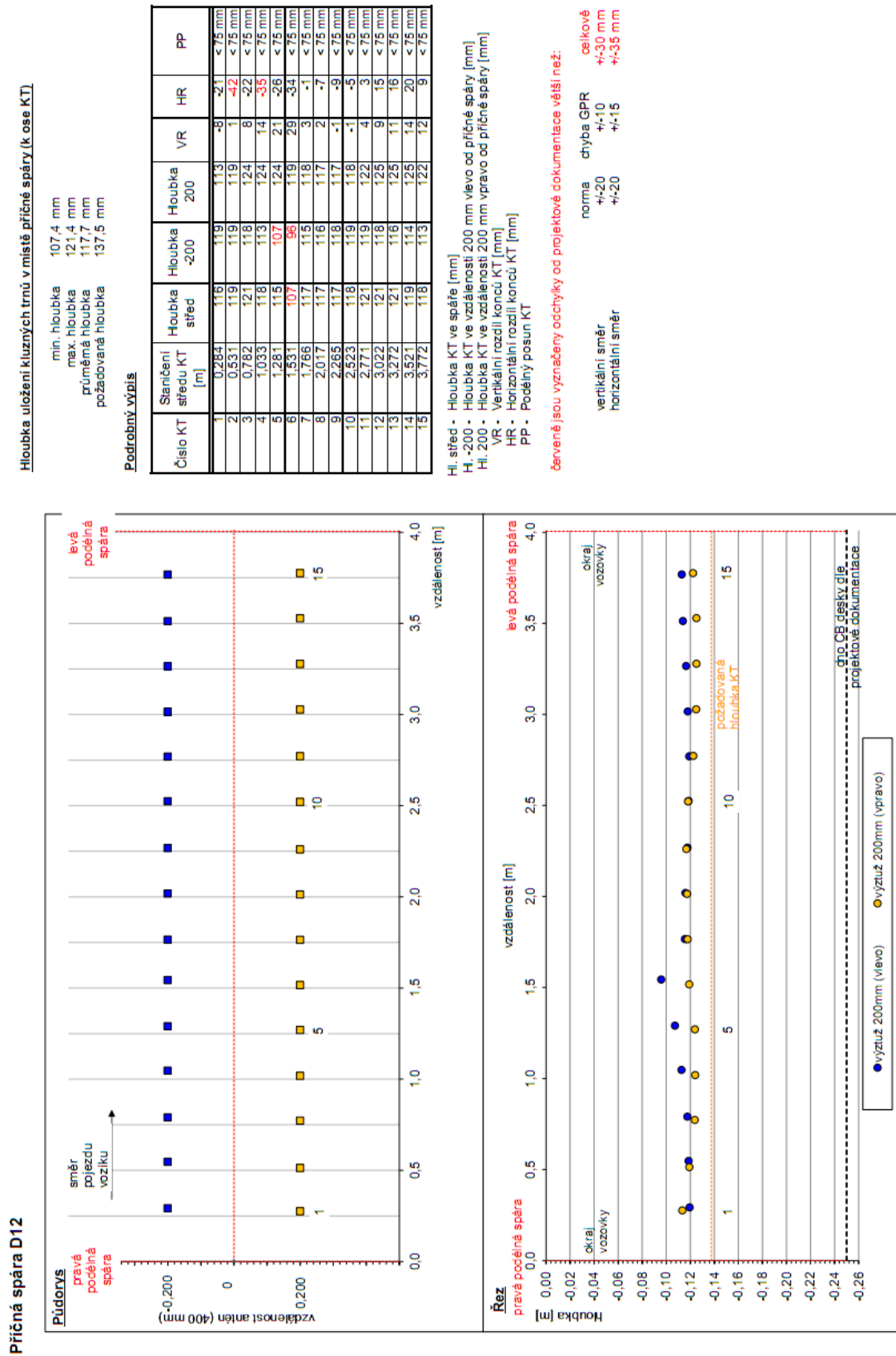
červeně jsou vyznačeny odchylky od projektové dokumentace větší než:

vertikální směr celkové
 horizontální směr +/-20 +/-10 +/-30 mm
 norma +/-20 +/-15 +/-35 mm

Obr. 94 Interpretace výsledků příčné spáry D34 zkušebního úseku R1

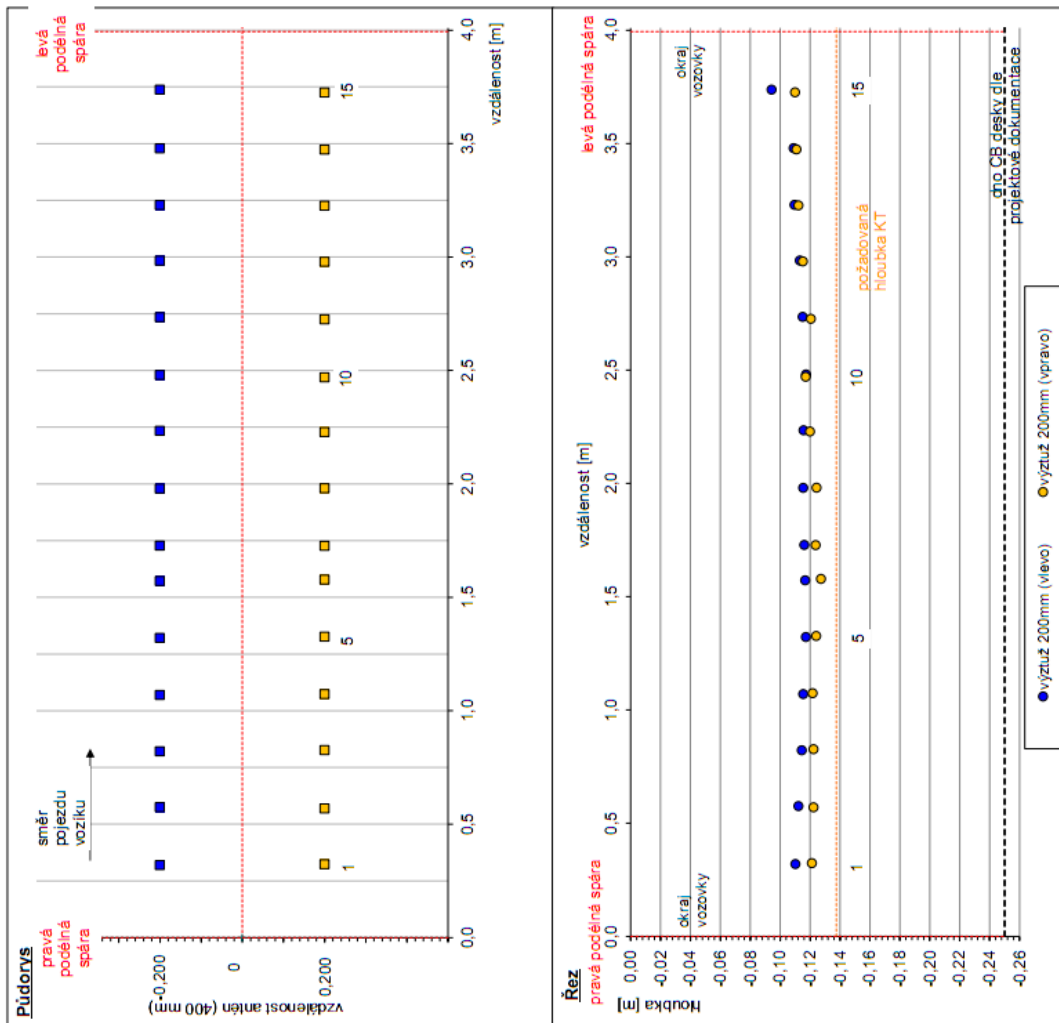
Výsledky z měření polohy kluzných trnů georadarem na dálnici D1

Na obr. 95 – 99 jsou interpretace polohy kluzných trnů v příčných spárách.



Obr. 95 Interpretace výsledků příčné spáry D12 zkušebního úseku D1

Příčná spára D23



Hloubka uložení kluzných trnů v místě příčné spáry (k ose KT)

min. hloubka 102,1 mm
 max. hloubka 122,0 mm
 průměrná hloubka 116,1 mm
 požadovaná hloubka 137,5 mm

Podrobný výpis

Číslo KT	Staničení středů KT [m]	Hloubka střed	Hloubka -200	Hloubka 200	VR	HR	PP
1	0,322	115	110	121	14	5	< 75 mm
2	0,573	117	112	122	13	-7	< 75 mm
3	0,824	118	114	122	10	6	< 75 mm
4	1,072	119	115	122	8	5	< 75 mm
5	1,324	121	117	124	9	6	< 75 mm
6	1,576	122	117	127	13	8	< 75 mm
7	1,728	120	116	124	9	-1	< 75 mm
8	1,981	120	115	124	11	1	< 75 mm
9	2,232	118	116	120	5	-7	< 75 mm
10	2,476	117	117	117	0	-13	< 75 mm
11	2,731	118	115	120	7	-11	< 75 mm
12	2,982	114	113	115	2	-5	< 75 mm
13	3,228	111	110	112	3	-3	< 75 mm
14	3,477	110	109	111	2	-7	< 75 mm
15	3,732	102	93	110	20	-15	< 75 mm

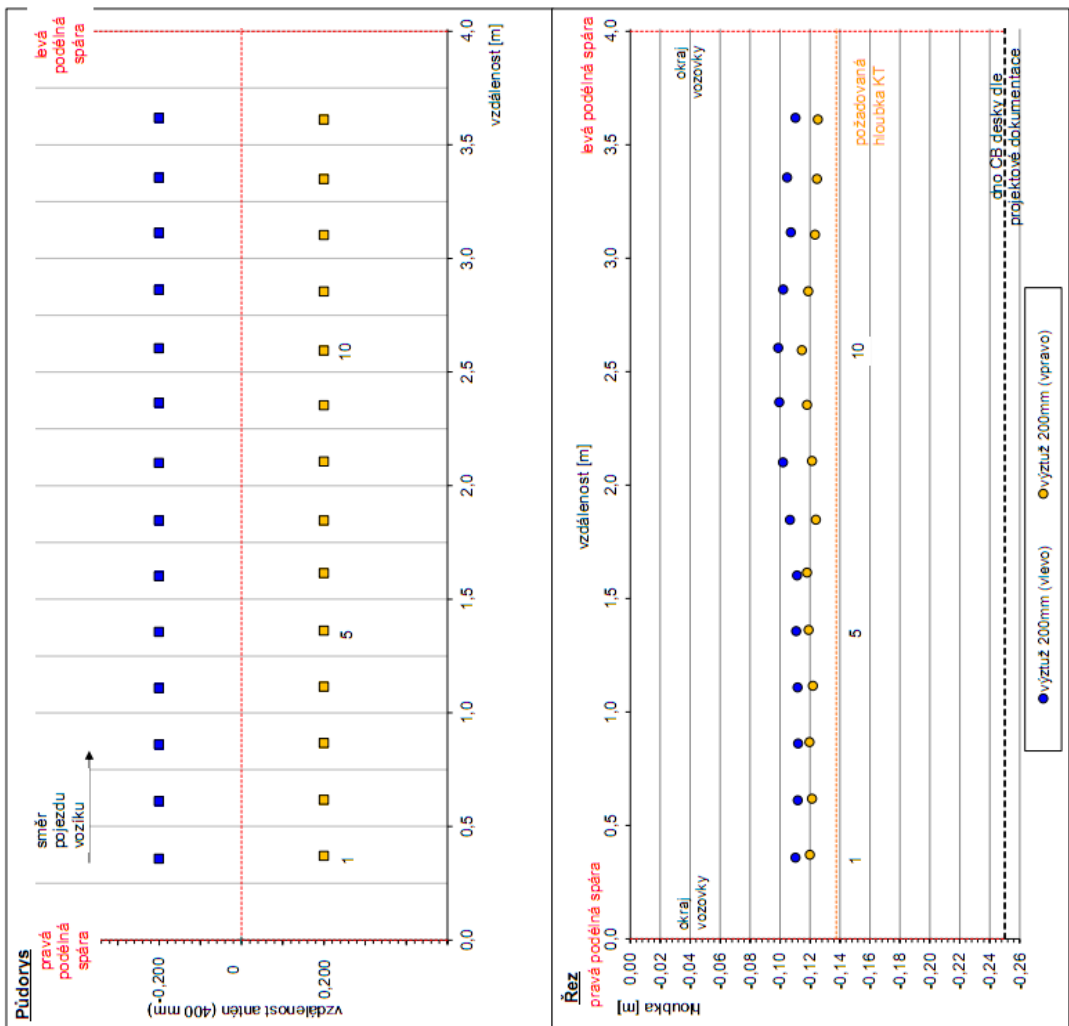
Hi - střed - Hloubka KT ve spáře [mm]
 Hl -200 - Hloubka KT ve vzdálenosti 200 mm vlevo od příčné spáry [mm]
 Hl 200 - Hloubka KT ve vzdálenosti 200 mm vpravo od příčné spáry [mm]
 VR - Vertikální rozdíl konců KT [mm]
 HR - Horizontální rozdíl konců KT [mm]
 PP - Podélný posun KT

červeně jsou vyznačeny odchylky od projektové dokumentace větší než:

vertikální směr norma chyba GPR celkové
 +/-20 +/-10 +/-30 mm
 horizontální směr +/-20 +/-15 +/-35 mm

Obr. 96 Interpretace výsledků příčné spáry D23 zkušebního úseku D1

Příčná spára D34



Hloubka uložení kluzných trnů v místě příčné spáry (k ose KT)

min. hloubka 106,7 mm
 max. hloubka 117,7 mm
 průměrná hloubka 113,9 mm
 požadovaná hloubka 137,5 mm

Podrobný výpis

Číslo KT	Staničení středu KT [m]	Hloubka střed	Hloubka -200	Hloubka 200	VR	HR	PP
1	0,365	115	110	120	12	16	< 75 mm
2	0,615	117	112	121	12	8	< 75 mm
3	0,865	116	112	120	10	8	< 75 mm
4	1,112	117	112	122	13	8	< 75 mm
5	1,360	115	111	119	10	7	< 75 mm
6	1,609	115	111	118	8	16	< 75 mm
7	1,847	115	107	124	22	1	< 75 mm
8	2,104	112	102	121	24	8	< 75 mm
9	2,360	109	100	118	23	-14	< 75 mm
10	2,600	107	99	115	20	-13	< 75 mm
11	2,859	110	102	119	21	-9	< 75 mm
12	3,109	115	107	123	20	-13	< 75 mm
13	3,353	115	105	125	25	-8	< 75 mm
14	3,615	118	110	123	19	-9	< 75 mm
15	měření v blízkosti betonových svodidel - nedoměreno až do konce						

HI - střed - Hloubka KT ve spáře [mm]
 HI -200 - Hloubka KT ve vzdálenosti 200 mm vlevo od příčné spáry [mm]
 HI -200 - Hloubka KT ve vzdálenosti 200 mm vpravo od příčné spáry [mm]
 VR - Vertikální rozdíl konců KT [mm]
 HR - Horizontální rozdíl konců KT [mm]
 PP - Podélný posun KT

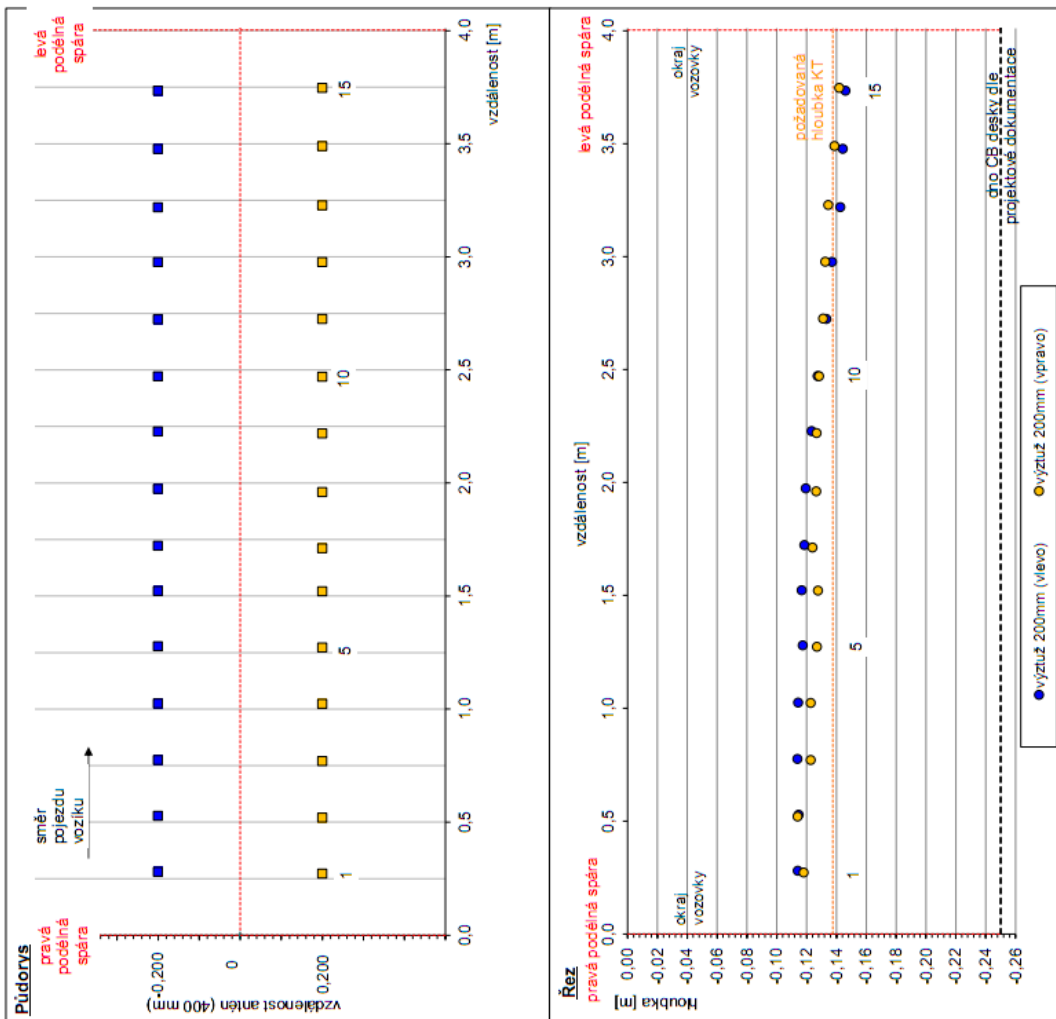
červeně jsou vyznačeny odchylky od projektové dokumentace větší než:

norma chyba GPR
 +/-20 +/-10
 +/-20 +/-15
 +/-30 mm
 +/-35 mm

vertikální směr
 horizontální směr

Obr. 97 Interpretace výsledků příčné spáry D34 zkušebního úseku D1

Příčná spára D45



Hloubka uložení kluzných trnů v místě příčné spáry (k ose KT)

min. hloubka 114,3 mm
 max. hloubka 143,9 mm
 průměrná hloubka 126,6 mm
 požadovaná hloubka 137,5 mm

Podrobný výpis

Číslo KT	Staniční střed KT [m]	Hloubka střed	Hloubka -200	Hloubka 200	VR	HR	PP
1	0,277	116	114	118	5	-9	< 75 mm
2	0,525	114	115	114	-1	-9	< 75 mm
3	0,773	118	114	123	11	-6	< 75 mm
4	1,025	119	114	123	10	-1	< 75 mm
5	1,276	122	117	127	12	-7	< 75 mm
6	1,522	122	117	128	14	-1	< 75 mm
7	1,717	121	119	124	7	-14	< 75 mm
8	1,967	123	119	126	9	-17	< 75 mm
9	2,224	125	123	127	4	-11	< 75 mm
10	2,471	128	127	128	1	-1	< 75 mm
11	2,725	132	133	131	-3	2	< 75 mm
12	2,977	135	137	133	-6	1	< 75 mm
13	3,224	139	143	135	-10	11	< 75 mm
14	3,484	141	144	139	-7	16	< 75 mm
15	3,741	144	146	142	-5	16	< 75 mm

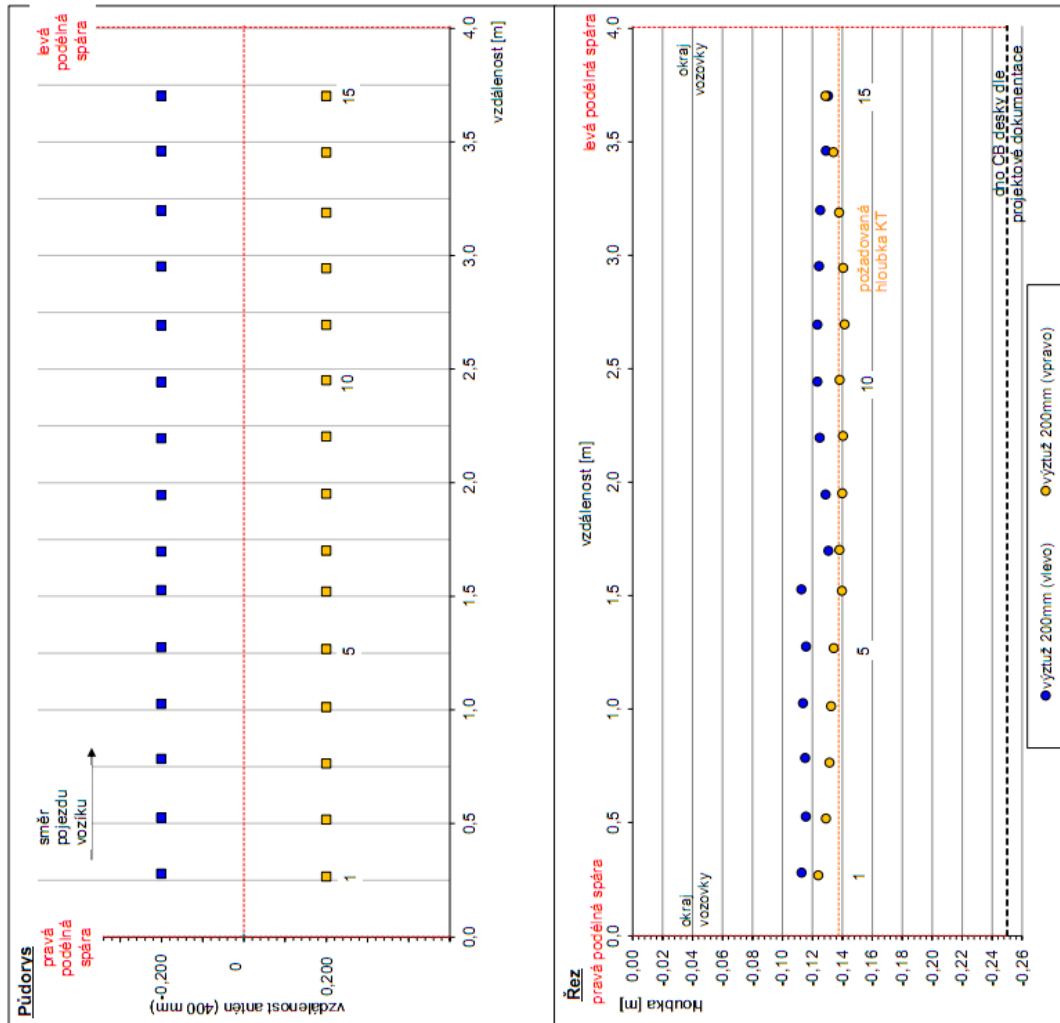
HI, střed - Hloubka KT ve spáře [mm]
 HI, -200 - Hloubka KT ve vzdálenosti 200 mm vlevo od příčné spáry [mm]
 HI, 200 - Hloubka KT ve vzdálenosti 200 mm vpravo od příčné spáry [mm]
 VR - Vertikální rozdíl koncu KT [mm]
 HR - Horizontální rozdíl koncu KT [mm]
 PP - Podélný posun KT

červeně jsou vyznačeny odchylky od projektové dokumentace větší než:

vertikální směr norma chyba GPR celkové
 +/-20 +/-10 +/-30 mm
 horizontální směr +/-20 +/-15 +/-35 mm

Obr. 98 Interpretace výsledků příčné spáry D45 zkušebního úseku D1

Příčná spára D56



Houbka uložení kluzných trnů v místě příčné spáry (k ose KT)

min. houbka 118,3 mm
 max. houbka 134,4 mm
 průměrná houbka 128,5 mm
 požadovaná houbka 137,5 mm

Podrobný výpis

Číslo KT	Staničení sítěu KT [m]	Houbka sítěu KT	Houbka -200	Houbka 200	VR	HR	PP
1	0,273	118	113	124	14	-16	< 75 mm
2	0,522	122	116	129	17	-11	< 75 mm
3	0,775	123	115	131	20	-26	< 75 mm
4	1,020	123	114	132	23	-18	< 75 mm
5	1,272	125	116	134	23	-9	< 75 mm
6	1,525	126	113	140	34	-8	< 75 mm
7	1,700	134	131	138	9	5	< 75 mm
8	1,949	134	129	140	14	7	< 75 mm
9	2,200	133	125	140	20	10	< 75 mm
10	2,447	131	123	138	18	10	< 75 mm
11	2,695	132	123	142	23	2	< 75 mm
12	2,949	132	124	141	20	-9	< 75 mm
13	3,194	132	125	138	16	-13	< 75 mm
14	3,458	132	129	134	6	-8	< 75 mm
15	3,703	130	130	129	-2	0	< 75 mm

HI. sítěu - Houbka KT ve spáře [mm]
 HI. -200 - Houbka KT ve vzdálenosti 200 mm vlevo od příčné spáry [mm]
 HI. 200 - Houbka KT ve vzdálenosti 200 mm vpravo od příčné spáry [mm]
 VR - Vertikální rozdíl konců KT [mm]
 HR - Horizontální rozdíl konců KT [mm]
 PP - Podélný posun KT

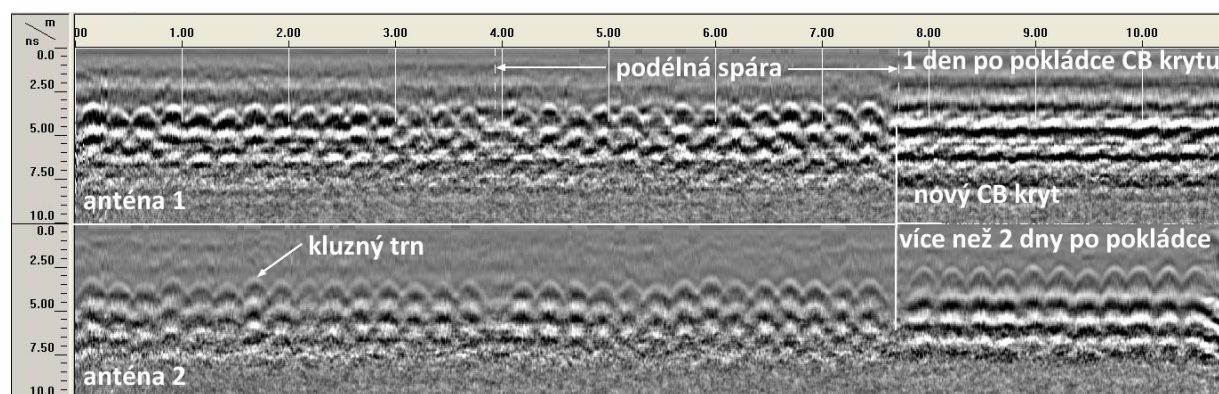
červeně jsou vyznačeny odchylky od projektové dokumentace větší než:

vertikální směr norma chyba GPR celkové
 horizontální směr +/-20 +/-10 +/-30 mm
 +/-15 +/-35 mm

Obr. 99 Interpretace výsledků příčné spáry D56 zkušebního úseku D1

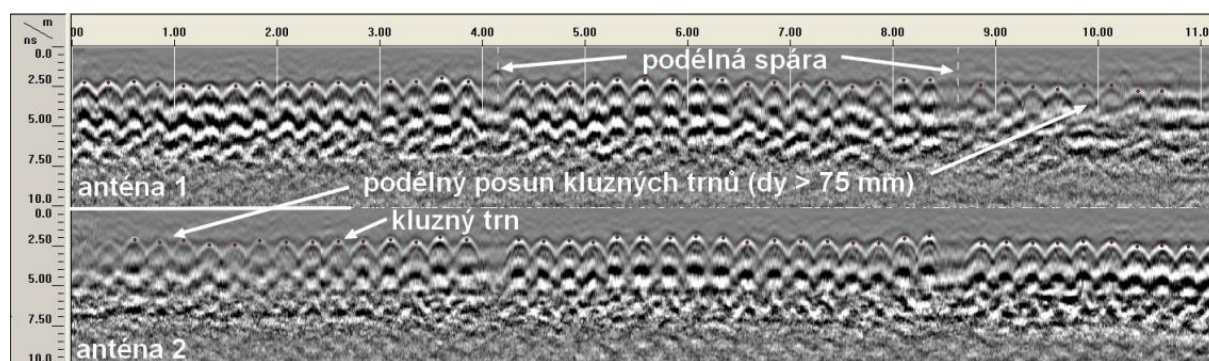
4.8.6 Měření polohy kluzných trnů a kotev in situ

Při měření pomocí dvoukanalového vozíku (metoda uvedena v kap. 4.7) in-situ byla identifikována řada různých anomálií v poloze zabudované výztuže, které jsou popsány dále. Na úvod je nutno zmínit, že měření georadarem, aby bylo dobře interpretovatelné, musí být provedeno alespoň 2 dny po pokládce cementobetonového krytu, jinak je radargram málo čitelný (obr. 100 v pravé horní části).



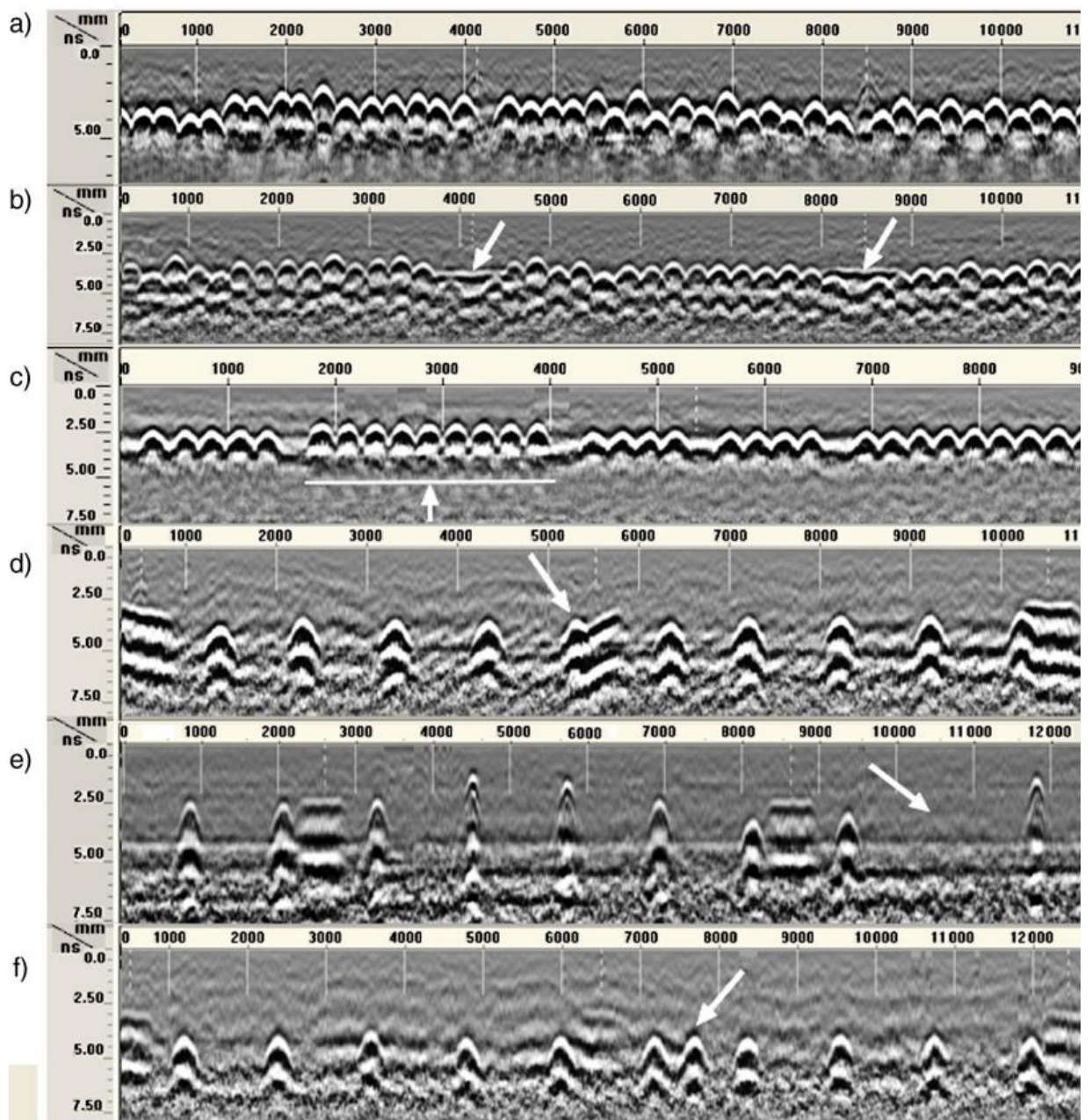
Obr. 100 Radargram z měření polohy kluzných trnů v příčné spáře CB krytu pomocí dvoukan. vozíku záznam z antény vzdálené 175 mm vlevo od spáry (nahore) a antény vzdálené 175 mm vpravo od spáry (dole); dodatečně zřizovaný jízdní pruh ve staničení 7,7 – 10,8 m: měření pravou anténou je provedeno na desce vybetonované před více než 2 dny (vpravo dole), měření levou anténou je provedeno na desce betonované před 1 dnem (vpravo nahore).

V praxi se může stát, že smršťovací spára, která se řeže do zatvrdlého betonu a vytváří jednotlivé desky CB krytu, se nenachází ve správné poloze nad kluznými trny a kotvami a díky tomu dochází k nesplnění požadavků normy na maximální povolený posun výztuže ve směru její podélné osy vzhledem ke spáře. Tento případ dokumentuje obr. 101, kde došlo k tomu, že spára byla nařezána šikmo nad položenými kluznými trny a to se projevilo v záznamu z měření. Některé konce kluzných trnů byly zachyceny jen částečně nebo vůbec.



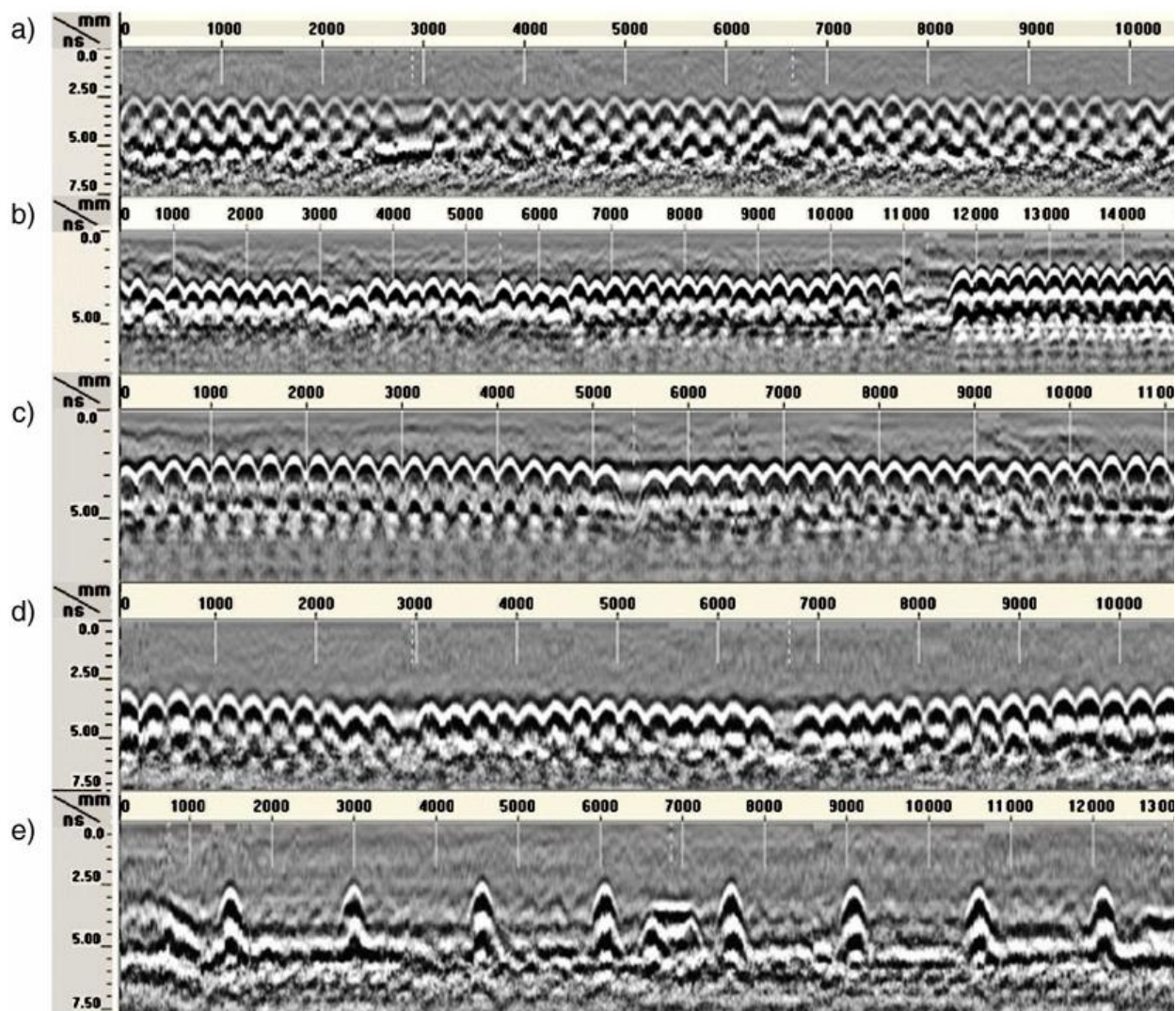
Obr. 101 Radargram z měření polohy kluzných trnů v příčné spáře CB krytu pomocí dvoukan. vozíku záznam z antény vzdálené 175 mm vlevo od spáry (nahore) a antény vzdálené 175 mm vpravo od spáry (dole); na začátku záznamu je vidět podélný posun kluzných trnů d_y směrem doleva a na konci záznamu směrem doprava, a to z důvodu šikmo nařezané spáry nad kluznými trny.

Další možné anomálie v poloze kluzných trnů a kotev v případě smršťovacích spár jsou uvedeny na obr. 102, jde především o variabilitu polohy výztuže ve spáře, zatlačení kluzných trnů kotvami směrem dolů v místě křížení příčné a podélné spáry, anomálie způsobené použitím ocelových košů pro fixaci výztuže v požadované poloze, chybějící a přebývající výztuž apod.



Obr. 102 Radargramy ze smršťovacích spár záznam z jedné antény ve vzdálenosti 175 mm od spáry: a) variabilita polohy kluzných trnů v příčné spáře, b) zatlačení kluzných trnů kotvami směrem dolů v místě křížení příčné a podélné spáry, c) kluzné trny uložené v několika různě rozmístěných ocelových koších, d) kotvy uložené blízko příčné spáry zatlačující kluzné trny směrem dolů, e) variabilita kotev v podélné spáře (různé hloubky a chybějící kotva); f) kotva navíc v podélné spáře.

Speciálním případem spár jsou pracovní spáře, které by měly být v podstatně lepším stavu z hlediska polohy zabudované výztuže než smršťovací spáře, a to z důvodu použití mnohem přesnějších technologií ukládání kluzných trnů a kotev. I zde se ale mohou vyskytnout anomálie způsobené například prohnutím, nebo posunutím dřevěného bednění, které se používá pro poslední příčnou spáru na konci denní betonáže anebo při použití segmentového bednění, které není položeno v jedné rovině (obr. 103). Nejpresněji jsou kluzné trny a kotvy osazeny v pracovní spáře jejich navrtáváním do mladého, avšak zatvrdlého betonu.



Obr. 103 Radargramy z pracovních spár

záznam z jedné antény ve vzdálenosti 175 mm od spáry: a) navrtávané kluzné trny v příčné spáře, b) navrtávané kluzné trny jen v pravém jízdním pruhu, c) kluzné trny vkládané do dřevěného bednění na konci denní betonáže (viditelné prohnutí bednění), d) kluzné trny vkládané do kovového bednění na konci denní betonáže (3 segmenty v různých polohách), e) navrtávané kotvy v podélné spáře.

Z výsledků provedené sady měření vozíkem s dvěma anténami s centrální vysílací frekvencí 1,6 GHz vyplynuly následující závěry: při stanovení polohy kluzných trnů a kotev v terénu lze dosáhnout přesnosti +/- 15 mm v horizontálním směru (na konci úseku délky 11,5 m) a +/- 10 mm ve vertikálním směru (pro kryt tl. 300 mm).

4.9 Uspořádání měření

4.9.1 Laboratorní měření

- 1) Stanovení rychlosti šíření a dielektrické konstanty na laboratorních CB deskách tloušťek 100 mm a 150 mm.
- 2) Stanovení rychlosti šíření a dielektrické konstanty na laboratorní CB desce tloušťky 240 mm se zabudovanými kluznými trny
- 3) Posouzení stanovení rychlosti šíření metodami kalibrace CMP a WARR
- 4) Stanovení rozhraní vrstvy CB desky s podkladní vrstvou vozovky
- 5) Laboratorní stanovení minimální horizontální vzdálenosti kluzných trnů a kotev
- 6) Laboratorní stanovení polohy kluzných trnů zabudovaných ve zkušební CB desce.

4.9.2 Měření in situ

- 1) Srovnávací měření na dálnici D1
- 2) Srovnávací měření v Pelhřimově
- 3) Srovnávací měření georadaru se zařízením MIT-Scan-2 na pracovní spáře
- 4) Srovnávací měření NDT metod na pokusném úseku se zabudovanými kluznými trny a kotvami v areálu firmy Skanska a.s.
- 5) Zkoušky přenosu zatížení na spárách rázovým zařízením FWD a stanovení polohy kluzných trnů na dvou pokusných úsecích
- 6) Měření polohy kluzných trnů následně po betonáži CB krytu
- 7) Měření polohy kluzných trnů s podélným posunem
- 8) Měření polohy kluzných trnů a kotev ve smršťovacích spárách cementobetonového krytu
- 9) Měření polohy kluzných trnů a kotev v pracovních spárách cementobetonového krytu.

5 Výsledky měření

Tato kapitola uvádí zásadní celkové výsledky vlastního měření, vycházející z průběžných výsledků provedených laboratorních, porovnávacích a in situ experimentů (kapitoly 4.4 - 4.8).

5.1 Laboratorní měření

V této kapitole jsou popsány všechna výsledky při zjištění tloušťky CB desek, rychlosti šíření EM signálu, relativní permitivity a polohy kluzných trnů.

A) CB deska tloušťky 100 mm (kap. 4.4.1)

Tloušťka desky byla změřena georadarem při použití dipólových antén o středních frekvencích 1,6 a 2,6 GHz se započítáním vlivu natočení antén, vždy ve třech měřeních pro každou kombinaci. Výsledky jsou hodnoceny souhrnně.

Počet změření: $n = 24$

Průměrný počet odrazů při jednom změření: $o = 530$

Stanovená střední hodnota rychlosti šíření EM signálu CB deskou: $\bar{v} = 0,114 \text{ m/ns}$

Stanovená střední hodnota relativní permitivity prostředí: $\bar{\epsilon}_r = 6,9$

Maximální chyba stanovené tloušťky CB desky: $\max\Delta t = 0,002 \text{ m}$

Relativní odchylka stanovené tloušťky CB desky: $\sigma t = 0,5 \%$

B) CB deska tloušťky 150 mm (kap. 4.4.1)

Tloušťka desky byla změřena georadarem při použití dipólových antén o středních frekvencích 1,6 a 2,6 GHz se započítáním vlivu natočení antén, vždy ve třech měřeních pro každou kombinaci. Výsledky jsou hodnoceny souhrnně.

Počet změření: $n = 24$

Průměrný počet odrazů při jednom změření: $o = 465$

Stanovená střední hodnota rychlosti šíření EM signálu CH deskou: $\bar{v} = 0,114 \text{ m/ns}$

Stanovená střední hodnota relativní permitivity prostředí: $\bar{\epsilon}_r = 7,0$

Maximální chyba stanovení tloušťky CB desky: $\max\Delta t = 0,001 \text{ m}$

Relativní odchylka stanovení tloušťky CB desky: $\sigma t = 0,2 \%$

C) CB deska tloušťky 240 mm (kap. 4.4.2)

Tloušťka desky byla změřena georadarem při použití dipólové antény o střední frekvenci 2,6 GHz. CB deska byla měřena v podélných i příčných profilech.

Sledovaná veličina: tloušťka CB desky: $t = 0,240 \text{ m}$

Počet změření: $n = 34$

Průměrný počet odrazů při jednom změření: $o = 1597$

Stanovená střední hodnota rychlosti šíření EM signálu CH deskou: $\bar{v} = 0,105 \text{ m/ns}$

Stanovená střední hodnota relativní permitivity prostředí: $\bar{\epsilon}_r = 8,2$

Maximální chyba stanovení tloušťky CB desky: $\max\Delta t = 0,008 \text{ m}$

Relativní odchylka stanovení tloušťky CB desky: $\sigma t = 0,4 \%$

D) Posouzení autokalibračními metodami CMP/WARR (kap. 4.4.3)

Průměrná rychlost EM signálu na desce tloušťky 150 mm, vypočtená metodou CMP byla stanovena 0,113 m/ns, tedy mírně nižší, než byla stanovena ze známé tloušťky desky.

E) Stanovení rozhraní vrstvy CB desky s podkladní vrstvou vozovky (kap. 4.5)

Výpočtem hodnot reflexního koeficientu na rozhraní vrstev a porovnáním se stanovenou polaritou amplitudy určenou na rozhraní vrstev byly potvrzeny teoretické předpoklady pro zjištění rozhraní CB desky s podkladní vrstvou.

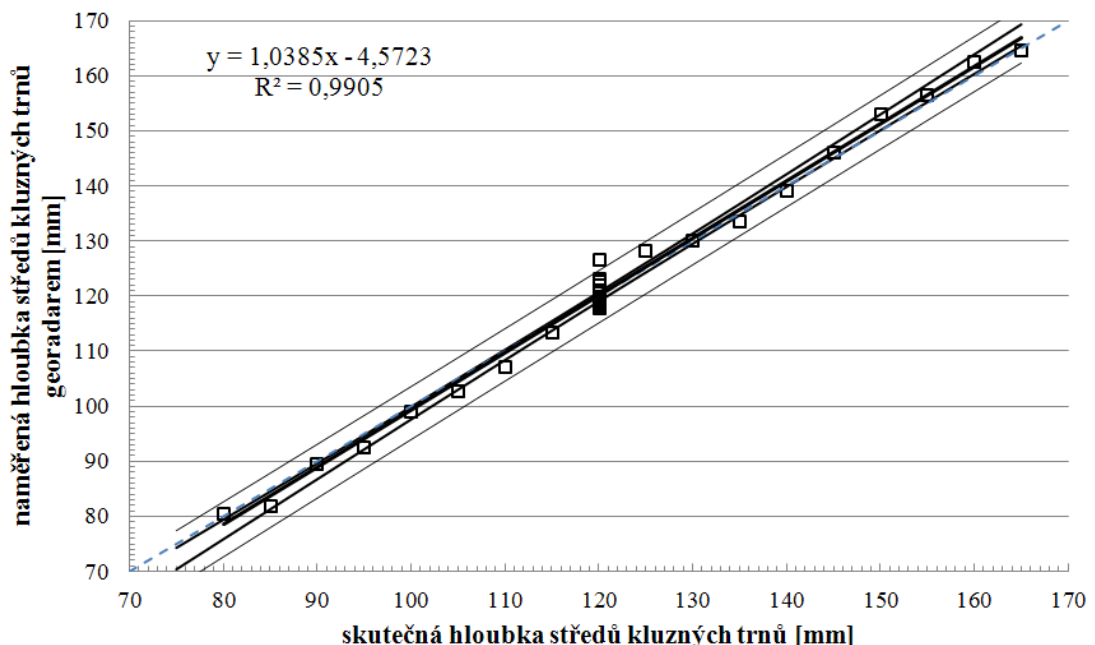
F) Laboratorní stanovení minimální horizontální vzdálenosti kluzných trnů a kotev (kap. 4.6.1)

Pod laboratorní deskou tloušťky 100 mm byly umístěny kluzné trny a kotvy. Postupně byla měněna vzdálenost výztuží s cílem zjistit, jak daleko od sebe mohou být umístěny, aby byly co nejlépe identifikovatelné při interpretaci ve vyhodnoceních georadarem.

Větší rozlišovací schopnost obrysů desky, dna desky a výztuží bylo dosaženo anténou 2,6 GHz. Výrazné rozdíly v zobrazení kluzných trnů a kotev nebyly při vyhodnocení prokázány. Při osové vzdálenosti výztuží 50 a 75 mm došlo při vyhodnocení k celkovému, nebo částečnému splynutí obou výztuží do jedné. Při osové vzdálenosti 100 mm již byly s vysokou přesností určeny vzdálenosti výztuží. Bylo ověřeno, že při vzorkování 200 scans/m byly získány stejné výsledky jako při vzorkování 2000 scans/m. Vyhodnocené odchylky byly srovnatelné pro kluzné trny i kotvy a dosahovaly max. hodnot 3 mm ve vertikálním směru a 5 mm a v horizontálním směru.

G) Laboratorní stanovení polohy kluzných trnů zabudovaných ve zkušební CB desce (kap. 4.6.2)

Pro tento experiment byla použita vyrobená CB deska tloušťky 240 mm, do které byly uloženy tři kluzné trny. Pro vyhodnocení polohy kluzných trnů byly použity vztahy pro výpočet vrcholů hyperbol, proložením naměřených hodnot pomocí metody nejmenších čtverců. Zjištěná poloha kluzných trnů z měření georadarem byla srovnána s jejich skutečnou polohou. Bylo dosaženo vysokých přesnosti a to bylo dáno tím, že šlo o známou konstantní tloušťku desky vyrobené z homogenního betonu a měření probíhala v délkových vzdálenostech max. 1 m. Dále se potvrdilo, že při měření v blízkosti konců kluzných trnů dochází ke zkreslení (hyperbola je méně viditelná a dochází ke snížení přesnosti měření). Hloubky středů kluzných trnů (KT) zjištěné georadarem jsou porovnány se skutečnými hloubkami středů na obr. 104 (metoda je uvedena v kap. 4.2.1.4).



Obr. 104 Funkční závislost skutečných hloubek trnů a laboratorně stanovených hloubek georadarem

Z intervalových odhadů střední funkční hodnoty, resp. individuálních funkčních hodnot je konstruován pás spolehlivosti pro střední hodnotu (konfidenční pás), resp. pás spolehlivosti pro individuální hodnoty (predikční pás) se spolehlivostí 0,95. Zjišťujeme tak, s jakou přesností byly stanoveny hloubky kluzných trnů georadarem v laboratorních podmínkách.

5.2 Měření in situ

A) Srovnávací měření na dálnici D1 (kap. 4.8.1)

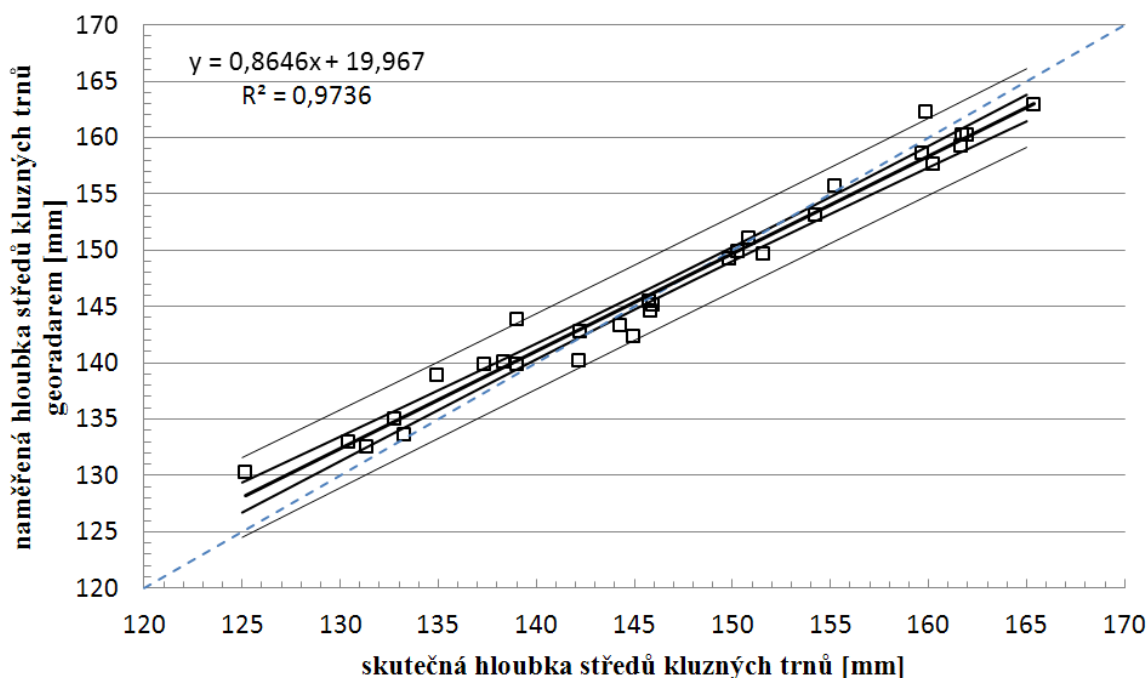
První zjednodušené srovnávací měření georadarem v ČR v rámci měření polohy kluzných trnů v cementobetonovém krytu dálnice organizovalo Ředitelství silnic a dálnic. Měření jsem se zúčastnil spolu s dalšími dvěma firmami měřící georadarem. Účelem bylo ověření přesnosti této metody při zjišťování polohy těchto prvků. Kalibraci rychlosti šíření signálu v betonu si určila každá společnost podle jejich zkušeností, nebyla jednoznačně daná známá hloubková vzdálenost, podle které by se pro každé zařízení nakalibrovala rychlost šíření EM signálu.

Různé interpretace rychlosti šíření EM signálu měly za následek posunutí průběhu hloubek kluzných trnů. Po úpravě rychlostí šíření všech GPR jsme došli k velmi podobným interpretacím při stanovení hloubek. Přesto byla georadarová metoda zpochybněna a opublikována s tvrzením, že přesnost metody je zatím nedostačující k tomu, aby byla georadarová měření použita pro přijímací (průkazní) zkoušky.

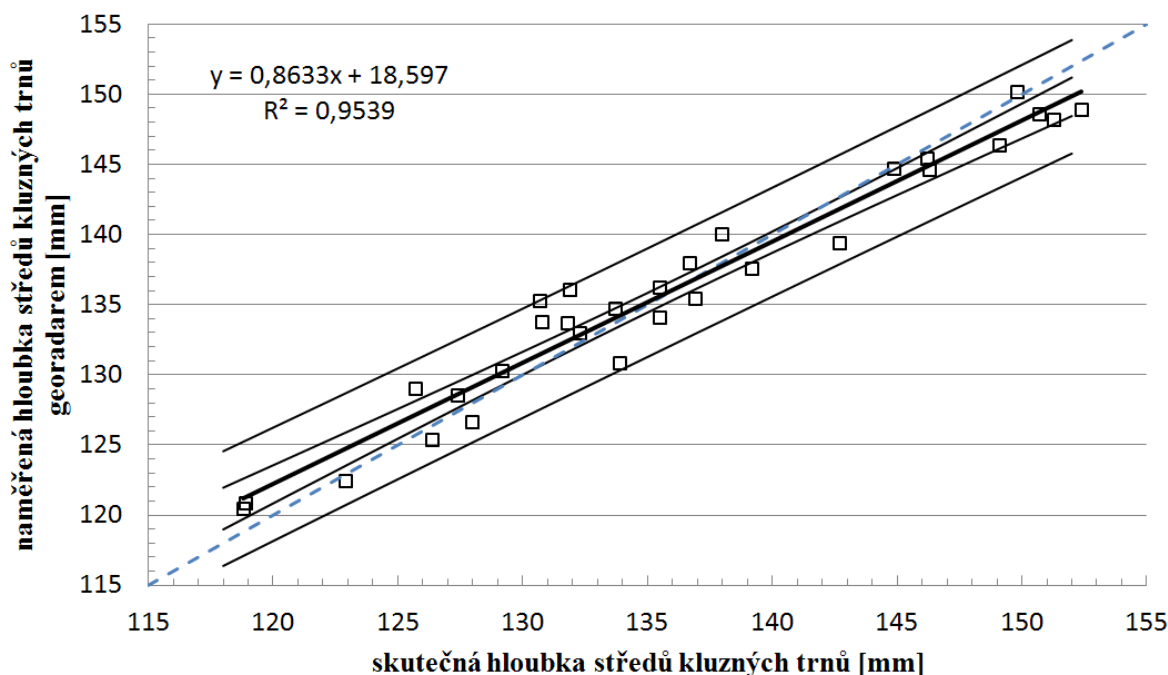
B) Srovnávací měření v Pelhřimově (kap. 4.8.2)

V pořadí druhé srovnávací měření polohy kluzných trnů, kterého jsem se zúčastnil spolu s další firmou měřící georadarem. Kluzné trny byly uloženy do cementobetonového krytu finišerem. Po dodání výsledků georadaru bylo provedeno destruktivní změření polohy tak, že z CB desky byl vyřezán a vyjmut trámec obsahující 30 kluzných trnů.

Metody stanovení polohy kluzných trnů georadarem jsou uvedeny v kap. 4.8.2. Stanovené polohy kluzných trnů (KT) byly podobně jako v laboratorním stanovení polohy kluzných trnů (metoda je uvedena v kap. 4.2.1.4) porovnány se skutečně zjištěnými hloubkami na stěnách vyjmutého tránce (obr. 105 a 106).



Obr. 105 Funkční závislost skutečných hloubek trnů v linii +0,2 a stanovených hloubek georadarem



Obr. 106 Funkční závislost skutečných hloubek trnů v linii -0,2 a stanovených hloubek georadarem

Z výsledků srovnávacího měření lze tvrdit, že pokud stanovíme správně rychlost šíření EM signálu, můžeme očekávat velmi dobré výsledky.

C) Srovnávací měření georadaru se zařízením MIT-Scan-2 na pracovní spáře (kap. 4.8.3)

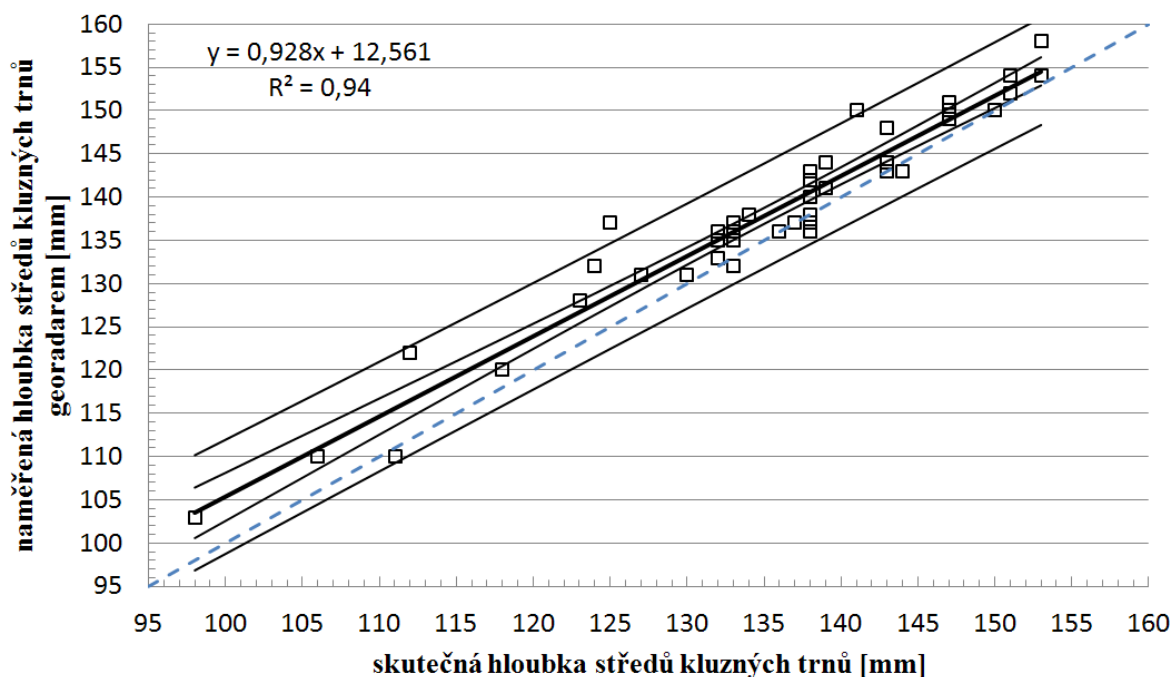
Do výsledků měření in situ je zahrnuto také porovnání dvou nedestruktivních metod měřících polohu kluzných trnů, které bylo v ČR provedeno poprvé na pracovní spáře, ve které se předpokládá správná poloha kluzných trnů. Měření jsem se zúčastnil spolu s druhou firmou měřící zařízením MIT scan. Výsledky obou nedestruktivních metod ukázaly podobný průběh hloubek kluzných trnů. Můžeme tedy uvést, že se tyto metody v průběhu stanovení hloubek kluzných trnů shodují, ale vertikálně nebyly uloženy ve stejné hloubce. Správnost metod zde nebyla ověřena. Při stanovení vertikálních a horizontálních odchylek kluzných trnů jsou výsledky velmi rozdílné a lze tvrdit, že mezi výsledky není žádná závislost.

D) Srovnávací měření NDT metod na pokusném úseku se zabudovanými kluznými trny a kotvami v areálu firmy Skanska a.s. (kap. 4.8.4)

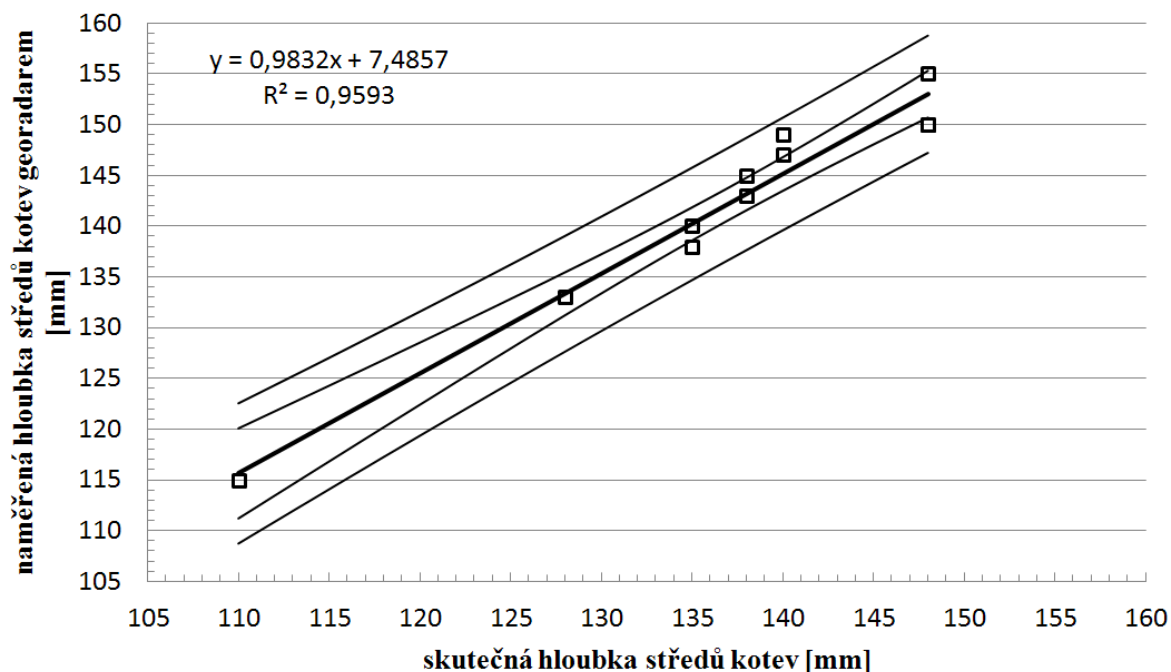
Pro správnost měření polohy kluzných trnů a kotev byl vybudován zkušební úsek délky cca 28 m. Výztužné prvky zde byly osazeny do navrtaných otvorů do vybetonované pravé poloviny betonového krytu vozovky v extrémních posunech a vychýleních oproti požadované (středové) poloze. Skutečná poloha prvků byla přesně zaměřena akreditovanou laboratoří před betonáží levé poloviny betonového krytu vozovky. Uprostřed zkušební spáry byla ručně změřena výška betonu. Na základě této informace mělo být provedeno měření georadarem nad tímto místem a provedena kalibrace (stanovení rychlosti šíření elektromagnetického signálu deskou CB krytu). Měření polohy kluzných trnů a kotev jsem se zúčastnil spolu s další firmou měřící georadarem a firmou měřící zařízením MIT scan.

Extrémní polohy výztužných prvků měly zásadní vliv na vyhodnocování naměřených hodnot pomocí zařízení MIT-scan. Ukázalo se, že přístroj (software) není na takto extrémní odchylky připraven a ve výsledcích nebylo vyhodnoceno 8 z celkového počtu 42 kluzných trnů a 5 z celkového počtu 11 kotev v extrémních polohách. Hloubky KT a kotev zjištěné GPR byly

podobně jako v předchozích hodnoceních porovnány se skutečně zjištěnými hloubkami (obr. 107 a 108).



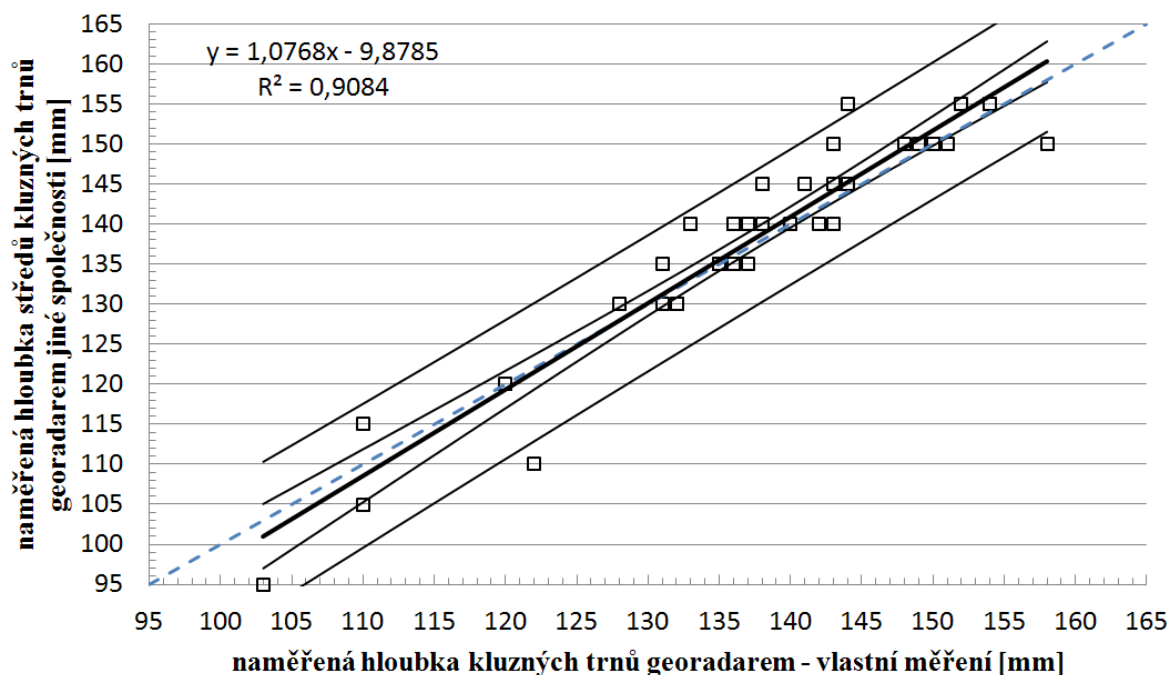
Obr. 107 Funkční závislost skutečných hloubek kluzných trnů a stanovených hloubek KT georadarem



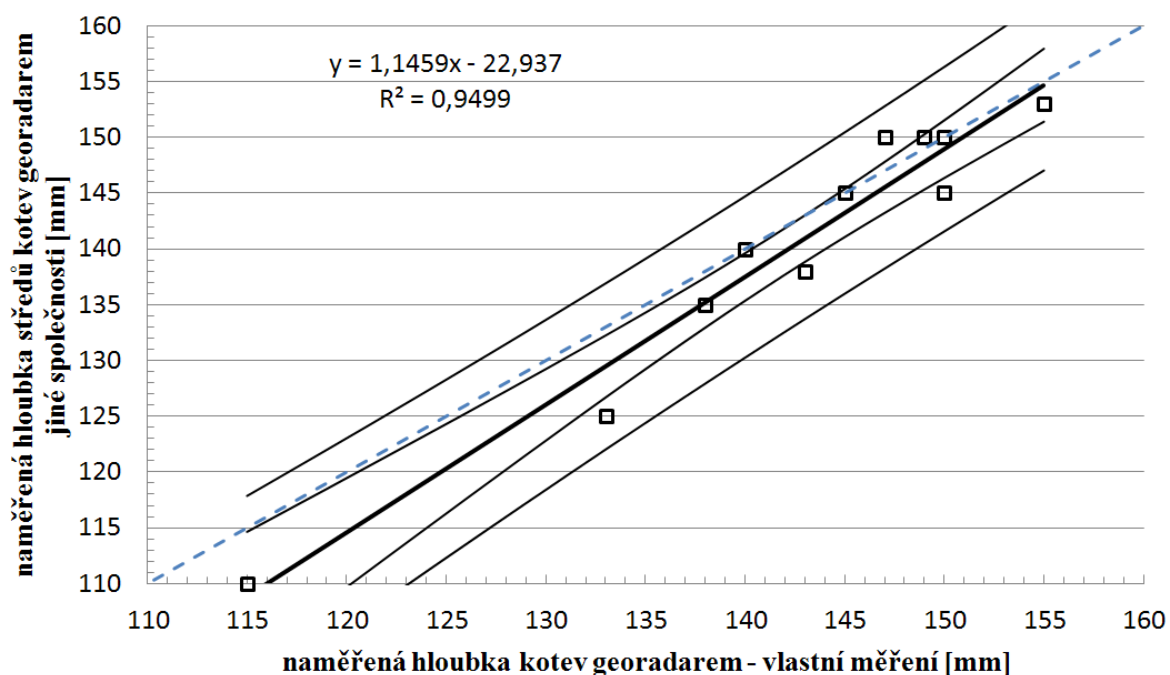
Obr. 108 Funkční závislost skutečných hloubek kotev a stanovených hloubek kotev georadarem

Všeobecně lze předpokládat, že tyto výsledky budou přinejmenším dosažitelné i na reálné stavbě. Velký význam mělo porovnání tří nedestruktivních metod (MIT scan a 2 x georadar) s přímým změřením akreditovanou zkušební laboratoří.

Hloubky KT a kotev zjištěné vlastním georadarem a georadarem jiné společnosti byly porovnány podobně jako v předchozích hodnoceních (obr. 109 a 110).



Obr. 109 Funkční závislost hloubek kluzných trnů stanovených georadary



Obr. 110 Funkční závislost hloubek kotev stanovených georadary

Výsledky porovnání stanovených hloubek trnů a kotev georadary jsou také velice dobré, avšak těsnější závislost je v předchozích porovnáních (obr. 104-108).

E) Zkoušky přenosu zatížení na spárách rázovým zařízením FWD a stanovení polohy kluzných trnů na dvou pokusných úsecích (kap. 4.8.5)

V roce 2012 byly vybrány 2 pokusné úseky, na kterých se přednostně provádělo měření přenosu zatížení na spárách rázovým zařízením. Na těchto úsecích jsem provedl měření polohy kluzných trnů georadarem.

Spolupůsobení desek bylo vyhodnoceno podíly průhybů geofonu na nezatížené hraně desky ve vzdálenosti 300 mm od středu zatěžovací desky a geofonu na zatížené hraně desky ve vzdálenosti 200 mm od středu zatěžovací desky vyvolaných při zkoušce rázovým zařízením FWD. Na rychlostní silnici R1 se spolupůsobení pohybovalo v rozmezí 0,79 až 0,86 a na dálnici D1 se spolupůsobení pohybovalo v rozmezí 0,67 až 0,87. Příčiny nízkých hodnot spolupůsobení nebyly jednoznačně zjištěny.

Georadarová měření umístění kluzných trnů se prováděla na všech měřených příčných hranách a jednoznačně neprokázala v místech nízkých hodnot spolupůsobení anomálie v uložení kluzných trnů. Výsledky z georadaru ukazují, že poloha kluzných trnů je odlišná od správné polohy zejména v horizontálních posunech a natočeních.

F) Měření polohy kluzných trnů a kotev in situ (kap. 4.8.6)

Při měření pomocí dvoukanalového vozíku in-situ byla identifikována řada různých anomálií v poloze zabudované výztuže. Nejdříve je nutno zmínit, že měření georadarem, aby bylo dobře interpretovatelné, musí být provedeno alespoň 2 dny po pokládce cementobetonového krytu, jinak je záznam z měření málo čitelný.

V praxi se může stát, že smršťovací spára, která se řeže do zatvrdlého betonu a vytváří jednotlivé desky CB krytu, se nenachází ve správné poloze nad kluznými trny a kotvami. Tato skutečnost se projevila v záznamu z měření. Některé konce kluzných trnů byly zachyceny jen částečně nebo vůbec.

Další možné anomálie v poloze kluzných trnů a kotev v případě smršťovacích spár byly v záznamech ukázány. Jedná se například o variabilitu polohy výztuže ve spáře, zatlačení kluzných trnů kotvami směrem dolů v místě křížení příčné a podélné spáry, anomálie způsobené použitím ocelových košů pro fixaci výztuže v požadované poloze, chybějící a přebývající výztuž apod.

Speciálním případem spár jsou pracovní spáry, které by měly být v podstatně lepším stavu z hlediska polohy zabudované výztuže než smršťovací spáry, a to z důvodu použití mnohem přesnějších technologií ukládání kluzných trnů a kotev. I zde se ale mohou vyskytnout anomálie způsobené například prohnutím, nebo posunutím dřevěného bednění, které se používá pro poslední příčnou spáru na konci denní betonáže anebo při použití segmentového bednění, které není položeno v jedné rovině. Bylo zjištěno, že nejpřesněji jsou kluzné trny a kotvy osazeny v pracovní spáře jejich navrtáváním do zatvrdlého betonu a v případě měření georadarem in situ jsou hloubky těchto výztužných prvků jednou z možností jak stanovit rychlost šíření EM signálu.

G) Souhrnné výsledky

Souhrnné výsledky rychlostí šíření EM signálu a relativní permitivity cementobetonových prvků zjištěných při laboratorních experimentech, srovnávacích měřeních a měřeních in situ georadarem jsou uvedené v tabulce č. 47. V tabulce je uveden také způsob zjištění sledované rychlosti šíření.

Tabulka č. 48 uvádí limity přesnosti určení přesné polohy kluzného trnu nebo kotvy při použití georadaru. Do tohoto souhrnného vyhodnocení byly započítány výsledky laboratorního experimentu se třemi zabudovanými kluznými trny a výsledky ze dvou měření in situ na pokusných úsecích v rámci srovnávacích měření, z nichž první pokusný úsek byl vyroben technologií pokládky finišerem a druhý byl vyroben postupnou betonáží s osazením kluzných trnů a kotev do extrémních poloh.

Tab. 47 Souhrnné výsledky stanovení rychlosti šíření EM signálu a relativní permitivity všech realizovaných měření

Soubor měření	Počet změřeni	Způsob zjištění	Rychlost šíření [m/ns]	Relativní permitivita
CB deska tl. 100 mm	24x530	TD	0,114	6,91
CB deska tl. 150 mm	24x465	TD	0,114	6,94
CB deska tl. 150 mm	6x5	CMP/WARR	0,113	7,03
CB deska tl. 240 mm	34x965	TD	0,105	8,19
PÚ Pelhřimov	24x2	HV	0,094	10,10
PÚ Pelhřimov	1x2	CMP	0,101	8,86
PÚ Staré Město	1x3	JV	0,101	8,81
PÚ Kroměříž	75x2	PHV	0,099	9,07
PÚ Praha	53x2	PHV	0,099	9,07
dálniční úsek č. 1	2x40	PS	0,100	8,90
dálniční úsek č. 2	2x2	JV-V	0,100	8,92
dálniční úsek č. 3	4x43	PS	0,097	9,44
dálniční úsek č. 4	3x2	JV	0,097	9,47
dálniční úsek č. 5	2x42	PS	0,095	9,93
dálniční úsek č. 6	2x38	PS	0,091	10,80
dálniční úsek č. 7	2x10	HV	0,085	12,52
dálniční úsek č. 8	1x2	JV	0,100	8,92
dálniční úsek č. 9	4x43	PS	0,097	9,46

TD ...známá tloušťka laboratorní CB desky
 CMP/WARR ...autokalibrační metoda CMP/WARR
 HV ...přímé změření hloubky výztuže
 JV ...jádrový vývrt

JV-V ...jádrový vývrt kluzným trnem
 PHV ...předpokládaná hloubka výztuže
 PS ... poloha výztuže v pracovní spáře

Tab. 48 Souhrnné výsledky polohy kluzných trnů realizovaných měření

	Parametr měření	Počet změřeni	Rozdíly GPR od skutečných [mm]:			
			max.	prům.	sm. odch.	
laboratorní CB deska tl. 240 mm	hloubka KT:	21	4	1	1	
	horizontální poloha:	21	7	2	2	
	<i>hloubka uložení KT: 105-140 mm</i>					
	<i>horizontální vzdálenost GPR přejezdu: 550 mm</i>					
pokusný úsek Pelhřimov CB kryt tl. 250 mm	hloubka KT:	60	4	0	2	
	vertikální rozdíly konců KT:	30	6	1	3	
	<i>hloubka uložení KT: 106-153 mm</i>					
	<i>horizontální vzdálenost GPR přejezdu: 8000 mm</i>					
<i>vertikální vzdálenost konců KT: 0-23 mm</i>						
pokusný úsek Staré Město CB kryt tl. 300 mm	hloubka KT:	42	12	3	3	
	hloubka kotev:	11	9	5	2	
	vertikální rozdíly konců KT:	42	16	8	3	
	vertikální rozdíly konců kotev:	11	23	9	7	
	horizontální rozdíly konců KT:	42	20	9	5	
	horizontální rozdíly konců kotev:	11	24	8	8	
	<i>hloubka uložení KT: 98-153 mm</i>					
	<i>hloubka uložení kotev: 110-148 mm</i>					
<i>horizontální vzdálenost GPR přejezdu: 28000 mm</i>						
<i>vertikální vzdálenost konců KT: 0-80 mm a konců kotev: 0-122 mm</i>						

6 Diskuse výsledků

Výsledky laboratorních měření prokázaly vysoké přesnosti při stanovení polohy kluzných trnů a kotev a to bylo dáno tím, že šlo o známé konstantní tloušťky desek, vyrobených z homogenního betonu a měření probíhala v délkových vzdálenostech max. 1 m. Dále se potvrdilo, že při měření v blízkosti konců kluzných trnů dochází ke snížení přesnosti měření.

Výsledky srovnávacích měření dosáhly také vysokých přesností a to i pro extrémní polohy kluzných trnů a kotev. Všeobecně lze předpokládat, že tyto výsledky budou přinejmenším dosažitelné i na reálné stavbě.

Na zkouškách in-situ byly prezentovány možné anomálie vzniklé z různých důvodů při pokládce cementobetonového krytu vozovky a možnosti identifikování těchto anomálií a jejich příčin georadarem. Z výsledků provedených sady měření vozíkem s dvěma anténami s centrální vysílací frekvencí 1,6 GHz vyplynuly závěry, že při stanovení polohy kluzných trnů a kotev v terénu lze dosáhnout přesnosti +/- 15 mm v horizontálním směru (na konci úseku délky 11,5 m) a +/- 10 mm ve vertikálním směru (pro kryt tl. 300 mm). Ve výsledcích měření je uveden přehled všech zjištěných rychlostí šíření EM signálu a relativních permitivit, které jsou klíčové pro přesnosti stanovení polohy kluzných trnů a kotev ve vertikálním směru georadarem a vychází ze správného určení rozhraní CB krytu a podkladní vrstvy. Rychlosti šíření se pohybovaly v intervalu od 0,085 m/ns do 0,114 m/ns. Relativní permitivita materiálů CB krytů se pohybovaly v rozmezí od 6,9 do 12,5. Intervalové hodnoty uváděné v předpisech jsou benevolentnější.

V laboratorních a in situ měřeních rozhraní CB desky s podkladní vrstvou georadarem, byla vždy zjištěna změna polarity amplitudy (EM signál se šířil prostředím s vyšší relativní permitivitou do prostředí s nižší relativní permitivitou).

V porovnávacích experimentech a in situ měřeních byly nad rámec řešení disertační práce hodnoceny výsledky jiných nedestruktivních zařízení, které měřily stejný parametr jako georadar (MIT-Scan, GPR jiné společnosti), anebo byly kombinovány s georadarem (rázové zařízení FWD).

6.1 Interpretace výsledků

6.1.1 Poloha kluzných trnů v cementobetonovém krytu

Interpretaci výsledků ze stanovení polohy kluzných trnů jsou rozděleny na tyto části:

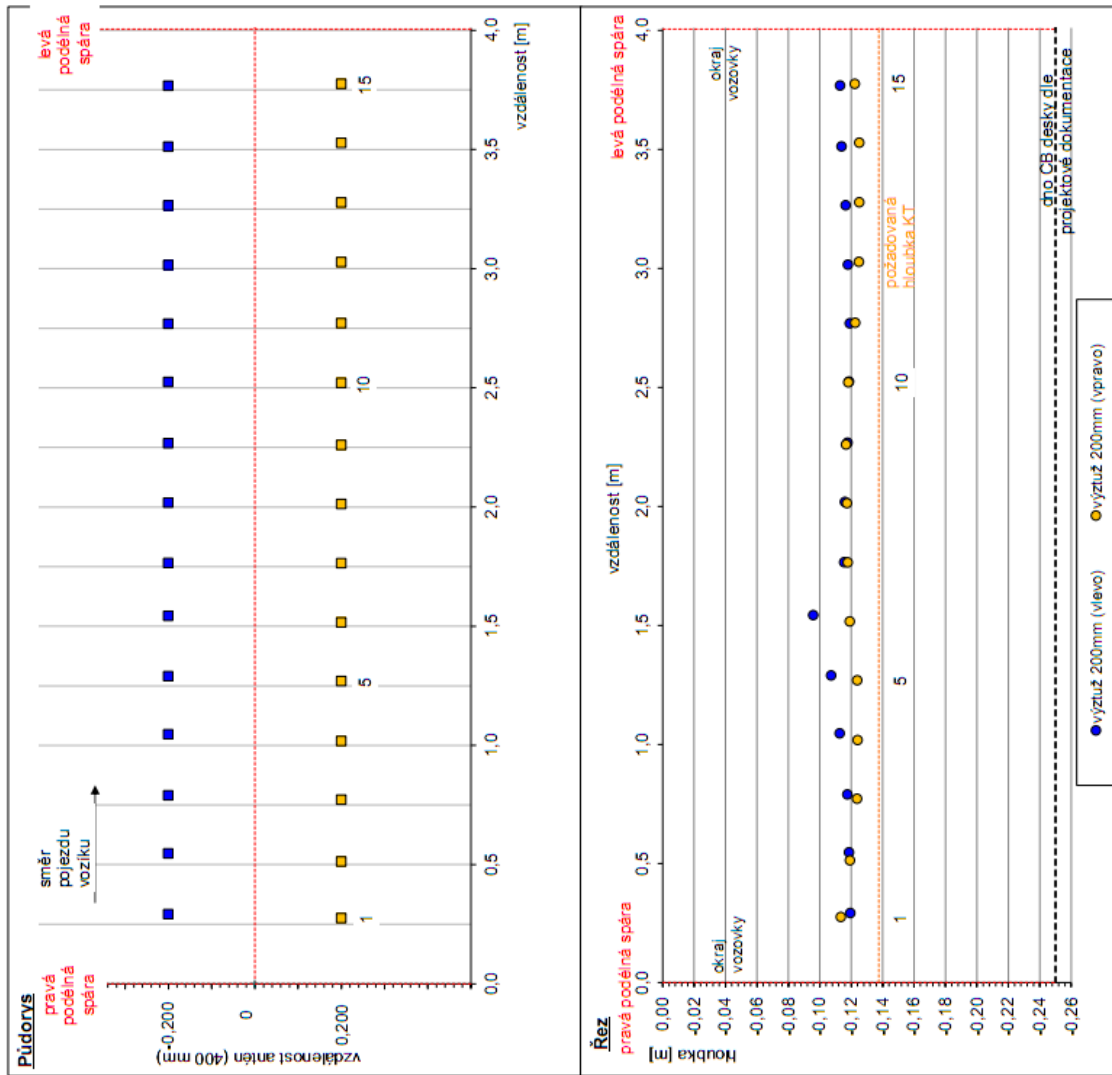
- grafická část – půdorysné zobrazení polohy kluzných trnů ve vzdálenosti +/-200 mm od příčné spáry (obr. 109 vlevo nahoře),
- grafická část – řez kluznými trny pro obě polohy +/-200 mm od příčné spáry (obr. 109 vlevo dole),
- tabulková část obsahující všechny sledované výstupní parametry polohy kluzných trnů a statistické vyhodnocení včetně popisu zkratk uvedených v tabulce (obr. 109 vlevo nahoře),
- mez odchylky od projektové dokumentace – pro vertikální i horizontální směr jsou uvedeny celkové chyby určené z tolerance dle normy (kapitola 2.2.7) a stanovené chyby georadaru – pokud některá z hodnot v tabulce přesáhne tyto celkové chyby, pak u těchto hodnot dochází k červenému zbarvení a znamenají nesplnění normových požadavků (obr. 109 vlevo).

6.1.2 Poloha kotev v cementobetonovém krytu

Interpretaci výsledků ze stanovení polohy kotev jsou rozděleny na tyto části:

- grafická část – půdorysné zobrazení polohy kotev ve vzdálenosti +/-200 mm od podélné spáry (obr. 110 vlevo nahoře),
- grafická část – řez kotvami pro obě polohy +/-200 mm od podélné spáry (obr. 110 vlevo dole),
- tabulková část obsahující všechny sledované výstupní parametry polohy kotev a statistické vyhodnocení včetně popisu zkratk uvedených v tabulce (obr. 110 vlevo nahoře),
- mez odchylky od projektové dokumentace – pro vertikální i horizontální směr jsou uvedené celkové chyby určené z tolerance dle normy (kapitola 2.2.7) a stanovené chyby georadaru – pokud některá z hodnot v tabulce přesáhne tyto celkové chyby, pak u těchto hodnot dochází k červenému zbarvení a znamenají nesplnění normových požadavků (obr. 110 vlevo).

Příčná spára D12



Houbka uložení kluzných trnů v místě příčné spáry (k ose KT)

min. houbka 107,4 mm
 max. houbka 121,4 mm
 průměrná houbka 117,7 mm
 požadovaná houbka 137,5 mm

Podrobný výpis

Číslo KT	Staničení středu KT [m]	Houbka střed	Houbka -200	Houbka 200	VR	HR	PP
1	0,284	119	119	113	-8	-21	< 75 mm
2	0,531	119	119	119	1	-42	< 75 mm
3	0,762	121	118	124	8	-22	< 75 mm
4	1,033	118	113	124	14	-35	< 75 mm
5	1,281	115	107	124	21	-26	< 75 mm
6	1,531	107	96	119	29	-34	< 75 mm
7	1,766	117	115	118	3	-1	< 75 mm
8	2,017	117	116	117	2	-7	< 75 mm
9	2,265	117	118	117	-1	-9	< 75 mm
10	2,523	118	119	118	-1	-5	< 75 mm
11	2,771	121	119	122	4	3	< 75 mm
12	3,022	121	118	125	9	15	< 75 mm
13	3,272	121	116	125	11	16	< 75 mm
14	3,521	119	114	125	14	20	< 75 mm
15	3,772	118	113	122	12	9	< 75 mm

Hi. střed - Houbka KT ve spáře [mm]

Hi. -200 - Houbka KT ve vzdálenosti 200 mm vlevo od příčné spáry [mm]

Hi. 200 - Houbka KT ve vzdálenosti 200 mm vpravo od příčné spáry [mm]

VR - Vertikální rozdíl konců KT [mm]

HR - Horizontální rozdíl konců KT [mm]

PP - Podélný posun KT

červeně jsou vyznačeny odchylky od projektové dokumentace větší než:

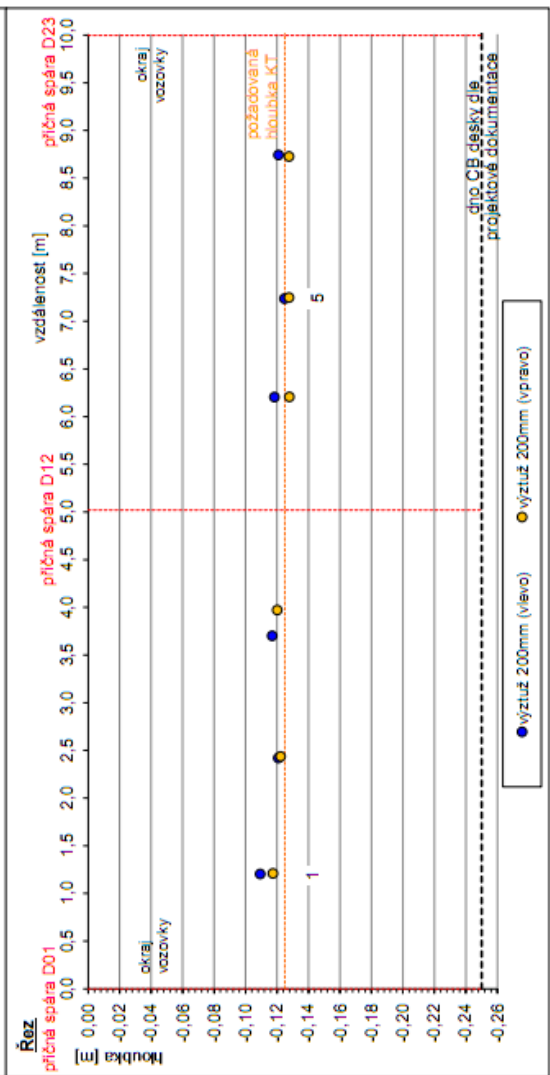
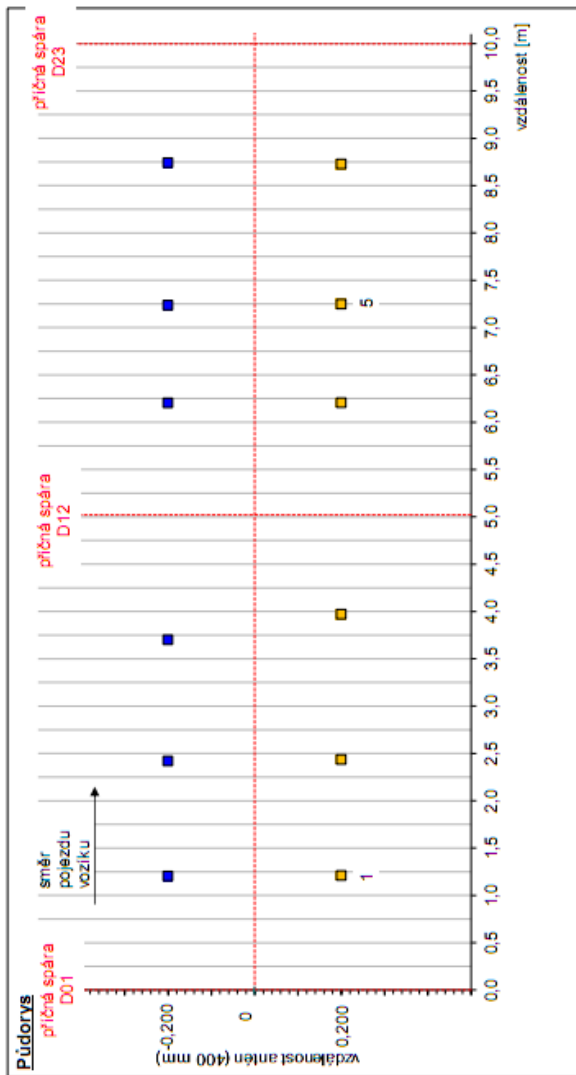
norma chyba GPR
 +/-20 +/-10
 +/-20 +/-15

vertikální směr
 horizontální směr

celkové
 +/-30 mm
 +/-35 mm

Obr. 111 Interpretace při stanovení polohy kluzných trnů

Pravá podélná spára D5-6



Hloubka uložení kotvy v místě podélné spáry (k ose kotvy)

min. hloubka 110,3 mm
 max. hloubka 125,1 mm
 průměrná hloubka 119,2 mm
 požadovaná hloubka 125,0 mm

Podrobný výpis

Číslo kotvy	Staničení síťedu K [m]	Hloubka střed	Hloubka -200	Hloubka 200	VR	HR	PP
1	1,208	110	109	117	10	8	< 75 mm
2	2,423	121	121	122	2	20	< 75 mm
3	3,738	117	117	120	4	339	< 75 mm
4	6,205	120	118	128	12	3	< 75 mm
5	7,239	125	125	128	4	14	< 75 mm
6	8,741	122	121	128	8	-17	< 75 mm

HL střed - Hloubka kotvy ve spáře [mm]
 HL -200 - Hloubka kotvy ve vzdálenosti 200 mm vlevo od příčné spáry [mm]
 HL 200 - Hloubka kotvy ve vzdálenosti 200 mm vpravo od příčné spáry [mm]
 VR - Vertikální rozdíl konců kotvy [mm]
 HR - Horizontální rozdíl kotvy KT [mm]
 PP - Podélný posun kotvy

Červeně jsou vyznačeny odchylky od projektové dokumentace větší než:

vertikální směr norma chyba GPR celkové
 +/-20 +/-10 +/-30 mm
 horizontální směr +/-20 +/-15 +/-35 mm

Obr. 112 Interpretace při stanovení polohy kotev

6.2 Použitelnost výsledků z hlediska přesností použitých metod

Na přesnost měření a následného vyhodnocení mají vliv následující skutečnosti:

Horizontální směr:

- přesnost stanovení začátku měření,
- velikost celkové ujeté dráhy,
- přesnost zařízení použitého pro měření ujeté vzdálenosti,
- přesnost stanovení místa výskytu při vyhodnocení naměřených dat z radarového záznamu (v našem případě polohy kluzných trnů a kotev).

Vertikální směr:

- správnost stanovení rychlosti šíření EM signálu zkoumaným prostředím,
- homogenita vrstev zkoumaného prostředí,
- frekvence použité antény,
- přesnost stanovení místa výskytu při vyhodnocení naměřených dat z radarového záznamu (v našem případě polohy kluzných trnů a kotev).

Stanovení počtu kluzných trnů a kotev v CB krytu by neměl být problém, pokud je radarový záznam čitelný a zkoušený úsek je alespoň 2 dny po pokládce krytu, aby byl beton zatvrdlý.

Přesnost měření georadarem v horizontálním směru je ovlivněna především stanovením počátku měření a délkou ujeté dráhy, která je v případě příčných spár na dálnici obvykle 11,5 m. Důležité je především identifikovat vzdálenost kluzných trnů a kotev mezi sebou a od hran desek CB krytu, což je možné, protože v radarovém záznamu jsou viditelné i podélné a příčné spáry.

Pro přesnost měření georadarem ve vertikálním směru je klíčové stanovení rychlosti šíření elektromagnetického (EM) signálu zkoumaným prostředím. K tomu účelu je ideální změřeni polohy alespoň jednoho kluzného trnu nebo kotvy v pracovní spáře při pokládce krytu nebo následné provedení kontrolního vývrtnu. Existují i jiné způsoby (např. metoda CMP nebo WARR), ale ty jsou náročnější na provedení a vyhodnocení a nedosahují takovou přesnost jako přímé změřeni.

Zvýšení přesnosti při stanovení vychýlení konců výztuže vůči sobě v horizontálním a vertikálním směru umožňuje použití měřicího vozíku se dvěma anténami, které v rámci jednoho přejezdu (jednoho záznamu ujeté vzdálenosti) umožní záznam z měření napravo a nalevo od spáry.

Další zpřesnění lze provést vícero přejezdy nad kluznými trny a kotvami v určitých vzdálenostech, z jejichž vyhodnocení lze zkontrolovat přesnost stanovení polohy kluzných trnů tak, že se vyhodnotí, jak moc se takto stanovené body drží v jedné linii. Tímto způsobem lze také zpřesnit stanovení posunu kluzných trnů a kotev v podélném směru.

Z našich měření vyplývá, že lze při stanovení polohy kluzných trnů a kotev v terénu dosáhnout přesnosti +/- 15 mm v horizontálním směru (na konci úseku délky 11,5 m) a +/- 10 mm ve vertikálním směru (pro kryt tl. 300 mm).

O uváděné hodnoty přesnosti měření musí být rozšířeny normou stanovené limity pro polohu zabudovaných kluzných trnů.

6.3 Dopad výsledků do praxe

Hlavní výhodou použití georadarové metody na liniových stavbách je především v tom, že dokáže poskytnout **kontinuální informaci o zkoumaném prostředí** a na základě těchto výsledků se dají nasměrovat kontrolní vývrty a další kontroly do míst, kde dochází ke změnám v konstrukčním uspořádání, vyskytují se nehomogenity apod.

Georadar je jednou z mála možností jak ve větším měřítku provádět kontrolu polohy zabudovaných kluzných trnů a kotev s identifikací:

- počtu výztuží,
- vzdáleností mezi výztužemi v horizontálním směru a především dodržení minimální vzdálenosti výztuže od spár a hran desek,
- vychýlení konců výztuže,
- posunů výztuže v podélném směru, např. v případě nesprávně nařezaných smršťovacích spár,
- polohy výztuží ve vertikálním směru s dostatečnou přesností, v případě správného nastavení rychlosti šíření EM signálu.

7 Závěr

Předkládaná disertační práce otevřela téma výzkumu v oblasti uplatnění georadaru v silniční diagnostice. Byly zjištěny limity přesnosti určení přesné polohy kluzného trnu nebo kotvy, byla navržena metodika jak provádět a vyhodnocovat měření a interpretovat výsledky zjištěné polohy kluzných trnů.

Rozsáhle jsou zpracována realizovaná laboratorní a porovnávací měření, při kterých bylo dosahováno vysokých přesností detekce kluzných trnů a kotev. Výsledky georadarových měření jsou podrobeny analýze z hlediska korelačního vztahu se skutečnými hodnotami zjištěnými laboratorně a in situ.

Bylo navrženo a realizováno zařízení, kterým lze provádět nedestruktivně měření polohy kluzných trnů.

Na zkouškách in-situ jsou prezentovány možné anomálie vzniklé z různých důvodů při pokládce cementobetonového krytu vozovky a možnosti identifikování těchto anomálií a jejich příčin georadarem.

Práce také konfrontuje použití georadaru v diagnostice vozovek pozemních komunikací s jinými metodami (zejména s metodou MIT Scan), ověřuje výsledky jádrovými vývrty a ukazuje možné kombinace s rázovým zařízením FWD.

Výzkum provedený v rámci této disertační práce vytváří jeden komplex s výzkumným projektem řešeným v Centru dopravního výzkumu, v. v. i. (CDV), který zkoumá vliv míry nesprávného uložení výztužného prvku na kvalitu výsledného díla a mechanismy, které se přitom uplatňují.

Na základě výsledků této disertační práce v kombinaci s výsledky zmíněného projektu CDV bude možno při převjímacích zkouškách nových či rekonstruovaných úseků dálnic spolehlivě identifikovat místa, kde lze očekávat problémy vlivem skryté vady, tzn., nesprávně uloženého výztužného prvku.

Nové poznatky a výsledky začínající COST akce a probíhajícího národního projektu, zabývajícího se novými nedestruktivními metodami, budou dále zvyšovat potenciál georadarové metody.

Výsledky výzkumu mají dopad do současných i připravovaných předpisů, které se týkají nedestruktivní diagnostiky pozemních komunikací georadarem.

Výsledky výzkumu byly průběžně publikovány v časopisech i konferencích.

8 Literatura

8.1 Normy a předpisy:

ASTM D4748-10, 2010. *Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar.*

ASTM D6087-08, 2008. *Standard Test Method for Evaluating Asphalt-Covered Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar.*

ASTM D6429-99, 2011. *Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods.*

ASTM D6432-11, 2011. *Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation.*

B 10, 2008. *Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP).*

ČSN 73 6123-1, 2006. *Stavba vozovek - Cementobetonové kryty - Část 1: Provádění a kontrola shody.* ČNI, Praha.

ČSN 73 6192, 1996. *Rázové zatěžovací zkoušky vozovek a podloží.* ČNI, Praha.

ČSN EN 12350-1, 2009. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Odběr vzorků.* ČNI, Praha.

ČSN EN 12350-2, 2009. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím.* ČNI, Praha

ČSN EN 12350-7, 2009. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody.* ČNI, Praha

ČSN EN 12390-1, 2013. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy.* TNK 36, Praha.

ČSN EN 12390-3, 2009. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.* TNK 36, Praha.

ČSN EN 12390-5, 2009. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních.* TNK 36, Praha.

ČSN EN 13877-1, 2006. *Cementobetonové kryty - Část 1: Materiály.* ČNI, Praha.

ČSN EN 13877-3, 2006. *Cementobetonové kryty - Část 3: Specifikace pro kluzné trny.* ČNI, Praha.

ČSN ETSI EN 302 066-1 v1.2.1, 2008. *Elektromagnetická kompatibilita a rádiové spektrum (ERM) – Zobrazovací systémy pro aplikace radarového sondování země a zdí (GPR/WPR) - Část 1: Technické vlastnosti a zkušební metody.*

ČSN ETSI EN 302 066-2 v1.2.1, 2008. *Elektromagnetická kompatibilita a rádiové spektrum (ERM) - Zobrazovací systémy pro aplikace radarového sondování země a zdí (GPR/WPR) - Část 2: Harmonizovaná EN pokrývající základní požadavky článku 3.2 Směrnice R&TTE.*

DMRB 3.1.7, 2006. *Design Manual for Roads and Bridges, Advice notes on the non-destructive testing of highway structures - advice note 3.5 BA 86/2006: Ground Penetrating Radar (GPR)*, UK, Highway Agency.
(<http://www.dft.gov.uk/ha/standards/dmr/vol3/section1.htm>)

DMRB 7.3.2, 2008. *Design Manual for Roads and Bridges, Data for pavement assessment - annex 6 HD 29/2008: Ground-Penetrating Radar (GPR)*, UK, Highway Agency.
(<http://www.dft.gov.uk/ha/standards/dmr/vol7/section3.htm>)

ETSI EG 202 730 v1.1.1, 2009. *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Code of Practice in respect of the control, use and application of Ground Probing Radar (GPR) and Wall Probing Radar (WPR) systems and equipment.*
(<http://pda.etsi.org/pda/queryform.asp>)

NF P98-170, 2006. *Chaussées en béton de ciment – Exécution et contrôle.* AFNOR Paris.

RVS 08.17.02, 2011. *Technische Vertragsbedingungen Betondecken – Deckenherstellung.* FSV Wien, Ausgabe 1.

TP 233, 2011. *Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací* (technické podmínky Ministerstva dopravy ČR).
(http://www.pjpk.cz/te_po.htm)

TP 3/12, 2012. *Využitie georadaru (GPR) pri návrhu rehabilitácie/rekonštrukcie vozoviek* (Technické podmienky Ministerstva dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR).
(<http://www.ssc.sk/sk/Technicke-predpisy/Zoznam-TP/2012.ssc>)

ZTV Beton-StB 07, 2007. *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton.* FGSV Köln, Ausgabe.

8.2 Zprávy, publikace a manuály:

BEBEN, D., A. MORDAK a W. ANIGACZ, 2012. Identification of viaduct beam parameters using the ground penetrating radar (GPR) technique. *NDT&E International*, vol. 49, s. 18–26.

BENEDETTO, A., G. MANACORDA et al., 2012. Novel perspectives in bridges inspection using GPR. *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 27, iss. 3.

BERTHELOT, C., D. PODBOROCHYNSKI, T. SAARENKETO et al., 2010. Ground-penetrating radar evaluation of moisture and frost across typical Saskatchewan road soils. *Advances in Civil Engineering*, 9 s.

CASSIDY, N. J., R. EDDIES a S. DODS, 2011. Void detection beneath reinforced concrete sections: The practical application of ground-penetrating radar and ultrasonic techniques. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 74, s. 263–276.

DÉROBERT, X. a B. BERENGER, 2010. Case study: Expertise and reinforcement of a particular ribbed slab post-tensioned structure. *Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures*, vol. 2, s. 574-584.

DEROBER, X. et al., 2011. Pathologies, diagnostic et réparation des chapes d'étanchéité d'ouvrages d'art. *Techn. et Méthodes LPC*, chapter 6, annex 2, 199 s.

EDWARDS, L. a Q. Mason, 2011. Evaluation of nondestructive methods for determining pavement thickness, final report, (prepared for Headquarters Air Force Civil Engineer Support Agency).

EDWARDS, L., 2012. Evaluation of technologies for nondestructively determining concrete pavement thickness.

FAN-NIAN Kong., 2000. Choice of antenna type and frequency range for testing of concrete structures. In: *8th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 22.-26. May, Gold Coast, Australia, CD-ROM.

FAUCHAR, C., F. REJIBA, X. DEROBERT et al., 2008. Step frequency radar applied for asphalt thickness measurements with various interface conditions. In: *12th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, June 16.-19., Birmingham, UK.

FHWA-IF-06-006, 2005. Use of magnetic tomography technology to evaluate dowel placement. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D.C.

GSSI, 2004. Radan 6.0, user's manual

GSSI, 2006. GSSI handbook for radar inspection of concrete.

GSSI, 2007. SIRveyor SIR-20, user's manual (1,5 GHz).

GSSI, 2008. Advanced road structure, Assessment module for Radan 6.0, user's manual.

GSSI, 2008. Bridge assessment module for Radan 6.0, user's manual.

GSSI, 2004. Interactive3D module for Radan 6.0, user's manual.

Heft S65, 2010. Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach.

HUGENSCHMIDT, J. a R. MASTRANGELO, 2006. GPR inspection of concrete bridges. *Cement & Concrete Composites*, vol. 28, s. 384–392.

HUGENSCHMIDT, J. a A. KALOGEROPOULOS, 2009. The inspection of retaining walls using GPR. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 67, iss. 4, s. 335–344.

HUGENSCHMIDT, J., C. Kasa and H. Kato, 2013. GPR for the inspection of industrial railway tracks. *Near Surface Geophysics*, received Sept. 2012, revision accepted, March 2013.

CHANG, CH. W., CH. H. LIN a H. S. LIEN, 2009. Measurement radius of reinforcing steel bar in concrete using digital image GPR. *Construction and Building Materials*, vol. 23, s. 1057–1063.

KHAZANOVICH, L., H. T. YU a R. STUBSTAD, 2003. Nondestructive Dowel Bar Detection in Existing Rigid Concrete Pavement Slabs, California Department of Transportation, Sacramento.

KRAUSE, M., D. STREICHER et al., 2004. Non-destructive Testing of a Post Tensioned Concrete Bridge Applying an Automated Measuring System. In: *Proceedings of Structural Materials Technology (SMT), NDE/NDT for Highways and Bridges 2004*, September 14-17, Buffalo, NY, USA, s. 488-495.

KRYSIŃSKI, L. a J. SUDYKA, 2012. Typology of reflections in the assessment of the interlayer bonding condition of the bituminous pavement by the use of an impulse high-frequency ground-penetrating radar. *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 27, iss. 3, s. 219-227.

KRYSIŃSKI, L. a J. SUDYKA, 2013. GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks. *Journal of Applied Geophysics*, (in press).

LAI, W. L, T. KIND a H. WIGGENHAUSER, 2011. Frequency-dependent dispersion of high-frequency ground penetrating radar wave in concrete, *NDT&E International*, vol. 44, iss. 3, s. 267-273.

LALAGÜE, A. a I. HOFF, 2010. Determination of space behind pre-cast concrete elements in tunnels using GPR. In: *13th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, s. 1-5.

LOIZOS, A. a Ch. PLATI, 2007. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches. *NDT&E International*, vol. 40, s. 147-157.

- Mara Nord Project, 2011. Recommendations for guidelines for the use of GPR in bridge deck surveys.
- Mara Nord Project, 2011. Recommendations for guidelines for the use of GPR in road construction quality control.
- Mara Nord Project, 2011. The Use of GPR in Road Rehabilitation Projects.
- NCHRP Report 637, 2009. *Guidelines for dowel alignment in concrete pavements*. Transportation Research Board (TRB), Washington D. C.
- PARRY, N. S. a J. L. DAVIS, 1992. GPR Systems for roads and bridges. In: *Proceedings of 4th International Conference on ground penetrating radar*, Rovaniemi, Finland, s. 247-257.
- RAO, S., K. HOEGH, T. YU et al., 2009. Evaluation of dowel alignment constructability in portland cement concrete pavements, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, s. 86-93. ISBN 9780309126144.
- Rozborová úloha, 2010. Využitie georadaru pre účely systému hospodárenia s vozovkami, Žilinská univerzita, Stavebná fakulta, Katedra cestného staviteľstva, 43 s.
(<http://www.ssc.sk/sk/Technicke-predpisy/Rozborove-ulohy.ssc>)
- SAARENKETO, T., 2006. Electrical properties of road materials and subgrade soil and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys, Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Ph.D. dissertation work, 121 s.
- SAARENKETO, T. a T. SCULLION, 2000. Road evaluation with ground penetrating radar, *Journal of Applied Geophysics*, vol. 43, s. 119-138.
- SBARTAĽ, Z. M., S. LAURENS, J. RHAZI et al., 2007. Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 62, s. 361-374.
- SHAW, M. R., S. G. MILLARD et al., 2005. Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks, *NDT & E International*, vol. 38, iss. 3, s. 203-212.
- SHRP 2, 2013 (Strategic Highway Research Program 2). Nondestructive testing to identify concrete bridge deck deterioration, Transportation Research Board.
- SHRP 2, 2013 (Strategic Highway Research Program 2). Nondestructive testing to identify delaminations between HMA layers, vol. 1 and 2, Transportation Research Board.
- SHRP 2, 2013 (Strategic Highway Research Program 2). Mapping voids, debonding, delaminations, moisture, and other defects behind or within tunnel linings, Transportation Research Board.
- SILVAST, M. a B. WILJANEN, 2008. ONKALO EDZ – Measurements using ground penetrating radar (GPR) method, working report.

SOLLA, M., H. LORENZO et al., 2012. Ground-penetrating radar for the structural evaluation of masonry bridges: Results and Interpretational tools. *Construction and Building Materials*, vol. 25, iss. 1, s. 458-465.

TARUSSOV, A., M. VANDRY a A. DE LA HAZA, 2013. Condition assessment of concrete structures using a new analysis method: Ground-penetrating radar computer-assisted visual interpretation. *Construction and Building Materials*, vol. 38, s. 1246-1254.

TOTSI, F. a A. BENEDETTO, 2012. Pavement pumping prediction using ground penetrating radar. *Social and Behavioral Sciences*, vol. 53, s. 1045-1054.

YU, H.T. a L. KHAZANOVICH, 2005. Dowel Bar Alignments of Typical In-Service Pavements, R&D Serial No. 2894, Portland Cement Association, Skokie.

8.3 Vlastní publikační činnost

A1 – publikace v zahraničních a mezinárodních recenzovaných časopisech (časopisy s IF)

POSPISIL, K., J. STRYK a R. MATULA, 2013. Capsules as a prevention of fibre clusters in concrete. *Ceramics – Silikáty*, vol. 56, iss. 4, s. 383-386. ISSN 0862-5468.

STRYK, J., R. MATULA a K. POSPISIL, 2013. Possibilities of ground penetrating radar usage within acceptance tests of rigid pavements. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 97, 16 s., ISSN 0926-9851.

A2- publikace v ostatních vědeckých recenzovaných časopisech

STRYK, J. a R. MATULA, 2009. Ground penetrating radar as a tool for diagnostics of concrete pavements. *Transactions on Transport Sciences*, vol. 2, iss. 4, s. 180-187. ISSN 1802-971X.

B1- Přednášky na konferencích v zahraničí

MATULA, R., a J. STRYK, 2009. Georadar jako nástroj pro diagnostiku vozovek s cementobetonovým krytem. In: *I. seminár letnej údržby pozemných komunikácií: zborník príspevků*. Tatranská Lomnica, 02. - 03. 06., Bratislava, Výskumný ústav dopravný, a.s., s. 60-69. ISBN 978-80-970172-3-1.

STRYK, J. a R. MATULA, 2012. Měření tloušťek vrstev konstrukce vozovky georadarem. In: *Letiskové vozovky 2012*. Vysoké Tatry - Štrbské Pleso, 21. - 22. 05.

STRYK, J. a R. MATULA, 2013. Innovative inspection procedures for effective GPR surveying of critical transport infrastructures (pavements, bridges and tunnels) - State of the art and open issues. In: *COST action TU1208: Civil engineering applications of ground penetrating radar: proceeding*. Rome, 22. - 24. 07., Rome: Roma Tre University, s. 71-78. ISBN 978-88-548-6191-6.

B2- Postery na konferencích v zahraničí

STRYK, J., K. POSPÍŠIL a R. MATULA, 2012. Georadar a jeho uplatnění při diagnostice objektů dopravní infrastruktury. In: *Letiskové vozovky 2012*. Vysoké Tatry - Štrbské Pleso, 21. - 22. 05.

C1- Přednášky na domácích konferencích

MATULA, R. a J. STRYK, 2011. Diagnostika vozovek pozemních komunikací georadarem – aplikace, zpracování naměřených dat a faktory ovlivňující výsledky měření. In: *9th International Conference NDT 2011: Nedestruktivní testování v technických oborech*. 07. 12., Brno.

MATULA, R. a P. ZEDNÍK, 2012. Výběr metod hodnocení únosnosti podloží a konstrukčních vrstev nízkokapacitních vozovek modelováním jejich různých skladeb v Laboratorním geotechnickém zkušebním poli (LGZP). In: *Podkladní vrstvy a podloží vozovek 2012: zborník príspevků*. Brno, 27. 11., [CD-ROM], Praha, Sdružení pro výstavbu silnic Praha, s. 104-111.

STRYK, J. a R. MATULA, 2009. Využití georadaru v silniční diagnostice se zaměřením na vozovky s CB krytem. In: *XII. Mezinárodní vědecká konference u příležitosti 110. výročí založení FAST VUT v Brně - Dopravní stavby: sborník příspěvků*. Brno, 20. - 22. 04. Akademické nakladatelství CERM®, s.r.o., s. 111-114. ISBN 978-80-7204-629-4.

STRYK, J. a R. MATULA, 2009. Ground Penetrating Radar as a Tool for Diagnostics of Concrete Pavements. In *7th workshop NDT 2009 - Non-destructive Testing in Engineering Practice*. Brno, 25.11. Brno: Vysoké učení technické, s. 71-79. ISBN 978-80-7204-671-3.

STRYK, J. a R. MATULA, 2011. Georadar jako užitečný doplněk při diagnostice vozovek PK. In: *Asfaltové vozovky 2011: sborník příspěvků*. České Budějovice, 22. - 23. 11., [CD-ROM], Praha, Pragoprojekt, 8 s. ISBN 978-80-903925-2-6.

C2- Postery na domácích konferencích

C3- Ostatní příspěvky ve sbornících konferencí

MATULA, R., 2012. Georadar a možnosti jeho využití při kontrole a odhalování skrytých poruch. In: *Monitorování a hodnocení stavu vozovek pozemních komunikací*, 26. 11., Brno, BVV.

MATULA, R., 2012. Possibilities of ground penetrating radar usage in the field of transport infrastructure. In: *Minikonference při obhajobě zkoušky z anglického jazyka*, 19. 12., Pardubice.

Užitný vzor:

STRYK, J. a R. MATULA, 2010. Užitný vzor č. 20706: Mobilní zařízení pro diagnostiku vozovek, Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., zapsáno dne 29. 03.

Ostatní práce:

MATULA, R., 2013. Nedestruktivní diagnostika konstrukcí vozovek pozemních komunikací georadarem. Pardubice. Odborná práce ke státní doktorské zkoušce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí disertační práce K. Pospíšil.

Seznam obrázků

Obr. 1 Měřicí sestava GPR - základní komponenty	13
Obr. 2 Základní princip georadaru.....	13
Obr. 3 Srovnání použití několika tradičních antén (100, 200, 400 a 900 MHz) a pole antén systému GeoScope™ firmy 3D-Radar (rozsah 100 MHz až 3 GHz).....	17
Obr. 4 Sestava Pulse Ekko - jedna anténa typu dipól tažená po povrchu.....	17
Obr. 5 Sestava RIS Hi-Pave - jedna trychtýřová anténa, odometr uchycen na kolo automobilu	17
Obr. 6 Nainstalovaný set Groundvue 3 (pole antén typu dipól) a Groundvue 5 (trychtýřová anténa) firmy Utsi Electronics Ltd na měřicím vozidle Harris II.....	18
Obr. 7 Systém GeoScope™ Mk IV s polem antén šířky 1,8 m pro 3D mapování (zdroj 3D-Radar).....	18
Obr. 8 Záznam měření v jednom bodě – A sken (vlevo) a kontinuální záznam georadaru – tzv. Radargram (vpravo), (zdroj DMRB 7.3.2, 2008)	19
Obr. 9 Základní zobrazení softwaru RADAN pro vyhodnocení GPR dat – stanovení polohy zabudované výztuže	21
Obr. 10 Možnosti zpracování georadarových dat softwarem Reflexw	22
Obr. 11 Zobrazení softwaru Road Doctor – výsledky měření laserového skenování, georadaru a rázového zařízení FWD (zdroj: Roadscanners Oy)	23
Obr. 12 Výztužné prvky před jejich použitím - kluzné trny (vlevo) a kotvy (vpravo).....	24
Obr. 13 Příklad umístění kluzného trnu a kotvy v řezu cementobetonovou vozovkou podle projektové dokumentace	25
Obr. 14 Schéma uložení kluzných trnů a kotev v CB krytu v ČR dle katalogu z TP 170.....	25
Obr. 15 Ukázka vyztužení pracovní spáry pomocí kluzných trnů (vlevo) a dřevěné bednění – prvek technologie pro osazení kluzných trnů do pracovní spáry (vpravo).....	26
Obr. 16 Ukázka vyztužení spáry pomocí kluzných trnů (vlevo) a kotev (vpravo) osazených před betonáží na armokoše	26
Obr. 17 Zatláčecí zařízení kluzných trnů na finišeru Wirtgen SP 1600	27
Obr. 18 Zatláčecí zařízení kotev na finišeru Wirtgen SP 1500 (vlevo) a ruční zatláčení kotev při pokládce CB krytu pomocí finišeru Hailit+Woerner (vpravo)	28
Obr. 19 Sledované normové parametry, ve kterých se poloha výztuže navržená v dokumentaci nesmí lišit od skutečné polohy.....	29
Obr. 20 Georadarové vybavení - ruční vozík (model 615).....	42
Obr. 21 Zobrazení části hyperboly, které se používá pro účely stanovení polohy výztuže v betonu při kontinuálním měření georadarem ve směru kolmém na výztuž.....	45
Obr. 22 Princip metody nejmenších čtverců.....	46
Obr. 23 Laboratorní cementobetonové desky tloušťek 100 a 150 mm	49
Obr. 24 Půdorys a tři řezy betonovou deskou tl. 240 mm se 3 zabudovanými kluznými trny.....	50
Obr. 25 Příprava uložení tří kluzných trnů před betonáží desky v akreditované laboratoři CDV v Tišnově.....	50
Obr. 26 Zkouška sednutí kuzelem navržené směsi (vlevo) a pohled na betonovou desku tl. 240 mm (vpravo)	51
Obr. 27 Schémata příčných řezů z laboratorního měření CB desek tl. 100 mm a 150 mm	52
Obr. 28 Měření rychlosti šíření signálu na desce tloušťky 100 mm (měření A-H-0-CB 0,1).....	53

Obr. 29 Měření rychlosti šíření signálu na desce tloušťky 150 mm (měření B-R-4-CB 0,15)	53
Obr. 30 Vzorový příklad radargramu z měření rychlosti šíření EM signálu CB deskou: tloušťka 100 mm, anténa 1,6 GHz	54
Obr. 31 Změna střední frekvence v radargramech	54
Obr. 32 Změna natočení snímačů v radargramech	55
Obr. 33 Změna objemové vlhkosti podkladní vrstvy v radargramech	55
Obr. 34 Ukázka radargramu z měření B-H-4-CB 0,1 a označení sledovaných rozhraní	55
Obr. 35 Rozdělení četností času průchodu EM signálu CB deskou ($t/2$) z jednoho přejezdu	56
Obr. 36 Grafické znázornění zjištěných časů průchodu EM signálu ($t/2$) pro všechny kombinace měření	57
Obr. 37 Znázornění stanovených rychlostí šíření EM signálu pro všechny kombinace měření	57
Obr. 38 Měření rychlosti šíření signálu a polohy kluzných trnů na laboratorní zkušební desce	60
Obr. 39 Vzorový příklad radargramu z měření rychlosti šíření EM signálu CB deskou: tloušťka 240 mm, anténa 2,6 GHz	60
Obr. 40 Schéma pro stanovení rychlosti šíření EM signálu metodou CMP (ASTM D6432-11, 2011)	64
Obr. 41 Schéma pro stanovení rychlosti šíření EM signálu metodou WARR (ASTM D6432-11, 2011)	64
Obr. 42 První pozice při měření metodou CMP/WARR v případě, že od sebe nelze oddělit vysílač a přijímač antény a je nutné použít 2 antény stejného typu: T – vysílač, R – přijímač.	64
Obr. 43 Foto z měření metodou CMP při pozicích a natočeních antén	65
Obr. 44 Foto z měření metodou WARR při pozicích a natočeních antén	65
Obr. 45 Radargramy z měření metodou CMP a WARR se vzorkováním po 1 cm	66
Obr. 46 Závislost vzdálenosti antén a času průchodu EM signálu z vysílače do přijímače pro air wave, ground wave a dno betonové desky tl. 150 mm (Stryk,2013)	67
Obr. 47: Závislost vzdálenosti antén a času průchodu EM signálu z vysílače do přijímače pro ground wave a dno betonové desky tl. 150 m (Stryk,2013),	67
Obr. 48 Vzorový příklad radargramu z měření rychlosti šíření EM signálu podkladní vrstvy kameniva anténou 1,6 GHz	68
Obr. 49 Grafické znázornění zjištěných časů průchodu EM signálu ($t/2$) pro všechny kombinace měření	69
Obr. 50 Grafické znázornění stanovených rychlostí šíření EM signálu ($t/2$) pro všechny kombinace měření	69
Obr. 51 Schéma umístění výztuží při měření jejich horizontálních vzdáleností georadarem	70
Obr. 52 Foto z měření vzdálenosti kluzných trnů pod zkušební CB deskou	70
Obr. 53 Vzorový příklad radargramu z horizontálního vyhodnocení vzdálenosti výztužných prvků v programu Radan 6.6	71
Obr. 54 Radargramy z měření dvou kluzných trnů umístěných vedle sebe pod betonovou deskou tl. 150 mm osová vzdálenost výztuže 50 mm, anténa 1,6 GHz (nahore vlevo), osová vzdálenost výztuže 50 mm, anténa 2,6 GHz (nahore vpravo), osová vzdálenost výztuže 100 mm, anténa 1,6 GHz (dole vlevo), osová vzdálenost výztuže 100 mm, anténa 2,6 GHz (dole vpravo).	71

Obr. 55 Betonová deska tl. 240 mm se třemi zabudovanými kluznými trny – ukázka radargramu z jednoho přejezdu ve 2D (vlevo nahoře), srovnání identifikovaných a vypočítaných bodů aproximací metodou nejmenších čtverců jednoho radargramu (vlevo dole) a zobrazení ve 3D (vpravo).....	73
Obr. 56 Grafické znázornění rozdílů skutečných hloubek povrchu KT se zjištěnými hloubkami povrchu KT - rychlost šíření EM signálu byla vypočítána ze známé tloušťky desky a časů průchodu zjištěných z radargramu	74
Obr. 57 Polohy tří kluzných trnů průměru 25 mm v betonové desce tl. 240 mm – měření anténou 2,6 GHz pro pozice 200 - 500 mm.	75
Obr. 58 Srovnání skutečné polohy tří kluzných trnů v betonové desce tl. 240 mm (vlevo) a polohy kluzných trnů zjištěných z měření georadarem (vpravo) pro pozici měření 150 - 550 mm	75
Obr. 59 Mobilní zařízení pro měření polohy kluzných trnů a kotev se dvěma anténami 1,6 GHz a polohovacím zařízením	77
Obr. 60 Mobilní zařízení pro měření polohy kluzných trnů a kotev - foto z měření in situ	78
Obr. 61 Schéma půdorysu nastavení vidlic mobilního zařízení pro měření polohy kluzných trnů	78
Obr. 62 Schéma půdorysu nastavení vidlic mobilního zařízení pro měření polohy kotev	79
Obr. 63 Stanovení hloubek kluzných trnů v příčné spáře na dálnici D1	81
Obr. 64 Stanovení hloubek KT v příčné spáře na dálnici D1 po úpravě rychlosti šíření signálu	81
Obr. 65 Kalibrace rychlosti šíření elektromagnetického signálu metodou CMP	82
Obr. 66 Destruktivní stanovení polohy kluzných trnů – řezání trámce s osazenými kluznými trny	82
Obr. 67 Grafické stanovení rychlosti šíření metodou CMP na zkušebním úseku v Pelhřimově	83
Obr. 68 Porovnání hyperbol představujících kluzné trny v radargramech ze všech měření na zkušební spáře (nahore) a pro názornost v detailu (dole)	83
Obr. 69 Interpretace výsledků naměřené polohy kluzných trnů v grafickém a tabulkovém vyhodnocení	85
Obr. 70 Histogramy uvádějící četnosti rozdílů hloubek kluzných trnů (přímé změření minus GPR)	86
Obr. 71 Grafické znázornění hloubek kluzných trnů (dz) stanovených destruktivně (DSP) a georadarem (CDV)	87
Obr. 72 Grafické znázornění vertikálních odchylek konců kluzných trnů (s) stanovených destruktivně (DSP) a stanovených georadarem (CDV), $v=0,1008$ m/ns	88
Obr. 73 Grafické znázornění hloubek kluzných trnů (dz) stanovených destruktivně (DSP) a stanovených georadarem (CDV, $v = 0,0941$ m/ns) pro linie přejezdu -0,2 m (nahore) a +0,2 m (dole)	88
Obr. 74 Grafické znázornění rozdílů hloubek kluzných trnů (dz) stanovených destruktivně (DSP) a stanovených georadarem (CDV, $v = 0,0941$ m/ns) pro linie přejezdu -0,2 m (nahore) a +0,2 m (dole)	89
Obr. 75 Grafické zpracování CMP metody pro $v = 0,0941$ m/ns	89
Obr. 76 Ukázka zařízení MIT-Scan při měření polohy kluzných trnů	90
Obr. 77 Ukázka vizualizace naměřených dat v programu MagnoProof	91

Obr. 78 Interpretace výsledků z měření nedestruktivními metodami na pracovní spáře	92
Obr. 79 Pohled na zkušební úsek se zabudovanými kotvami a pohled shora na kluzné trny ..	93
Obr. 80 Grafické vyhodnocení hloubky kluzných trnů naměřených ve spáře vzhledem ke skutečnému změření	94
Obr. 81 Grafické vyhodnocení hloubky kotev naměřených ve spáře vzhledem ke skutečnému změření	94
Obr. 82 Grafické vyhodnocení vertikálních rozdílů konců kluzných trnů vzhledem ke skutečnému změření	95
Obr. 83 Grafické vyhodnocení vertikálních rozdílů konců kotev vzhledem ke skutečnému změření	95
Obr. 84 Grafické vyhodnocení horizontálních rozdílů konců kluzných trnů vzhledem ke skutečnému změření	96
Obr. 85 Grafické vyhodnocení vertikálních rozdílů konců kotev vzhledem ke skutečnému změření	96
Obr. 86 Grafické vyhodnocení podélných posunů konců kluzných trnů vzhledem ke skutečnému změření	97
Obr. 87 Grafické vyhodnocení podélných posunů konců kotev vzhledem ke skutečnému změření	97
Obr. 88 Nasazení nedestruktivních metod při hodnocení polohy kluzných trnů a kotev na pokusných úsecích	100
Obr. 89 Schéma měřených příčných spár na rychlostní silnici R1 (vlevo) a dálnici D1 (vpravo).....	100
Obr. 90 Spolupůsobení 3 desek na rychlostní silnici R1 při různých teplotních spádech.....	101
Obr. 91 Spolupůsobení 6ti desek na dálnici D1 při jednom teplotním spádu	101
Obr. 92 Interpretace výsledků příčné spáry D12 zkušebního úseku R1	102
Obr. 93 Interpretace výsledků příčné spáry D23 zkušebního úseku R1	103
Obr. 94 Interpretace výsledků příčné spáry D34 zkušebního úseku R1	104
Obr. 95 Interpretace výsledků příčné spáry D12 zkušebního úseku D1.....	105
Obr. 96 Interpretace výsledků příčné spáry D23 zkušebního úseku D1.....	106
Obr. 97 Interpretace výsledků příčné spáry D34 zkušebního úseku D1.....	107
Obr. 98 Interpretace výsledků příčné spáry D45 zkušebního úseku D1.....	108
Obr. 99 Interpretace výsledků příčné spáry D56 zkušebního úseku D1.....	109
Obr. 100 Radargram z měření polohy kluzných trnů v příčné spáře CB krytu pomocí dvoukan. vozíku	110
Obr. 101 Radargram z měření polohy kluzných trnů v příčné spáře CB krytu pomocí dvoukan. vozíku	110
Obr. 102 Radargramy ze smršťovacích spár	111
Obr. 103 Radargramy z pracovních spár	112
Obr. 104 Funkční závislost skutečných hloubek trnů a laboratorně stanovených hloubek georadarem	115
Obr. 105 Funkční závislost skutečných hloubek trnů v linii +0,2 a stanovených hloubek georadarem	116
Obr. 106 Funkční závislost skutečných hloubek trnů v linii -0,2 a stanovených hloubek georadarem	117

Obr. 107 Funkční závislost skutečných hloubek kluzných trnů a stanovených hloubek KT georadarem.....	118
Obr. 108 Funkční závislost skutečných hloubek kotev a stanovených hloubek kotev georadarem.....	118
Obr. 109 Funkční závislost hloubek kluzných trnů stanovených georadary	119
Obr. 110 Funkční závislost hloubek kotev stanovených georadary	119
Obr. 111 Interpretace při stanovení polohy kluzných trnů	124
Obr. 112 Interpretace při stanovení polohy kotev	125

Seznam tabulek

Tab. 1 Rychlost šíření EM signálu prostředím a dielektrické konstanty dle DMRB 7.3.2 HD 29/08	14
Tab. 2 Útlum EM signálu při průchodu zeminou za použití antén různých frekv. dle ETSI EG 202 730	15
Tab. 3 Typický dosah antén s různou frekvencí dle GSSI.....	16
Tab. 4 Možnosti vzorkování za různých rychlostí při měření jednou anténou dle GSSI.....	20
Tab. 5 Softwary dodávané jednotlivými výrobci georadarových systémů.....	21
Tab. 6 Průměrné elektromagnetické vlastnosti vybraných materiálů dle ASTM D6432-11....	33
Tab. 7 Rozlišovací schopnost (v metrech) pro antény různých frekvencí a různé dielektrické konstanty ϵ_r (založeno na $\frac{1}{4}$ vlnové délky) dle ASTM D6432-11	33
Tab. 8 Relativní dielektrické konstanty a rychlosti šíření EM signálu pro různé silniční materiály dle ASTM D4748-10	34
Tab. 9 Vybrané parametry anténních systémů na základě centrální vysílací frekvence dle DMRB 7.3.2 HD 29/08.....	35
Tab. 10 Rychlost šíření EM signálu prostředím a dielektrické konstanty dle DMRB 7.3.2 HD 29/08	35
Tab. 11 Dielektrické konstanty a vodivost jednotlivých materiálů dle DMRB 3.1.7.....	36
Tab. 12 Šíření signálu konstrukčním betonem dle DMRB 3.1.7.....	36
Tab. 13 Dosah antén s různou frekvencí dle DMRB 3.1.7	37
Tab. 14 Elektromagnetické vlastnosti různých materiálů dle Merkblatt B 10	37
Tab. 15 Typický hloubkový dosah diagnostiky GPR různých materiálů dle Merkblatt B 10..	38
Tab. 16 Dielektrické konstanty jednotlivých materiálů dle GSSI	38
Tab. 17 Typický dosah antén s různou frekvencí dle GSSI.....	38
Tab. 18 Parametry dvoukanálového systému GSSI SIR-20	43
Tab. 19 Parametry používaných antén od firmy GSSI	43
Tab. 20 Návrh směsi pro výrobu cementobetonové desky tl. 100 mm a 150 mm ze silničního betonu.....	49
Tab. 21 Návrh směsi pro výrobu cementobetonové desky tl. 240 mm ze silničního betonu ...	51
Tab. 22 Stanovení rychlosti šíření elektromagnetického impulzu cementobetonové desky tl. 100 mm	58
Tab. 23 Stanovení rychlosti šíření elektromagnetického impulzu cementobetonové desky tl. 150 mm	59
Tab. 24 Celkové výsledky experimentu na laboratorních CB deskách tl. 100 mm a 150 mm.	59

Tab. 25 Stanovení rychlosti šíření elektromagnetického impulzu CB desky tl. 240 mm pro AMP 1+	61
Tab. 26 Stanovení rychlosti šíření elektromagnetického impulzu CB desky tl. 240 mm pro AMP 1-	62
Tab. 27 Stanovení výsledných rychlostí šíření elektromagnetického signálu a stanovení relativní permitivity pro amplitudy dna CB desky tl. 240 mm.....	63
Tab. 28 Stanovení výsledných rychlostí šíření elektromagnetického signálu a stanovení relativní permitivity	69
Tab. 29 Stanovení polaritý hodnocené amplitudy a reflexního koeficientu na rozhraní vrstev	69
Tab. 30 Vyhodnocené odchylky polohy výztužných prvků pod deskou tloušťky 100 mm	72
Tab. 31 Stanovení odchylek polohy výztužných prvků pod deskou tloušťky 100mm	72
Tab. 32 Stanovení hloubek povrchu kluzných trnů z rychlostí šíření EM signálu zjištěných ze známé tloušťky CB desky.....	74
Tab. 33 Maximální horizontální a vertikální odchylky polohy tří kluzných trnů od skutečné polohy v betonové desce tloušťky 240 mm, měřeno anténou 2,6 GHz pro pozice měření 200 - 500 mm	76
Tab. 34 Znázornění výpočtu polohy kluzných trnů metodou lineární regrese s rozdíly stanovených bodů rovnice přímky s naměřenými souřadnicemi X a Y	84
Tab. 35 Znázornění výpočtové tabulky při stanovení výstupních sledovaných parametrů kluzných trnů georadarem v programu Excel.....	84
Tab. 36 Výsledky ze stanovení polohy kluzných trnů (Ing Kovář).....	86
Tab. 37 Statistické stanovení výsledků srovnávacího měření v Pelhřimově.....	87
Tab. 38 Rozdíly ve stanovené poloze kluzných trnů při použití různých rychlostí šíření EM signálu betonem, měření dvoukanálovým vozíkem s anténami s centrální vysílací frekvencí 1,6 GHz.....	89
Tab. 39 Stanovené hloubky kluzných trnů a kotev naměřených ve spáře vzhledem ke skutečnému změření	94
Tab. 40 Zjištěné vertikální rozdíly konců kluzných trnů a kotev vzhledem ke skutečnému změření	95
Tab. 41 Zjištěné horizontální rozdíly konců kluzných trnů a kotev vzhledem ke skutečnému změření	96
Tab. 42 Zjištěné podélné posuny kluzných trnů a kotev vzhledem ke skutečnému změření ...	97
Tab. 43 Výsledky metod zjištění polohy kluzných trnů nedestruktivními metodami	98
Tab. 44 Výsledky metod zjištění polohy kotev nedestruktivními metodami	98
Tab. 45 Správnosti a shodnost výsledků nedestruktivních metod určení polohy kluzných trnů	98
Tab. 46 Správnosti a shodnost výsledků nedestruktivních metod určení polohy kotev	98
Tab. 47 Souhrnné výsledky stanovení rychlosti šíření EM signálu a relativní permitivity všech realizovaných měření.....	121
Tab. 48 Souhrnné výsledky polohy kluzných trnů realizovaných měření.....	121