

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

**NEDESTRUKTIVNÍ DIAGNOSTIKA
KONSTRUKCÍ VOZOVEK
POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ
GEORADAREM**

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

2013

Ing. Radek Matula

Doktorand: Ing. Radek Matula

Studijní program:

P3710 Technika technologie v dopravě a spojích

Studijní obor:

3706V005 Dopravní prostředky a infrastruktura

Název dizertační práce:

Nedestruktivní diagnostika konstrukcí vozovek pozemních komunikací georadarem

Školitel: prof. Ing. Karel Pospíšil, Ph.D., MBA

Dizertační práce vznikla na školícím pracovišti:

Katedra dopravního stavitelství

Obsah

- 1 Úvod do problematiky
- 2 Současný stav poznatků
- 3 Cíl disertační práce
- 4 Metody a zařízení
- 5 Výsledky měření
- 6 Diskuze výsledků
- 7 Závěr
- 8 Literatura
- 9 Přehled vlastních publikovaných prací autora
- 10 Abstrakt – v českém jazyce a anglickém jazyce

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 strukturního 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 (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.

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. Výzkumná činnost v rámci i 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 (Shaw, 2005; Chang, 2009; He, 2009; Rao, 2009 a Lai, 2011). Je opublikováno pouze jedno současné srovnávací měření, které se váže k aplikaci zjištění polohy výztužných prvků a to měření tloušťek konstrukčních vrstev vozovek s CB krytem (Edwards a Mason, 2011) - 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 %** a to i přesto že byla nasazena současná 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 (TP 233, 2011) je podmínkou provedená kalibrace a lze očekávat přesnost určení hloubek kluzných trnů do 10 mm. Do roku 2011 však nebylo v ČR 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 je provedena řada laboratorních experimentů, in-situ měření a srovnávacích měření pro zjištění limit přesnosti určení přesné polohy kluzných trnů a kotev.

3 Cíl disertační 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

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.

K dosažení určeného cíle bylo použito zařízení zakoupené od americké firmy GSSI, převážně využitím vozíku pro lokální měření – model 615 (obr. 1) s kombinací antén 1,6 GHz a 2,6 GHz a řídicí jednotkou SIR 20. Napájení jednotky bylo zajištěno stabilním zdrojem napětí, antény byly spojeny s řídicí jednotkou SIR 20 koaxiálními kabely.



Obr. 1 Georadarové vybavení - ruční vozík (model 615)

Pro měření in situ bylo na základě výzkumu navrženo a sestaveno mobilní zařízení pro měření polohy kluzných trnů a kotev (bude uvedeno dále). Pro vyhodnocení naměřených dat byl použit software Radan 6.6 od výrobce zařízení, firmy GSSI.

Pro přípravu laboratorních experimentů byly vyrobeny laboratorní

cementobetonové desky. Metody a zařízení pro přípravu směsi, výrobu dřevěného bednění, mísení směsi, přípravu a zkoušení laboratorních vzorků betonu, zhutnění betonové směsi a odformování betonových desek byly zajištěny akreditovanými laboratoři dopravní infrastruktury a životního prostředí v Tišnově podle příslušných norem, které jsou k tomu určeny.

Výsledky stanovení polohy kluzných trnů a kotev byly hodnoceny statistickými veličinami.

Pro charakterizaci jednotlivých materiálů jsou důležitými veličinami permitivita, vodivost a permeabilita, z nichž zásadní je pro účely měření silničních materiálů georadarem permitivita. 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. Relativní permitivita materiálu je závislá na rychlosti šíření elektromagnetického signálu. 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.

4.2 Návaznost vlastních laboratorních experimentů a in situ měření

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.

4.3 Laboratorní stanovení rychlosti šíření EM signálu, dielektrické konstanty a posouzení metodami kalibrace CMP a WARR

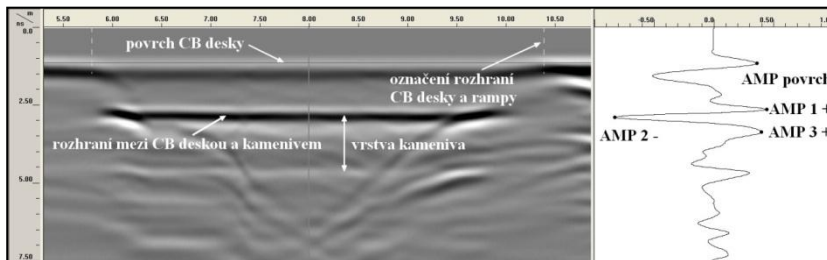
Zjišťování rychlosti šíření EM signálu bylo prováděno laboratorně stejným zařízením a byly sledovány změny ve výsledcích při kombinaci různého nastavení vstupních veličin.

Vstupními sledovanými veličinami byly:

- použitá frekvence dipólové antény,

- natočení vysílače a přijímače k linii přejezdu antény,
- tloušťka laboratorních CB desek,
- vlhkost podkladního materiálu.

Typický záznam z tohoto měření s popisem je uveden na obr. 2



Obr. 2 Vzorový příklad radargramu z měření rychlosti šíření EM signálu CB deskou: tloušťka 100 mm, anténa 1,6 GHz

Stanovená rychlost šíření na základě skutečně zjištěných tlouštěk byla posouzena metodami CMP a WARR. Bylo provedeno GPR měření s krokem měření 1 cm. Dále bylo provedeno modelování rychlosti šíření EM signálu CB desky v programu Excel a byly vypočítány časy průchodů EM signálu. Výsledky modelování a získané hodnoty zjištěné georadarem byly porovnány mezi sebou a byla sledovaná závislost mezi časy průchodu EM signálu od povrchu a dna CB desky. Podrobně jsou průběžné laboratorní výsledky hodnoceny v disertační práci.

4.4 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, ve kterém byla záměrně vlhčena podkladní vrstva kameniva. Zároveň v tomto experimentu byla pro ověření 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 podkladní vrstvy umístil ocelový plíšek.

Následně byly vypočítány hodnoty reflexního koeficientu na rozhraní vrstev a porovnány se stanovenou polaritou amplitudy

rozhraní vrstev splňující teoretické předpoklady. Takto byla ověřena správnost identifikace rozhraní vrstev v záznamech z georadaru.

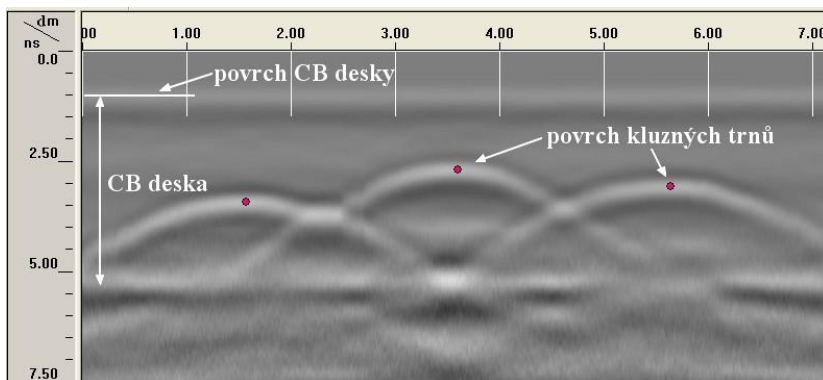
4.5 Stanovení polohy výztužných prvků georadarem

Zjišťování polohy kluzných trnů a kotev bylo prováděno laboratorně stejným zařízením a byly sledovány změny ve výsledcích při kombinaci různého nastavení vstupních veličin.

Vstupními sledovanými veličinami byly:

- použitá frekvence dipólové antény,
- měřítko vzorkování – počet impulzů na metr
- průměr výztuže
- středová horizontální vzdálenost výztuže
- hloubka výztuže
- horizontální a vertikální natočení výztuže.

Záznam jednoho měření s popisem je uveden na obr. 3.



Obr. 3 Vzorový příklad radargramu z měření polohy třech zabudovaných kluzných trnů v betonové desce tl. 240 mm

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 skenů/m byly získány

stejně výsledky jako při vzorkování 2000 skenů/m a vyhodnocené odchylky ve vertikálním i horizontálním směru byly srovnatelné. Bylo dosaženo vysokých přesností při určení hloubky výztuže.

Z výsledků laboratorních experimentů bylo zjištěno, 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).

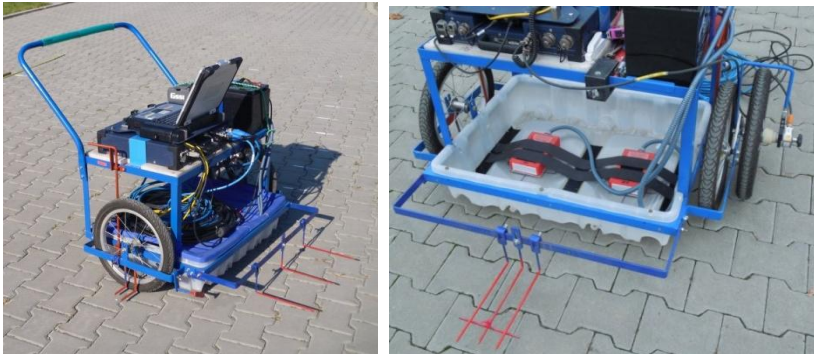
4.6 Návrh a konstrukce mobilního zařízení pro měření in situ

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. 4), 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. 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.



Obr. 4 Mobilní zařízení pro měření polohy kluzných trnů a kotev se dvěma anténami 1,6 GHz a polohovacím zařízením

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. 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.

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. 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 vývrtníku anebo vrtáním, projektová nebo změřená poloha kluzných trnů vkládaných do předem navrtaných otvorů po jednodenní betonáži, nebo

vkládáných do bednění na konci denní betonáže (ovlivněno přesností uložení bednění na stavbě a způsobem skladování mimo stavbu), anebo vkládáných 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).

4.7 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.

4.7.1 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. 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. Byly porovnány výsledky měření polohy vybraných třech kluzných trnů s jejich skutečnou polohou, zjištěnou jádrovými vývrty.

4.7.2 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 finišerem.

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

Po dodání výsledků georadaru bylo provedeno destruktivní změřeni polohy tak, že z CB desky byl vyřezán a vyjmut trámec obsahující 30 kluzných trnů. Vyjmutý trámec se rozpadl na několik kusů a nebylo možné určit s dostatečnou přesností horizontální 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

4.7.3 Srovnávací měření NDT metod na pokusném úseku ve Starém Městě

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. 5) 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. 5 Pohled na zkušební úsek se zabudovanými kotvami a pohled shora na kluzné trny

Měření georadarem dvou společností a měření zařízením MIT-Scan proběhlo 14 dní po betonáži. Naše měření georadarem bylo provedeno mobilním zařízením. 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.

4.7.4 Zkoušky přenosu zatížení na spárách rázovým zařízením FWD a stanovení polohy kluzných trnů georadarem 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. 4 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.

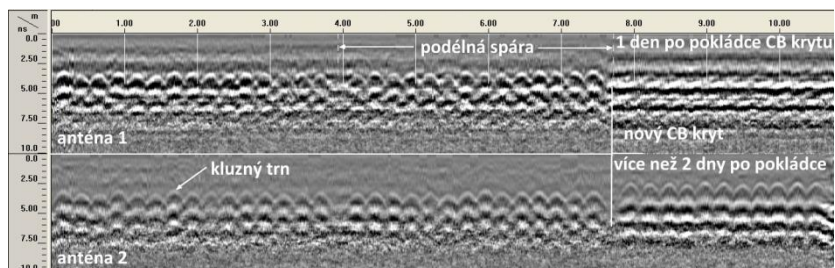
Na pokusném úseku rychlostní silnice R1 - Pražském okruhu, byly měřeny příčné spáry tří desek a na pokusném úseku dálnice D1 před Kroměříží byly měřeny příčné spáry šesti desek.

Měření georadarem bylo provedeno mobilním vozíkem s krokem měření 0,003 metrů. Směrové vidlice měřicího vozíku byly nastaveny na hodnotu 50 mm. Na místě byla provedena kalibrace vzdálenosti měřicího kola.

4.8 Měření polohy kluzných trnů a kotev in situ

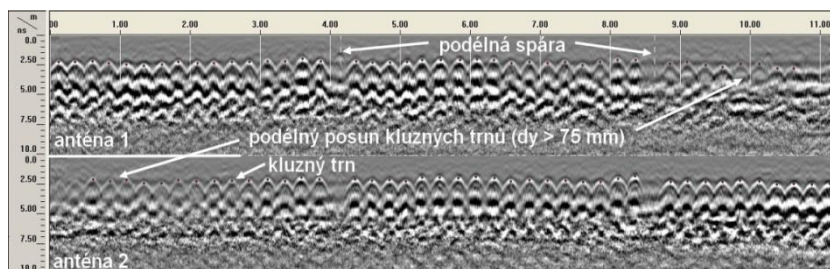
Při měření pomocí dvoukanálového vozíku in situ byla identifikována řada různých anomálií v poloze zabudované výztuže, které jsou popsány dále. Na úvod je nutno zmínit, že měření

georadarem, aby bylo dobře interpretovatelné, musí být provedeno alespoň 2 dny po pokládce cementobetonového krytu, jinak je radargram málo čitelný (obr. 7 v pravé horní části).



Obr. 7 Radargram z měření polohy kluzných trnů v příčné spáře CB krytu pomocí mobilního zařízení

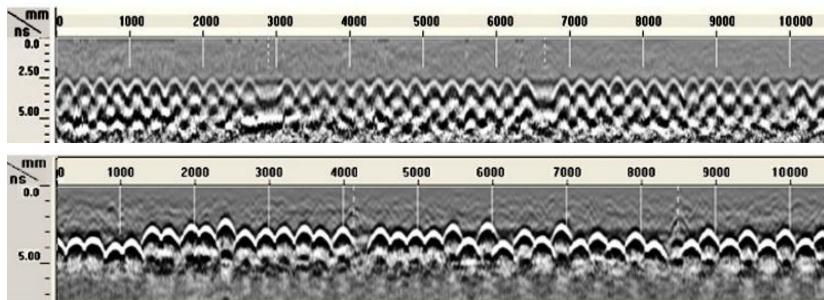
V praxi se může stát, že smršťovací spára, která se řeže do zatvrdlého betonu a vytváří jednotlivé desky CB krytu, se nenachází ve správné poloze nad kluznými trny a kotvami a díky tomu dochází k nesplnění požadavků normy na maximální povolený posun výztuže ve směru její podélné osy vzhledem ke spáře. Tento případ dokumentuje obr. 8, 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. 8 Radargram z měření polohy kluzných trnů v příčné spáře CB krytu pomocí mobilního zařízení – podélný posun kluzných trnů

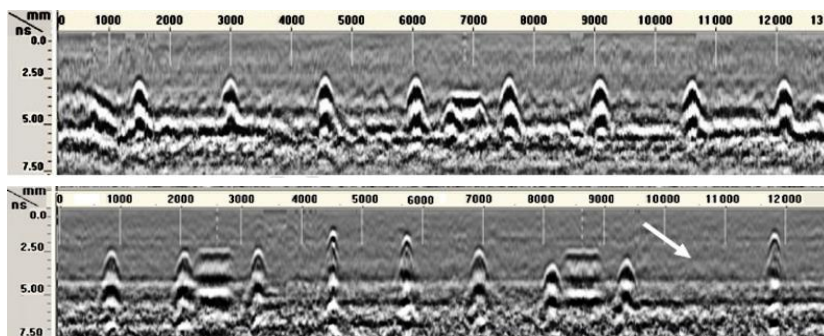
Další možné anomálie v poloze kluzných trnů a kotev v případě smršťovacích spár jsou uvedeny na obr. 9 a 10, jde především o variabilitu polohy výztuže ve spáře. Zatlačení kluzných trnů kotev směrem dolů v místě křížení příčné a podélné spáry, anomálie

způsobené použitím ocelových košů pro fixaci výztuže v požadované poloze, chybějící a přebývající výztuž apod. jsou uvedeny v disertační práci.



Obr. 9 Radargram z měření polohy kluzných trnů v příčné spáře CB krytu - variabilita polohy kluzných trnů

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 posunutí 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. 10 Radargram z měření polohy kotev v podélné spáře CB krytu - variabilita polohy kotev

Nejpřesněji jsou kluzné trny a kotvy osazeny v pracovní spáře jejich navrtáváním do mladého, avšak zatvrdlého betonu.

5 Výsledky měření

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. 1. V tabulce je uveden také způsob zjištění sledované rychlosti šíření. Tabulka č. 2 uvádí limity přesnosti určení přesné polohy kluzného trnu nebo kotvy při použití georadaru.

Tab. 1 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 metodou
HV	...přímé změřeni hloubky kluzných trnů/kotvy
JV	...jádrový vývrt
JV-V	...jádrový vývrt kluzným trnem
PHV	...předpokládaná hloubka výztuže
PS	...známá poloha výztuže v pracovní spáře

Tab. 2 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
	vert. 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
	vert. rozdíly konců KT:	42	16	8	3
	vert. rozdíly konců kotev:	11	23	9	7
	hor. rozdíly konců KT:	42	20	9	5
	hor. 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</i>				
<i>vertikální vzdálenost konců kotev: 0-122 mm</i>					

V laboratorních měřeních bylo dosaženo vysokých přesnosti a to bylo dáno tím, že šlo o známé konstantní tloušťky desky vyrobené z homogenního betonu a měření probíhala v délkových vzdálenostech max. 1 m.

Ve srovnávacích měřeních a měřeních in situ bylo dosaženo také vysokých přesností a to i přesto, že byly výtužné prvky zabudované v extrémních polohách, které jsou defektní při stavbě úseků dálnic s cementobetonovým krytem.

6 Diskuze výsledků

Výsledky laboratorních měření prokázaly vysoké přesnosti při stanovení polohy kluzných trnů a kotev, 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 sad 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.

V laboratorních a in situ měřeních rozhraní CB desky s podkladní vrstvou georadarem, byla vždy zjištěna změna polaritní 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).

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 měření a vyhodnocovat polohu

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

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

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

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

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).

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.

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.

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.

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.

TP 233, 2011. *Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací* (technické podmínky Ministerstva dopravy ČR).

9 Přehled vlastních publikovaných prací autora

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. 96, 16 s., ISSN 0926-9851.

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.

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.

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: sborník příspěvků*. 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.-23.11.2011, [CD-ROM], Praha, Pragoprojekt, 8 s. ISBN 978-80-903925-2-6.

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.

10 Abstrakt v českém jazyce a anglickém jazyce

10.1 Abstrakt v českém jazyce

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 dráve 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.

10.2 Abstrakt v anglickém jazyce

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.