

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

ANALÝZA METOD PRO URČENÍ RYCHLOSTI
SIGNÁLU GPR

2018

Robin Kurel

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Analýza metod pro určení rychlosti signálu GPR

Robin Kurel

Bakalářská práce

2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Robin Kurel**
Osobní číslo: **D13262**
Studijní program: **B3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Název tématu: **Analýza metod pro určení rychlosti signálu GPR**
Zadávající katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Na základě rešerše literatury a vlastních zkušeností z měření a zpracování GPR dat vypracujte analýzu metod pro určení rychlosti signálu GPR.

Zhodnoťte současné metody, jejich nedostatky a omezení, a formulujte vlastní doporučení a závěry. Dále uveďte základní principy fungování této technologie. Popište Vámi používané zařízení a programové vybavení. V praktické části proveďte sérii experimentálních měření na laboratorních vzorcích. Proveďte vyhodnocení získaných dat.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury: **viz příloha**

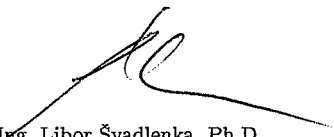
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladislav Borecký

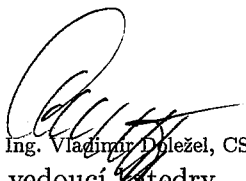
Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání bakalářské práce: **20. prosince 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2017**


doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

L.S.


doc. Ing. Vladimír Doležel, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 3. ledna 2017

Příloha zadání bakalářské práce

Seznam odborné literatury:

- [1] SAARENKETO, Timo. Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys. Oulu, 2006. University of Oulu.
- [2] EICHLER, Filip. Experimentální ověřování vlastností silničních materiálů [online]. Praha, 2013 [vid. 2014-03-09]. Disertační práce. ČVUT.
- [3] DANIELS, David J. Ground penetrating radar [online]. B.m.: Iet, 2004 [vid. 2015-08-11].
- [4] MATULA, RADEK. Nedestruktivní diagnostika konstrukcí vozovek pozemních komunikací georadarem [online]. Brno, 2013. Disertační práce. Univerzita Pardubice.
- [5] LOIZOS, Andreas. Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches. NDT & E international: independent nondestructive testing and evaluation [online]. 2007, roč. 40, č. 2, s. 147157. ISSN 0963-8695.
- [6] FAUCHARD, C. GPR performances for thickness calibration on road test sites. NDT & E international: independent nondestructive testing and evaluation [online]. 2003, roč. 36, č. 2, s. 6775. ISSN 0963-8695.
- [7] HUGENSCHMIDT, Johannes. Ground penetrating radar for road engineering. Materials and structures [online]. 1998, roč. 31, č. 3, s. 192194. ISSN 1359-5997.
- [8] SAARENKETO, Timo. Road evaluation with ground penetrating radar. Journal of applied geophysics [online]. 2000, roč. 43, č. 24, s. 119138. ISSN 0926-9851.
- [9] UDDIN, Waheed. An overview of GPR applications for evaluation of pavement thickness and cracking. In: Ground Penetrating Radar (GPR), 2014 15th International Conference on [online]. B.m.: IEEE, 2014, s. 925930 [vid. 2016-06-10].
- [10] LENNGREN, Carl A., Joergen BERGSTROM a Benny M. ERSSON. Using ground-penetrating radar for assessing highway pavement thickness</title> In: Cam NGUYEN, ed. [online]. 2000, s. 474483 [vid. 2016-09-19].
- [11] AL-QADI, I.L. Measuring layer thicknesses with GPR Theory to practice. Construction & building materials [online]. 2005, roč. 19, č. 10, s. 763772. ISSN 0950-0618.

Prohlášení autora

Prohlašuji:

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

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato bakalářská práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 15.5.2018

Robin Kurel

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladislavu Boreckému za neocenitelnou pomoc, cenné rady a umožnění zpracování této bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval kolegům Ing. Salihovi Serkanovi Artaganovi za spolupráci a obohacení zkušeností a rozvinutí mé angličtiny, Jaromírovi Bartošovi za pomoc při přípravě a realizaci měření.

Mé rodině za motivaci a podporu při studiu.

ANOTACE

Bakalářská práce je zaměřená na analýzu metod určení rychlosti signálu GPR a jejich porovnání. V teoretické části jsou popsány základní principy fungování, metody práce a nastavení GPR včetně popisu a analýzy metod pro zjišťování rychlosti průchodu signálu různými materiály. V praktické části se práce věnuje sérii experimentálních měření na laboratorních vzorcích umístěných v IBC v laboratořích VVCD. Tyto experimenty měly za cíl simulovat znečištění materiálu železničního šterkového lože a vliv tohoto jevu na změnu rychlosti šíření signálu GPR v tomto materiálu. Vyhodnocení jednotlivých měření bylo provedeno ve specializovaném programu ReflexW.

KLÍČOVÁ SLOVA

georadar, GPR, rychlost šíření, permitivita

TITLE

Analysis of GPR methods for velocity determination

ANNOTATION

The bachelor thesis is focused on the analysis of GPR signal velocity determination methods and their comparison. In the theoretical part there are described basic principles of operation, method of work and settings of GPR including description and analysis of methods for detecting velocity of signal transmission within different materials. The practical part of the thesis consists of a series of experimental measurements on laboratory samples placed in ICB's in VVCD laboratories. These experiments were aimed to simulate of ballast fouling and impact of this process to GPR velocity values shift. The evaluation of individual measurements were performed in the specialized ReflexW software.

KEYWORDS

georadar, GPR, velocity of radar signal, permittivity

OBSAH

0	ÚVOD.....	17
1	Úvod do problematiky GPR	19
1.1	Historie GPR.....	19
1.2	Aplikace GPR.....	21
2	Teorie GPR	22
2.1	GPR princip.....	22
2.2	Základní teorie EM vln	23
2.3	Sestava georadaru.....	26
2.4	Anténní systémy.....	27
2.4.1	Ground-coupled anténní systémy	29
2.4.2	Air-coupled anténní systémy	29
2.5	Sběr dat.....	29
2.6	Zpracování dat.....	31
2.6.1	Zpracování GPR dat.....	32
2.6.2	Interpretace GPR dat.....	32
2.6.3	Výstupy GPR dat	33
3	Metody určení rychlosti šíření signálu GPR.....	34
3.1	Reflected Wave Methods	34
3.2	Direct Wave Methods	35
3.3	Další způsoby pro určení rychlosti.....	38
3.4	Současný stav výzkumu dané problematiky	39
4	Popis dostupného HW a SW.....	43
4.1	Software GPR.....	43
4.2	Hardware GPR	44
5	Vlastní měření pomocí GPR sestavy KDS	46

5.1	Stanovení relativní permitivity materiálů pomocí metody RCM.....	48
5.2	Fáze měření A	49
5.3	Fáze měření B	50
5.4	Fáze měření C	51
5.5	Fáze měření D	52
5.6	Fáze měření E.....	53
5.7	Fáze měření F.....	54
6	Zpracování naměřených dat a tvorba výstupů	55
6.1	Porovnání rychlostí EM vln na měřených materiálech	55
6.2	Výsledky fáze A.....	57
6.3	Výsledky fáze B.....	59
6.4	Výsledky fáze C	61
6.5	Výsledky fáze D.....	63
6.6	Výsledky fáze E	65
6.7	Výsledky fáze F.....	67
6.8	Shrnutí výsledků experimentální části práce.....	69
7	Vlastní souhrn studované problematiky	74
8	Závěr	76
9	Použitá literatura	77
10	Přílohy.....	80

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Průzkum GPR na Nabataeo-římská oblast Wadi Ramm v Jordánsku	21
Obrázek 2 – Základní princip GPR při použití air-coupled antény	22
Obrázek 3 – Geometrie šíření vln	25
Obrázek 4 – Schéma systému GPR	26
Obrázek 5 – Sestava GPR pro silniční průzkum.....	27
Obrázek 6 – Různé GPR systémy.....	28
Obrázek 7 – Souřadnicový systém pro skenování	31
Obrázek 8 – Přehled zpracování GPR dat	32
Obrázek 9 – Radargram železniční trati	33
Obrázek 10 – Princip metody přímé vlny.....	35
Obrázek 11 – Schéma metody CMP s postupně oddalovanými anténami	36
Obrázek 12 – Schéma metody WARR	37
Obrázek 13 – Princip metody Transillumination.....	37
Obrázek 14 – 3D analýza GPR dat	42
Obrázek 15 – Software ReflexW	43
Obrázek 16 – Software K2 Fast Wave.....	43
Obrázek 17 – Použitá anténa	44
Obrázek 18 – DAD Fast Wace control Unit.....	45
Obrázek 19 – Totální reflektor vlevo, zhutňovací technika vpravo	46
Obrázek 20 – Použité materiály.....	46
Obrázek 21 – Graf křivky zrnitosti prachovitého písku	47
Obrázek 22 – Graf křivky zrnitosti jemného štěrku	47
Obrázek 23 – Měření s přidaným reflektorem.....	48
Obrázek 24 – Plně znečištěná fáze A.....	49
Obrázek 25 – Plně znečištěná fáze B.....	50
Obrázek 26 – Plně znečištěná fáze C.....	51
Obrázek 27 – Plně znečištěná fáze D.....	52
Obrázek 28 – Plně znečištěná fáze E	53
Obrázek 29 – Plně znečištěná fáze F	54
Obrázek 30 – Graf výsledků měřených rychlostí	56

Obrázek 31 – Vzorek A4	57
Obrázek 32 – Graf závislost rychlosti na znečištění fáze A pomocí zjednodušené metodě CRIM	58
Obrázek 33 – Graf závislost rychlosti na znečištění fáze A pomocí metody známé hloubky..	58
Obrázek 34 – Vzorek B3	59
Obrázek 35 – Graf závislost rychlosti na znečištění fáze B pomocí zjednodušené metodě CRIM	60
Obrázek 36 – Graf závislosti rychlosti na znečištění fáze B pomocí metody známé hloubky.	60
Obrázek 37 – Vzorek C10	61
Obrázek 38 – Graf závislost rychlosti na znečištění fáze C pomocí zjednodušené metodě CRIM	62
Obrázek 39 – Graf závislosti rychlosti na znečištění fáze C pomocí metody známé hloubky.	62
Obrázek 40 – Vzorek D10	63
Obrázek 41 – Graf závislost rychlosti na znečištění fáze D pomocí zjednodušené metodě CRIM	64
Obrázek 42 – Graf závislosti rychlosti na znečištění fáze D pomocí metody známé hloubky.	64
Obrázek 43 – Vzorek E6.....	65
Obrázek 44 – Graf závislost rychlosti na znečištění fáze E pomocí zjednodušené metodě CRIM	66
Obrázek 45 – Graf závislosti rychlosti na znečištění fáze E pomocí metody známé hloubky.	66
Obrázek 46 – Vzorek F10	67
Obrázek 47 – Graf závislost rychlosti na znečištění fáze F pomocí zjednodušené metodě CRIM	68
Obrázek 48 – Graf závislost rychlosti na znečištění fáze F pomocí metody známé hloubky ..	68
Obrázek 49 – Graf znázorňující výsledky měření pro šterk frakce 0-31,5 ze zjednodušený metody CRIM	69
Obrázek 50 – Graf znázorňující výsledky měření pro šterk frakce 0-31,5 z metody známé hloubky	70
Obrázek 51 – Graf znázorňující výsledky měření pro šterk frakce 31,5-63 ze zjednodušený metody CRIM	71
Obrázek 52 – Graf znázorňující výsledky měření pro šterk frakce 0-31,5 z metody známé hloubky	72

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Materiálový rozsah relativní permitivity	23
Tabulka 2 – Dosah antén s různou frekvencí dle GSSI	28
Tabulka 3 – Typické dielektrické hodnoty podloží a základových půd používaných v GPR ..	39
Tabulka 4 – Postup měření fáze A	49
Tabulka 5 – Postup měření fáze B	50
Tabulka 6 – Postup měření fáze C	51
Tabulka 7 – Postup měření fáze D	52
Tabulka 8 – Postup měření fáze E	53
Tabulka 9 – Postup měření fáze F	54
Tabulka 10 – Výsledky měření	56
Tabulka 11 – Výsledky fáze A	57
Tabulka 12 – Výsledky fáze B	59
Tabulka 13 – Výsledky fáze C	61
Tabulka 14 – Výsledky fáze D	63
Tabulka 15 – Výsledky fáze E	65
Tabulka 16 – Výsledky fáze F	67
Tabulka 17 – Výsledky experimentu	73

Seznam vzorců

(1) Relativní permitivita.....	23
(2) Rychlost průniku elektromagnetických vln	24
(3) Elektrická vodivost.....	24
(4) Vlnová délka	25
(5) Metoda o známé hloubce	34
(6) Metoda koeficientu odrazu.....	35
(7) Metoda Complex Refraction Index Method	38

Seznam zkratek

2D – dvourozměrný

3D – třírozměrný

CB kryt – cementobetonový kryt

CMP – common midpoint (metoda společného reflexního bodu)

COM – common offset method

CRIM – Complex Refraction Index Method

EM – elektromagnetický (electromagnetic)

FHWA – Federal Highway Administration

Finra – Finnish Road Administration

FOM – fixed offset method

GNSS – Global Navigation Satellite System (Globální družicový polohový systém)

GPR – georadar (ground penetration radar)

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

HMD – Hemispherical Butterfly Dipole

IBC – Intermediate Bulk Container (mezinárodní kontejner)

IDS – Ingegneria dei Sistemi (italský výrobce GPR antén)

JTSK – jednotná trigonometrická síť katastrální

MTA – multiple trace analysis

RCM – Reflection Coefficient Method

ReflexW – německý software pro vyhodnocení a interpretaci dat

SPR – surface-penetrating radar

SW – software

TTI – Texas Transportation Institute

TWT – two way travel time (čas mezi odesiláním a přijímáním odraženého signálu)

USA – United States of America

VOM – variable offset methods

VVCD – Výukové a výzkumné centrum v dopravě – Dopravní fakulta Jana Pernera

WARR – wide angle reflection and refraction

WGS 84 – World Geodetic System 1984

0 ÚVOD

Georadar je považován za nejrychleji rostoucí a jednu z nejvíce perspektivních průzkumových metod. V posledních letech je využíván jako spolehlivá diagnostická metoda při zkoumání jakéhokoli podloží, ale přesto není GPR dostatečně a plně využíván v potřebných oborech. Jedním z nejdůležitějších faktorů při práci s technologií GPR je znalost rychlosti šíření elektromagnetických vln, vysílaných a přijímaných systémem, ve zkoumaném prostředí. Pokud je tato rychlost známa, lze poté stanovit rozměry a hloubku detekovaných jevů. Přesné stanovení této rychlosti však není v běžných podmínkách snadné.

V bakalářské práci je představena základní problematika a principy fungování georadaru při stanovování rychlosti elektromagnetických vln, které georadar vysílá. Cílem je prozkoumání a porovnání těchto metod nejen na základě studia literatury, ale především na základě série experimentálního měření na vzorcích vybraných materiálů. Záměrem je využití těchto metod při analýze rychlosti průchodu GPR signálu materiálem železničního šterkového lože a tím získání údajů o stupni znečištění lože nedestruktivním způsobem. Železniční šterkové lože bylo modelováno vybranými vhodnými materiály uložených v IBC uložených pod variabilní konstrukcí vytvořenou pro tyto experimenty.

Práce je rozdělena do sedmi kapitol. Kapitoly 1 až 4 představují teoretickou část práce a kapitoly 5 až 7 obsahují praktické experimenty a jejich vyhodnocení.

V úvodní kapitole je stručné seznámení s historií a aplikací této relativně nové geofyzikální metody.

V druhé kapitole je bližší pohled do jeho fungování a základních principů a rovnic pro stanovení klíčových vlastností pro šíření a útlum elektromagnetických vln. V této kapitole je také blíže popsána sestava georadaru a druhy anténních systémů. Také se zde nachází principy sběru dat a jejich případné zpracování.

Ve třetí kapitole je bližší pohled na analýzu metod pro stanovení rychlosti šíření elektromagnetického signálu a případné rovnice, které tyto metody využívají. Jsou zde popsány a analyzovány metody, které umožňují stanovit rychlost průchodu elektromagnetického vlnění. Dále je zde provedena rešerše současného stavu výzkumu dané problematiky, ve které jsou uvedeny citované práce, které jsem považoval za přínosné pro návrh experimentální části bakalářské práce.

Ve čtvrté kapitole je představení použitého vyhodnocovacího softwaru ReflexW a softwaru pro řízení jednotky K2 FAST WAVE. Dále jsou tady představené použité hardwarové komponenty, pomocí kterých proběhl sběr dat, a to anténa HN-2000 a řídicí jednotka DAD Fast Wave Control Unit.

Kapitola pět zahrnuje experimentální měření se sestavou georadaru v laboratoři na zkoušených vzorcích. Je zde bližší seznámení s jednotlivými fázemi měření a nastínění proběhlého měření. V této kapitole byly naplněny základní cíle praktické části práce. Jednalo se o stanovení změny rychlosti signálu GPR vlivem postupného přidávání jemnozrného materiálu do kostry základního materiálu, což simulovalo znečišťování železničního šterkového lože materiálem podloží. Byly použity dva základní materiály představující materiál šterkového lože a dva materiály (a jejich kombinace) představující jednotlivé jemnozrné materiály podloží.

Kapitola šest představuje výsledky experimentální části této bakalářské práce s uvedením hodnot rychlostí signálu GPR zjištěných různými metodami v různých stupních znečištění.

V závěru práce je vložen vlastní souhrn studované problematiky.

1 Úvod do problematiky GPR

GEORADAR – Ground penetration radar (GPR), surface-penetrating radar (SPR), ale také Ground Probing Radar je považován za nejperspektivnější podpovrchovou průzkumnou metodu [1]. V České republice je spíše známý jen jako georadar. Je to relativně nové geofyzikální zařízení a patří do rychle se rozvíjející oblasti nedestruktivních průzkumných metod. V posledních desetiletích tato metoda zaznamenala obrovský pokrok v přechodu z analogové podoby do digitální a dnes již nabízí velikou škálu aplikací, které se zabývají od archeologií, kriminalistikou, zakládáním staveb, vyhledáváním inženýrských sítí až po průzkum podzemních objektů. Jedná se o diagnostické nedestruktivní a neinvazivní zařízení vydávající vysokofrekvenční elektromagnetické (EM) vlnění, které je schopno měřit jak v blízkosti povrchu, tak i v hloubkách několika desítek metrů [2].

Mezi hlavní přínosy georadaru náleží jeho nedestruktivní metoda průzkumu, mobilita a vytvoření 2D a 3D modelů, což umožňuje prozkoumat jakoukoli část snímaného vzorku. V oblasti liniových dopravních staveb umožňuje georadar měření konstrukcí bez jakýkoliv manuálních zásahů nebo nutnosti provádění výkopových prací. V drážním stavitelství se pomocí georadaru určuje stav a opotřebenění železničního spodku, případně podloží. V silničním stavitelství je v poslední době používán převážně při stanovení konstrukčních vrstev vozovky, při stanovení polohy kluzných trnů a kotev v cementobetonovém (CB) krytu vozovky. Jeho využití je různorodé podle oblasti užití a bude o nich psáno v dalších kapitolách.

1.1 Historie GPR

Za jednoho ze zakladatelů radarových systému je obecně považován Christian Hülsmeier, který získal světově první patent v radarové technologii roku 1904. První patent na systém určený k použití radaru fungující s kontinuální vlnou k vyhledávání podzemních objektů předložil Gotthelf Leimbach a Heindrich Löwy roku 1910. Patent pro systém používající radarové impulsy místo kontinuální vlny byl podán v roce 1926 Dr. Hülsenbeckem, což vedlo k lepšímu hloubkovému rozlišení. Jeden z prvních celosvětových radarových průzkumů provedl W. Stern v roce 1929 v Rakousku, když změřil hloubku ledovce [3]. Poté se už technologie nerozvíjela, než přišla 2.světová válka, během níž se radar rozvinul na detekci a sledování kovových objektů, letadel tak i lodí. Po ní se začalo toto odvětví rozvíjet a využívat této technologie během války ve Vietnamu k určení podzemních tunelů. [4]

Historie použití georadaru v oblasti dopravní infrastruktury se datuje do počátku 70. let minulého století. Podle výzkumu Moreyho v roce 1998 byl radar testován v tunelech a později pro průzkum mostovek organizace Federal Highway Administration (FHWA) v U.S.A. V roce 1977 Morey a Kovacs použili georadarové měření k detekci vlhkosti v konstrukčních materiálech, Cantor a Kneeter v roce 1978 testovali kontrolu mostovek. More a Erhard roku 1978 použili georadar pro detekci dutin pod betonovými deskami. [5]

Na začátku 90. let byla většina aplikací v Severní Americe zaměřena na měření tloušťky vozovky, detekci dutin pod betonovou vrstvou vozovky a zjišťování oblasti poruchy v mostovkách. Tyto výzkumy byly prováděny především s vysokofrekvenčními air-coupled anténami. [6]

První vozidlo nesoucí GPR systém pro pozemní komunikace bylo vyvíjeno společností FHWA v roce 1985. Na začátku 80. let minulého století byly zahájeny také první průzkumy v Kanadě a ve Skandinávii, kde byla použita k měření ground-coupled anténa. GPR byl dále využit ve Švédsku a v Dánsku, ale přestože výsledky byly slibné, tato metoda se dále nerozvíjela. Nicméně po prvních testech ve Finsku v roce 1986 se metoda stala běžným průzkumným nástrojem pro plánování údržby a rekonstrukce vozovek. Poté byla využita tato metoda pro kontrolu kvality vozovek. [5]

Podle studie publikované J. Hoobsem v roce 1993 byly provedeny první testy stavebního inženýrství s GPR ve Velké Británii v roce 1984. Od té doby byli publikované práce s výzkumem GPR zaměřeny na betonové konstrukce, testování vozovek a železniční průzkumy. Ve Francii byl kladen důraz na testování vozovek. V Nizozemsku bylo hlavní aplikací GPR určování tloušťky vrstev vozovky. [6]

V posledních letech byl zaměřen výzkum GPR na různé typy aplikací na silnicích s nízkou intenzitou dopravy, na zpevněném i nezpevněném povrchu. V roce 2004 Finra (Finnish Road Administration) zveřejnila první specifikaci sestavy pro použití na diagnostiku pozemních komunikací. Začal také výzkum na možnosti využití GPR výsledků automatizovanou silniční a stavební technikou. [6]

1.2 Aplikace GPR

GPR se využívá v následujících aplikacích:

Archeologické výzkumy – archeologové spoléhají na nástroje GPR a EM vodivosti jako na klíčové nástroje pro neinvazivní zkoumání podzemních objektů. Ať už je to mapování místa pro výkopy nebo lokalizace kulturních zdrojů pro jejich zachování [7].



Obrázek 1 – Průzkum GPR na Nabataeo-římská oblast Wadi Ramm v Jordánsku

Zdroj: [8]

Vojenské využití – aplikace GPR zahrnuje detekci nevybuchlé munice a detekci tunelů. Ve vojenských i v běžných využití se často používá GPR ve spojení s jinými dostupnými geofyzikálními technikami, jako jsou elektrická rezistivita a metoda EM indukce.

Využití v důlní činnosti – GPR se používá pro přesné lokalizování podzemních staveb před prováděním hlubinných vrtů. V hlubinných dolech je georadar neocenitelný pro detekci potenciálních geofyzikálních hrozeb, které mohou nastat v oblastech s přítomností geologických zlomů, smykových zón a poruch. [9]

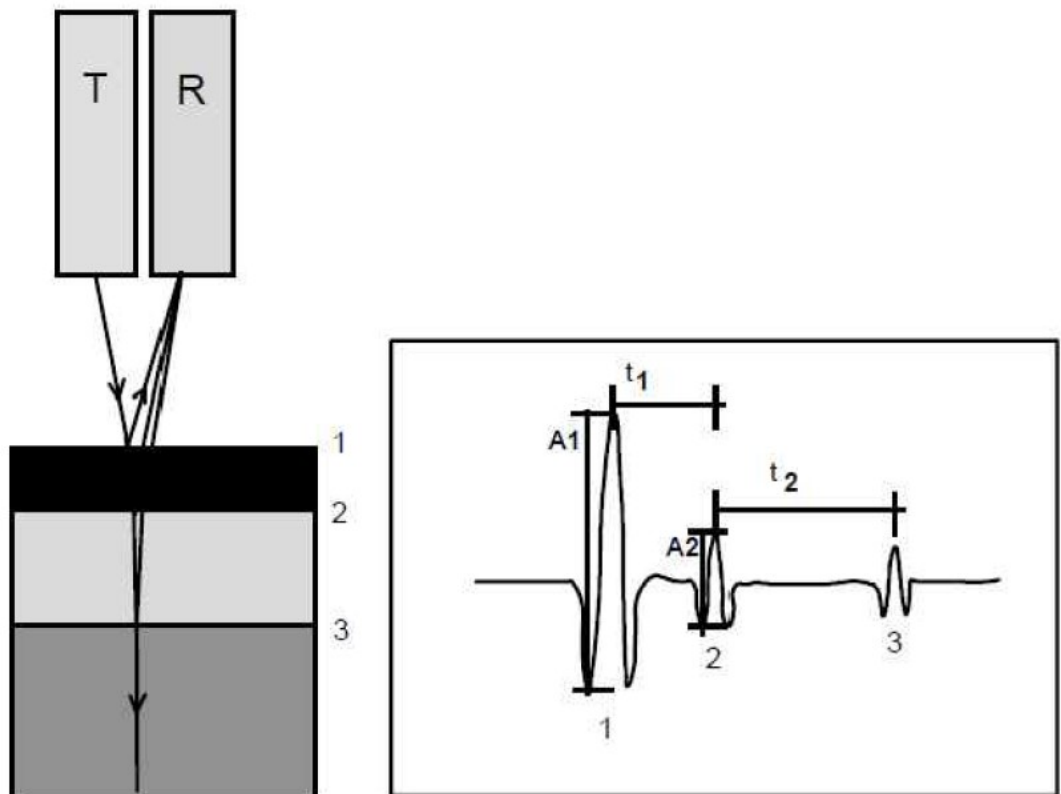
Forenzní vyšetřování – GPR je používán vyšetřovateli za účelem nalezení tajných pohřebišť a zakopaných předmětů. GPR pomáhá při hledání obětí, skrytých úkrytů, zbraní nebo důkazů [7].

Stavitelství – GPR se používá při stanovení konstrukčních vrstev vozovky, při stanovení polohy kluzných trnů a kotev v CB krytu vozovky, při detekování výztuže v betonu, při analýze mostovky pro zjištění trhlin, při posouzení podloží staveb atd.

2 Teorie GPR

2.1 GPR princip

Hlavní princip georadarové metody spočívá v opakovaném vysílání vysokofrekvenčního EM impulsu vysílací anténou do zkoumaného prostředí [10]. Odražený obraz impulsu je analyzován pomocí teorie jedno-dimenzionálního EM vlnění. Odražený impuls, zachycený přijímací anténou lze charakterizovat jeho amplitudou a časem záznamu, jež jsou závislé na EM vlastnostech diagnostikovaného materiálu. [11] Obrázek 2 představuje základní princip GPR s air-coupled anténou (Horn).



Obrázek 2 – Základní princip GPR při použití air-coupled antény

Zdroj: [12]

kde: T – vysílací anténa, R – přijímací anténa, 1 – rozhraní asfalt-vzduch, 2 – rozhraní vrstev krytu, 3 – rozhraní podkladních vrstev, A_1 – amplituda odrazu od asfaltu, A_2 – amplituda od podkladních vrstev, t_1 – čas ve vozovce, t_2 – čas v podkladní vrstvě

2.2 Základní teorie EM vln

GPR využívá vlnový charakter EM polí. Maxwellovi rovnice popisují chování elektrického a magnetického pole v závislosti na čase [5]. Relativní permitivita (ϵ_r) a magnetická permeabilita materiálu (μ) jsou společně s vodivostí materiálu (σ) primární vlastnosti, které ovlivňují přenos a odraz EM energie. V dokonalém dielektrickém prostředí nedochází ke ztrátám EM signálu, proto zde není žádný útlum.

Relativní permitivita (ϵ_r – dielektrická konstanta) – elektrická veličina charakterizující schopnost látky zesilovat elektrické pole, jejíž hodnota má vliv na rychlost šíření a útlum EM vlnění v materiálu. Je to podíl permitivity daného materiálu a permitivity vakua. Relativní permitivita je dána vztahem:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} ; [\text{F/m}] \quad (1)$$

kde: ϵ_r – relativní permitivita materiálu (dielektrická konstanta)

ϵ – permitivita materiálu

ϵ_0 – permitivita vakua, jejíž hodnota je $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m

Podle definice je dielektrická konstanta vzduchu 1 a typické hodnoty pro jiné materiály jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 – Materiálový rozsah relativní permitivity

Materiál	Rozsah ϵ_r
Vzduch	1
Portlandský cementový beton	6 - 12
Asfaltový beton	3 - 5
Štěrk	5 - 9
Písek	2 - 6
Kámen	6 - 12
Voda	80

Zdroj: upraveno z [13]

Dielektrická konstanta vody je mnohem vyšší, než ostatní uvedené materiály a proto je voda obecně nejvýznamnější dielektrickou hodnotou stavebních materiálů, což vysvětluje, proč je radar vysoce citlivý na vlhkost. S narůstajícím objemem vody se zvyšuje i celková dielektrická konstanta [13].

Zjednodušená rovnice **rychlostí** pro materiály s nízkou ztrátou EM vln je dána vztahem:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}; [\text{m/s}] \quad (2)$$

kde: v – rychlost šíření EM signálu prostředím (m/s)

c – rychlost světla ve vakuu ($2,977 \cdot 10^8$ m/s)

ϵ_r – relativní permitivita prostředí

Tato rychlost šíření se bude lišit podle složení a obsahu vody v médiu. Pro štrkové vrstvy se obvykle rychlost pohybuje v intervalu od 1,2 do $2,0 \cdot 10^8$ m/s. Pro porovnání, rychlost v čisté vodě je $3,33 \cdot 10^7$ m/s. Zjednodušená výše uvedená rovnice platí pouze pro materiály s nízkou vodivostí. U látek s vyšší vodivostí rychlost závisí na frekvenci. [13]

Vodivost (σ) – popisuje vlastnost materiálu vést část EM vlny [5]. Látky s dobrou vodivostí nabývají vyšších hodnot (suchý beton), naopak špatně vodící látky dosahují těch nižších (mokrý beton). Vodivost je dána vztahem:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}; [\Omega \cdot \text{m}] \quad (3)$$

GPR je nejužitečnější v nízko-ztrátových elektrických prostředích. Pokud je vodivost $\sigma = 0$, EM vlny proniknou do větší hloubky, protože zde není zapříčiněna žádná ztráta, útlum nebo rušení signálu a GPR dokáže zmonitorovat větší hloubky (10–100 m). Čím se vodivost zvyšuje, tím se zvyšuje i ztráta a útlum přijatého signálu a může znepříjemnit měření velmi malých hloubek (do 1 m).

Magnetická permeabilita (μ) – zvýšená permeabilita v materiálech tlumí účinek EM vln a činí tak GPR neefektivní. Nicméně, většina materiálu neobsahuje tak velké množství železa, niklu a jejich sulfidů/oxidů, aby měli zvýšenou permeabilitu. Ve většině případů je magnetický účinek malý a proto se často hodnota zjednodušuje na hodnotu volného prostoru $1,26 \cdot 10^{-6}$ H/m. [5]

Provozní frekvence GPR (ω) – EM vlny jsou charakterizovány frekvencí, kde nízké frekvence generují dlouhé vlny a vysoké frekvence vlny krátké.

Od toho se odvíjí **vlnová délka** (λ), která označuje vzdálenost dvou nejbližších bodů postupného periodického vlnění a je nepřímo úměrná frekvenci f , která vyjadřuje počet opakování za sekundu:

$$\lambda = \frac{v}{f}; [\text{m}] \quad (4)$$

kde: λ – je vlnová délka (m)

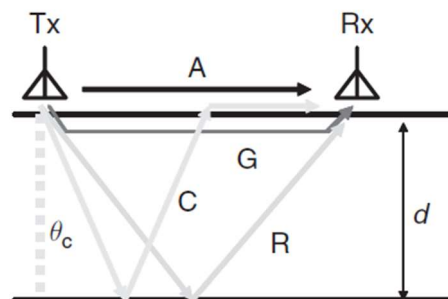
v – je rychlost světla ($2,977 \cdot 10^8$ m/s)

f – frekvence (1/s)

Dalšími základními jevy, které se objeví při horizontálním a vertikálním směru průchodu signálu skrze prostředí, jsou lom (refrakce) a odraz (reflexe), který se řídí principy optiky a to konkrétně Snellovým zákonem, Huygenovým principem a Fermatovým principem. [14]

Lom na rozraní dvou prostředí o jiných elektrických vlastnostech se řídí Snellovým zákonem. V případě, že vlnění přechází z prostředí hustšího do řidšího, dochází k lomu od kolmice (normály k rozhraní). S rostoucím úhlem dopadu se zvětšuje i úhel lomu a při kritickém úhlu dopadu je úhel lomu roven pravému úhlu. Kritický úhel je největší úhel, při kterém ještě nastává lom signálu. Při větším úhlu dopadu lom světla nenastává a signál se jen odráží. K lomu může dojít po strmém nebo vertikálním povrchu, což vede k prodloužení doby radarových vln, zkreslení hloubky, umístění, velikosti a geometrie objektu. [15]

Princip šíření odrazu a lomu jednotlivých vln na rozhraní různých materiálů a na povrchu je zjednodušeně znázorněn na obrázku 3. Na tomto principu jsou založeny tzv. reflected wave methods.



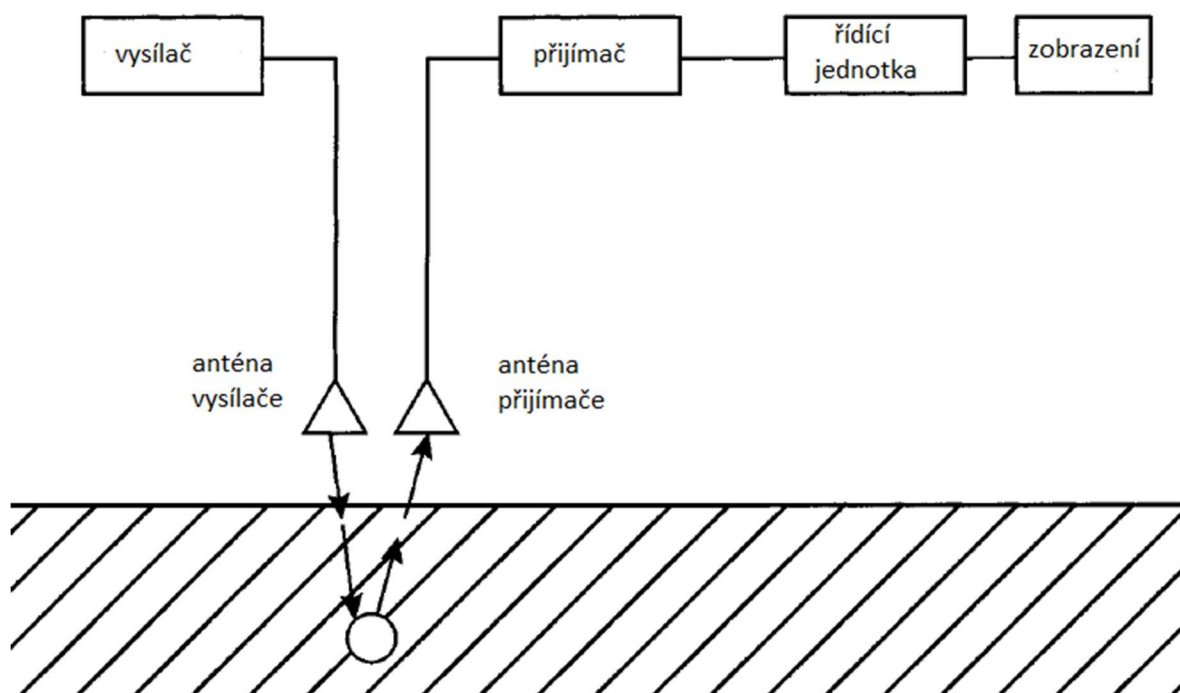
Obrázek 3 – Geometrie šíření vln vysílací anténou Tx a přijímací anténou Rx na povrchu. A je přímá nadpovrchová vlna, G je přímá podpovrchová vlna, C je lomená vlna kritického úhlu θ_c , R je odraz vln a d představuje hloubku vrstvy.

Zdroj: [5]

2.3 Sestava georadaru

Georadarová sestava se skládá ze tří hlavních částí, a to řídicího počítače, centrální jednotky a anténního systému. Řídicí počítač, převážně notebook, slouží k ovládání centrální jednotky a k zadání parametrů pro sběr dat pomocí softwaru (SW) k tomu určenému a k jejich uložení. Centrální jednotka vykonává sběr dat přes připojený koaxiální kabel k anténnímu systému. Georadarová aparatura může být buď jednokanálová nebo vícekanálová, což umožňuje měření s více anténními systémy najednou (měření ve více profilech nebo měření na jednom profilu s anténními systémy o různých frekvencích). Součástí georadarové aparatury obvykle bývá i distanční zařízení (survey wheel, odometr), které slouží pro měření ujeté vzdálenosti nebo definování kroku měření. V současné době aparatura umožňuje i připojení systému k určování polohy – Global Navigation Satellite System (GNSS) se záznamem dat v zeměpisném souřadném systému (WGS 84 – World Geodetic System 1984, JTSK – jednotná trigonometrická síť katastrální). [16]

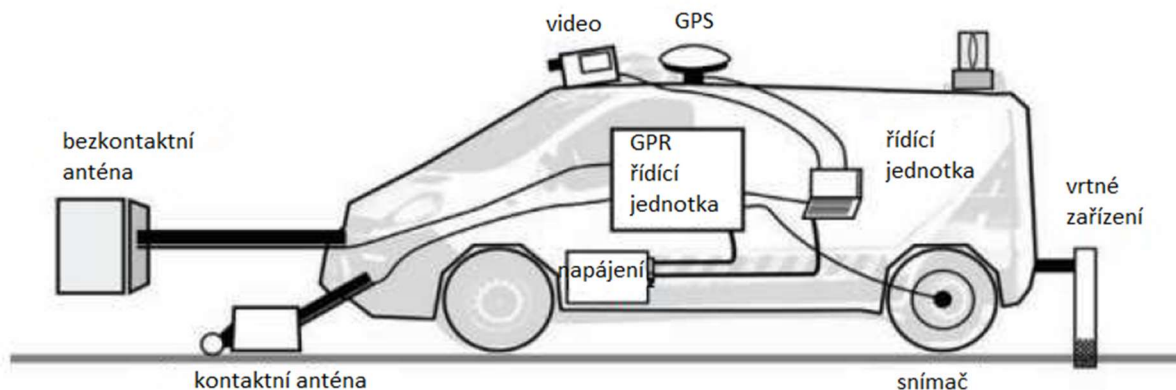
Na obrázku 4 je znázorněné schéma aparatury systému GPR.



Obrázek 4 – Schéma systému GPR

Zdroj: upraveno z [16]

Na obrázku 5 je znázorněn systém GPR pro silniční průzkum, kde je vidět patrný rozdíl mezi air-coupled (bezkontaktní) anténním a ground-coupled (kontaktním) anténním systémem.



Obrázek 5 – Sestava GPR pro silniční průzkum

Zdroj: upraveno z [12]

2.4 Anténní systémy

Anténní systémy se liší centrální vysílací frekvencí, která je obvykle od 20 MHz do cca 4,0 GHz. Podle problematiky, kterou řešíme se volí daný anténní systém. Pro georadarové měření na pozemních komunikacích se převážně používají anténní systémy s centrální vysílací frekvencí od 400 MHz do 2,0 GHz. Právě použitá frekvence definuje rozlišovací schopnost a hloubkový dosah systému. Anténní systémy lze rozdělit na kontaktní (ground-coupled) a bezkontaktní (air-coupled). [16]

Kontaktní anténní systémy neboli ground-coupled, jsou systémy, které se přikládají co nejbližší k měřenému povrchu prostředí. Bezkontaktní systémy neboli air-coupled, označované také jako „Horn“ jsou uzpůsobeny pro měření nad povrchem měřeného povrchu prostředí, obvykle do výšky 0,5 m, což je umožňuje zavěsit na vozidlo a měření provádět ve větších rychlostech [16].

Podle druhu měření se volí vhodná anténa. Pro antény s vysokou frekvencí je dosah minimální, v řádech decimetrů, oproti tomu je její rozlišení vysoké. Pro antény s nízkou vysílací frekvencí platí, že anténa má dosah v řádech metrů až desítek metrů, naopak její rozlišení je velice slabé, proto dokáže zachytit pouze objekty větších rozměrů.

Typický dosah antén s různou frekvencí, tak jak jej prezentuje jeden z největších dodavatelů firma Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI) je popsán v tabulce 2.

Tabulka 2 – Dosah antén s různou frekvencí dle GSSI

Centrální frekvence (MHz)	Maximální dosah (m)	Čas průchodu (ns)	Nejčastější aplikace
2600	0,4	8 - 15	betonové kce, polohy kabelů, výztuže
1600	0,5	10 - 15	betonové konstrukce, mostovky
1000	0,6	10 - 20	betonové kce, mělké zeminy, archeologie
900	1,0	10 - 25	tloušťky betonu, detekce vlhkosti
400	4,0	20 - 100	inženýrské sítě, detekce vlhkosti
270	6,0	50 - 200	inženýrské sítě, geotechnika
2,0 GHz	0,75	8 - 15	tloušťky vozovek a hodnocení silnic
1,0 GHz	0,9	10 - 20	dálnice, hodnocení mostovky

Zdroj: upraveno z [7]

Obrázek 5 představuje rozdílné GPR systémy používané při dopravních průzkumech. Foto (A) prezentuje vícekanálový 3D radar z Norska, (B) prezentuje 100 MHz GSSI ground-coupled anténu a 1,0 GHz impulsní radarovou anténu použitou v Texas Transportation Institute (TTI), (C) představuje kanadský silniční radarový systém, který má Horn anténu a vícekanálovou ground-coupled anténní soustavu a (D) multikanálovou air-coupled Horn anténní soustavu [12].



Obrázek 6 – Různé GPR systémy a konfigurace antény používané při dopravních průzkumech

Zdroj: [12]

2.4.1 Ground-coupled anténní systémy

Ground-coupled antény pracují v širokém rozsahu středních frekvencí od 80 MHz do 1500 MHz a průnik signálu v průzkumech dopravní infrastruktury může být až 20 – 30 m. Při získávání dat tyto antény udržují kontakt s měřeným povrchem nebo jsou zavěšené přímo nad ním. Pokud nejsou v kontaktu, musí se vzdálenost k povrchu podloží konstantně udržovat. Jasná výhoda ground-coupled systémů je lepší penetrace signálu a lepší vertikální rozlišení ve srovnání s air-coupled systémy, které umožňují tyto antény použít například k detekci trhlin v chodníku, kabelů a výztuží v betonových konstrukcích. Rychlost sběru dat ground-coupled systémů je obvykle 5-30 km/h. Předními komerčními výrobci ground-coupled antén používaných na silničních, letištních a železničních průzkumech jsou GSSI (USA), IDS (Ignegneria dei Sistemi, Itálie), Mala Geoscience (Švédsko), Penetradar Corporation (USA), UTSI Electronics (Velká Británie). [12]

2.4.2 Air-coupled anténní systémy

Air-coupled antény se stále častěji používají k vyhodnocování horních oblastí podloží. Pracují s poměrně čistými signály a mohou pracovat v blízkosti silnic či dálnic. Dále s bezporuchovými signály lze zpracovat výpočet jak na tloušťku vrstvy, tak i na vrstevné dielektrikum. Air-coupled anténní systémy jsou impulzní radarové systémy a obecně pracují v rozmezí od 500 MHz do 2,5 GHz, ale nejběžnější centrální frekvence je 1,0 GHz. Jejich hloubkové pronikání signálu je typické od 0,5 m do 0,9 m. Během sběru dat jsou tyto antény zavěšeny v rozmezí 0,3 - 0,5 metrů nad měřeným povrchem. Většina typů air-coupled antén jsou antény TEM Horn, ale v silničních průzkumech byly použity i antény typu HMD (Hemispherical Butterfly Dipole). Výhodou je, že antény jsou umístěné výše, než ground-coupled antény, což umožňuje provádět měření na silnicích v rychlosti až 100 km/h a bez přerušení provozu. V současné době jsou antény typu Horn vyráběny společnostmi jako jsou GSSI, Penetradar, Pulse Radan and Wavebounce (USA). Antény typu butterfly dipol vyrábějí Radar Team Sweden Ab., Euradar. [12]

2.5 Sběr dat

Georadarové průzkumy konstrukcí jsou procesy, kde se doporučuje blízka spolupráce mezi zákazníkem a dodavatelem měření GPR. Při běžných silničních průzkumech by měl být definován přesný počet měření. U dvoupruhových silnic je zpravidla prováděn jeden měřicí podélný profil (vnější stopa vozidla). [12]

Sběr dat má některá omezení a měření může být ovlivněno podle počasí, obzvláště během srážek se měření nedoporučuje. Měřený povrch by neměl být mokrá ani vlhký, neměli by se objevovat ani vlhké skvrny, protože by to mohlo znehodnotit měření. Dále by se měla teplota měřeného povrchu pohybovat nad 0 °C.

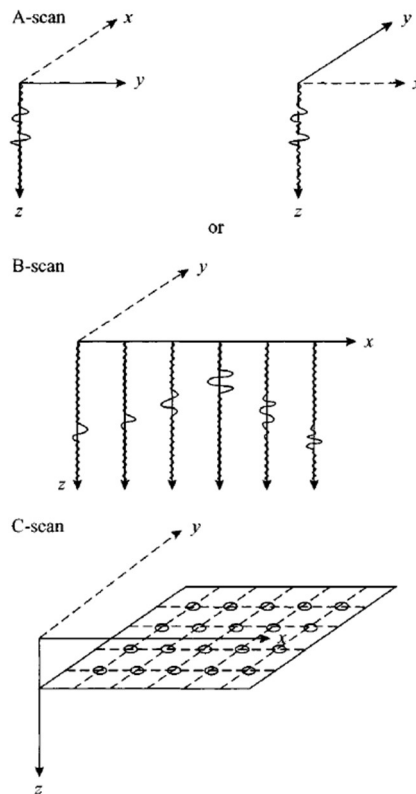
Za účelem shromažďování kvalitních dat by měla být rychlost měřícího vozidla nebo pomocného vozíku co nejnižší, bez přílišného zásahu do provozu. Proto se volí taková rychlost, aby nedocházelo k omezení dopravy. Výsledky testů prováděné TTI při různých rychlostech do 70 km/h ukázaly, že rychlost nemá žádný významný vliv na amplitudu odrazu. Přesnost průzkumu ovlivňuje i drsnost povrchu. Výzkumu Davise z roku 1994 naznačuje, že drsnost povrchu snižuje amplitudu odraženého signálu. Spagnoliniho výzkum z roku 1997 o rozptylu EM vln na drsném povrchu, při kterém dospěl k závěru, že tento jev může nastat až při zpracování dat. [12]

Sběr dat je možné provést v jednom bodě, kde se měří pouze jedna stopa signálu a takovýto záznam se nazývá A-Scan. V profilu s opakujícími se po sobě jdoucími měřeními s konkrétním posouváním antény podél měřeného profilu se záznam nazývá B-Scan. V takovémto případě se vysílač a přijímač současně pohybuje podél měřeného profilu s vzájemným odstupem. B-Scan je vlastně vertikální řez konstrukcí. Každý řádek představuje jeden vzorek na sloupci, který představuje jednotlivou stopu. V poslední době se čím dál častěji provádí měření na velkých plochách, a to buď opakovaným měření s konstantní roztečí, nebo pomocí anténních soustav. Takovéto 3D měření se potom nazývá C-Scan a umožňuje snadnější interpretaci dat a identifikaci cílů. [15]

Na obrázku 7 jsou znázorněny v souřadnicovém systému amplitudy A-Scanu, B-Scanu a C-Scanu. Znázorněna je i vizualizace množství měření pro potřebný sken.

Při sběru dat při silničních průzkumech dochází velmi často ke špatnému umístění měřeného vzorku ke skutečnému místu naměření vzorku, proto je důležité těmto chybám předejít. To se dá udělat následujícími způsoby:

- 1) použití snímače, který kontroluje interval snímaných vzorků
- 2) přidání značky k datům GPR u známých referenčních bodů
- 3) pomocí zařízení GNSS [12]



Obrázek 7 – Souřadnicový systém pro skenování

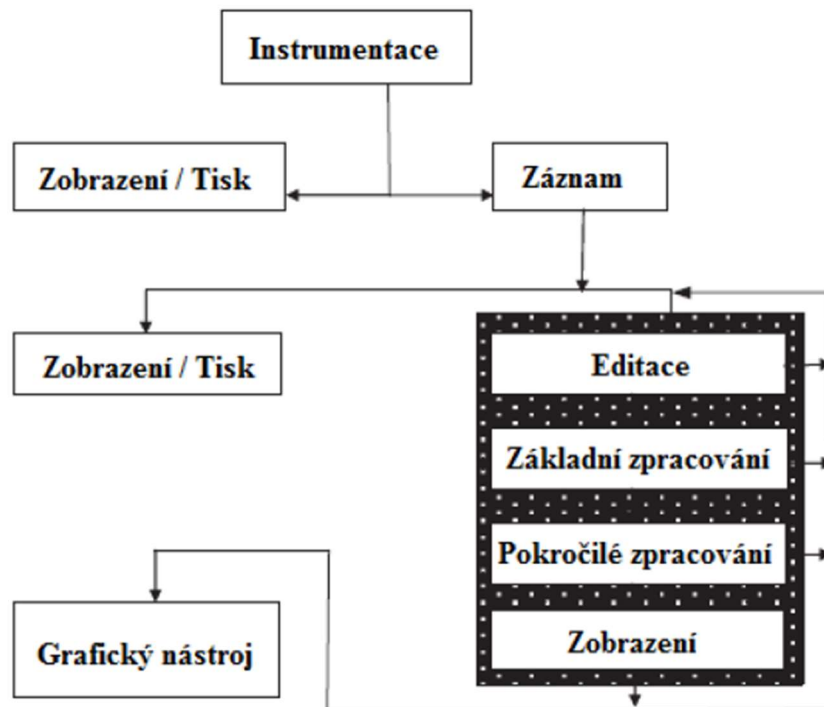
Zdroj: [16]

2.6 Zpracování dat

Při zpracování surových GPR dat lze úkony rozdělit do čtyř fází [15]:

- 1) Předzpracování, zpracování dat
- 2) Interpretace
- 3) Vizualizace
- 4) Tvorba výstupů

Typický průběh zpracování GPR dat, který se zaměřuje na oblast editace dat, základní zpracování, pokročilé zpracování a interpretace dat je znázorněn na obrázku 8.



Obrázek 8 – Přehled zpracování GPR dat

Zdroj: [15]

2.6.1 Zpracování GPR dat

Specializované SW nabízejí velké množství funkcí/algorithmů sloužících ke zpracování/filtraci surových dat. Během této práce byl použit SW ReflexW, který umožnil zpracovat data do požadovaného formátu tak, aby se dala jednoznačně stanovit rychlost šíření EM vln. Počátečním krokem při zpracování dat byla filtrace za účelem odstranění nízkofrekvenčního šumu. Dále se nastavila pozice odrazu od povrchu na nulový čas. Další krok sloužil k odstranění šumu v pozadí a šumu, vytvářeného takzvaným sekundárním povrchovým odrazem.

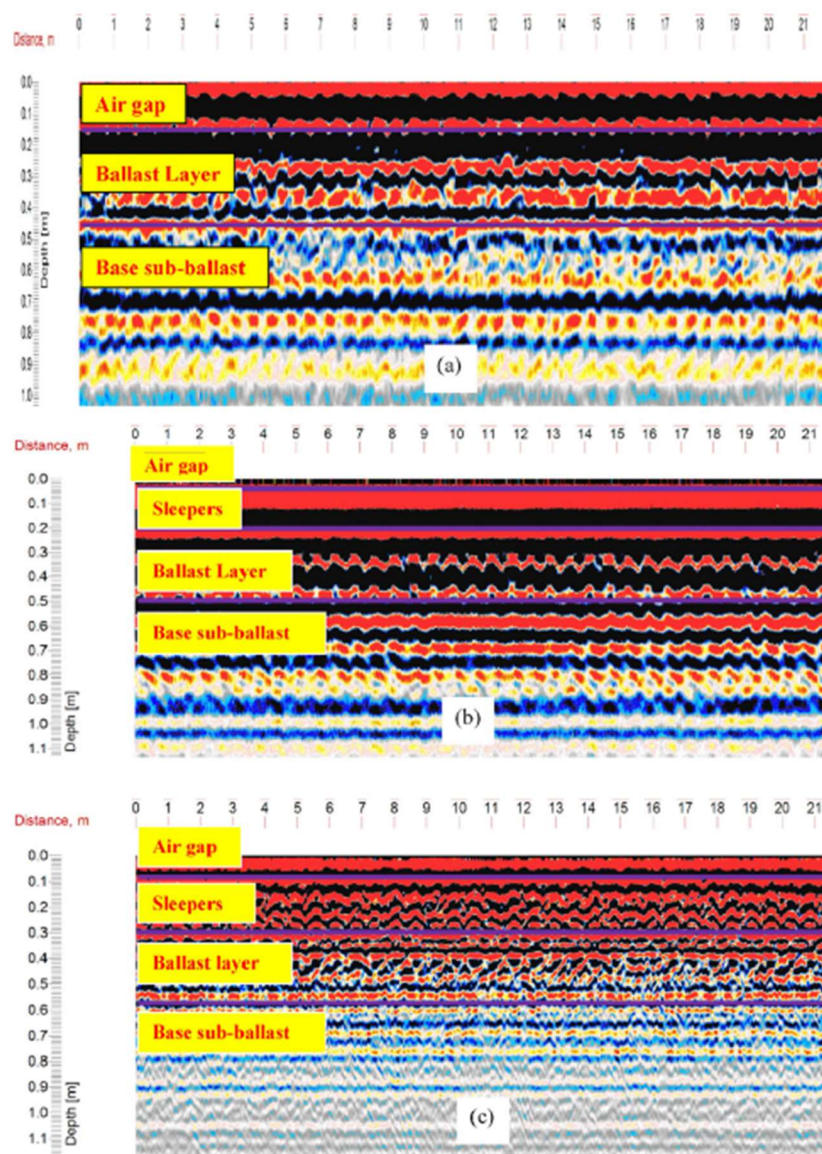
2.6.2 Interpretace GPR dat

Součástí georadarového zpracování je interpretace GPR dat. Pro správnou interpretaci je nutná dobrá znalost zkoumaného prostředí, cílů výzkumu a okolních vlivů. Profily by měly být interpretovány hned po dokončení měření, z důvodu případného přeměření. Mnoho principů je odvozeno z postupů určených pro reflexní seismiku. Je nutná kontrola terénu, která se provádí po georadarovém měření, a to formou vrtů, výkopů nebo se provede porovnání s jinými geofyzikálními metodami. Nejeefektivnější je, když tyto kontroly proběhnou ihned po sběru GPR dat. [15]

2.6.3 Výstupy GPR dat

Primárními výstupy GPR dat jsou surová data v podobě časového řezu, s výskytem amplitudy EM vln, který se předělá pomocí SW na hloubkový řez. V tomto hloubkovém řezu již vzniká představovaný obraz zkoumaného podloží/řezu, kde se dá již určit předmět měření (zájmu). Tyto záznamy se dají uložit do textových souborů, které lze dále prezentovat ve formě tabulek nebo jiných grafických formátech. Konkrétní výstupy dat této bakalářské práce budou popsány v kapitole 6.

Na obrázku 9 je pro ilustraci uveden radargram znázorňující tentýž úsek železniční trati při použití 100 MHz GPR antény (a), 500MHz GPR antény (b) a 800 MHz GPR antény (c).



Obrázek 9 – Radargram železniční trati

Zdroj: [17]

3 Metody určení rychlosti šíření signálu GPR

V průzkumech GPR může být čas, mezi odesláním a přijímání odraženého signálu (*two way travel time* – TWT), nebo hloubka stanoveny pouze tehdy, pokud je známa rychlost radarových vln. Terénní testy lze provádět na objektech, kde máme odměřenou hloubku a podloží ukončený totálním reflektorem, kde lze EM vlnění změřit přímo. Tyto testy mohou být sjednoceny s korelací známých stratigrafických vzorků s radarovým odrazem, aby bylo možné potvrdit přesnost měření rychlosti za účelem stanovení rychlostních odchylek s hloubkou. [18]

Při určení rychlosti šíření EM signálu existují dvě skupiny metod, které využívají buďto odražené vlny (Reflected Wave Methods) nebo vlny přímé (Direct Wave Methods).

3.1 Reflected Wave Methods

Nejpřesnější a nejjednodušší metoda měření rychlosti GPR signálu je identifikovat odraz vzniklý odražením od objektů, artefaktů nebo zónami zájmu, které se vyskytují v odměřených hloubkách. Tyto metody umožňují stanovit průměrnou rychlost radarových vln z povrchových antén na změřenou hloubku. [18]

Metody používající odražené vlny využívají odeslanou energii odraženou zpět od objektu nebo stratigrafického rozhraní o známé hloubce. V tomto případě je nutné provést několik měření pro zvýšení přesnosti určení rychlosti signálu s připraveným reflektorem (ocelový plech) v různých známých hloubkách. Jakmile je známa rychlost signálu, je možné dopočítat hloubku objektu nebo rozhraní pomocí rovnice (5). [19]

$$d = v * \frac{t}{2}; [\text{m}] \quad (5)$$

kde: d – hloubka objektu nebo stratigrafické vrstvy

v – rychlost signálu

t – TWT radaru na cíl a od cíle

Metoda odražených vln může být použita buď v jednom bodě, kde je měřena pouze jedna stopa – A-Scan, nebo na profilech s opakujícím se po sobě jdoucím měřením s konkrétním posouváním antény podél měřeného profilu čili B-Scan.

V případě B-Scanu se vysílač a přijímač současně pohybuje po měřeném profilu s konstantním vzájemným odstupem. Tato metoda se jmenuje profilování nebo FOM (*fixed offset method*), nebo také COM (*common offset method*). [19]

Další metoda na principu odražených vln se jmenuje metoda koeficientu odrazu (Reflection Coefficient Method – RCM), která je použitelná pouze pro air-coupled antény. Tato metoda používá porovnání amplitudy odraženého signálu na rozhraní vzduchu/povrchové vrstvy s amplitudou na rozhraní totálního reflektoru a vzduchu. Tímto způsobem se stanoví dielektrická konstanta materiálu pro povrchovou vrstvu podle rovnice 6. [19]

$$\varepsilon_a = \left[\frac{1 + \frac{A_1}{A_m}}{1 - \frac{A_1}{A_m}} \right]^2 \quad (6)$$

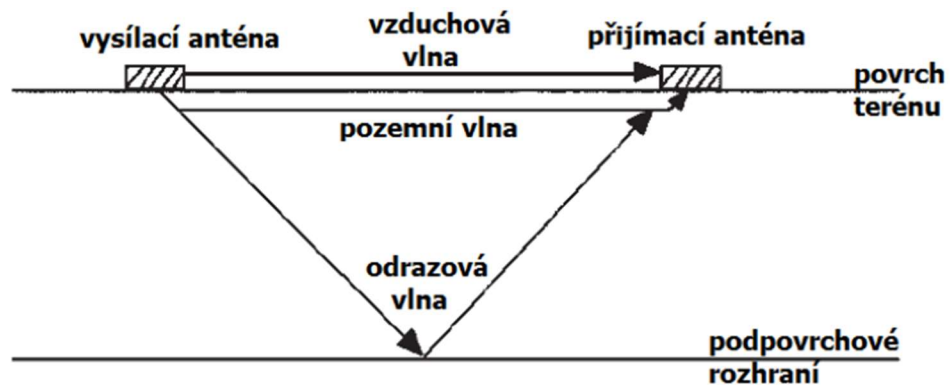
kde: ε_a – dielektrická hodnota povrchové vrstvy

A_1 – amplituda odrazu od povrchu

A_m – amplituda odrazu od kovového plechu

3.2 Direct Wave Methods

Metody pracující s přímými vlnami, jak je znázorněno na obrázku 10, využívající také vlny, které se pohybují z vysílače přímo přes materiál do přijímače.

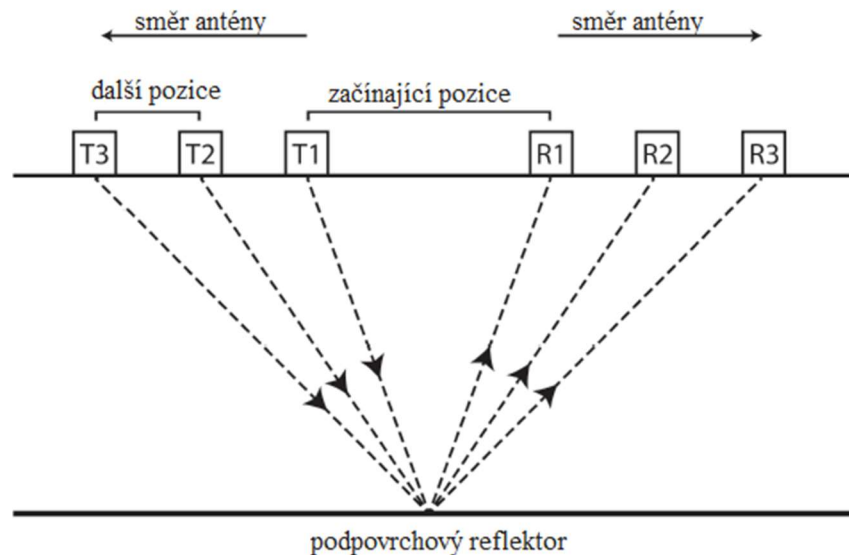


Obrázek 10 – Princip metody přímé vlny

Zdroj: [15]

Mezi tyto metody patří metoda širokého úhlu odrazu/refrakce Wide Angle Reflection/Refraction (WARR) a metoda společného reflexního bodu Common Midpoint method (CMP).

Při metodě CMP je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem proměnná. Kdy vzdalováním přijímače a vysílače z jednoho bodu dostaneme dostatečné množství časových odečtů příchodu odražené vlny k výpočtu relativní permitivity prostředí resp. rychlosti šíření EM vlnění v prostředí [16]. CMP metody jsou užitečné při odhadování změn rychlosti v blízkosti povrchu, ale méně cenné při určování rychlosti ve větších hloubkách. [19] Obrázek 11 znázorňuje schéma metody CMP.

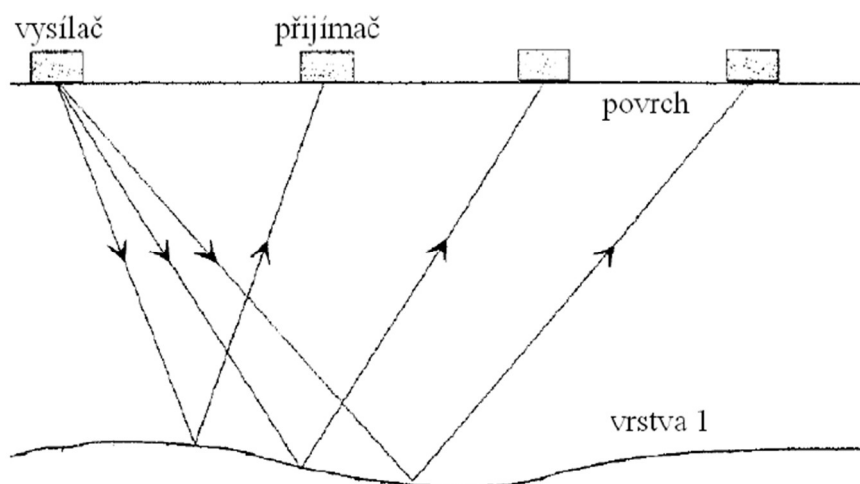


Obrázek 11 – Schéma metody CMP s postupně oddalovanými anténami; kde T1, T2, T3 je vysílající anténa a R1, R2, R3 je přijímací anténa

Zdroj: upraveno z [20]

Podobnou metodou je metoda WARR, na obrázku 12, která využívá širokouhlé reflexe a refrakce. Jejím principem je pevně fixovaná vysílací anténa a přijímací anténa se pohybuje od vysílače. Variantou této metody je měření pomocí dvoukanálové aparatury s dvěma anténními systémy, kdy se na jednom anténním systému registruje normálový odraz od rozhraní a současně se registruje odražený signál od stejného rozhraní ve druhém anténním systému, který je od prvního anténního systému v určité vzdálenosti. Výhodou je, že rychlost šíření EM vlnění ve vrstvě lze zjišťovat kontinuálně na měřeném profilu, nutné je zde však použít vícekanálové aparatury. [16]

Ve většině případů se metody CMP a WARR používají k určení rychlosti v podpovrchových vrstvách.

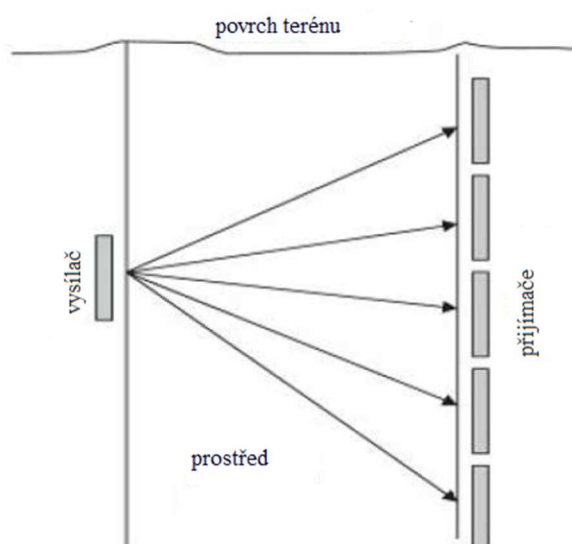


Obrázek 12 – Schéma metody WARR

Zdroj: [21]

Výše uvedené metody, vzhledem ke své povaze, jsou známé jako VOM (variable offset methods). Vzhledem k tomu, že se v uvedených metodách používá více jak jedna stopa, jsou tyto metody nazývány jako MTA (multiple trace analysis). [19]

Další méně běžnou metodou je Transillumination [5]. Znázorněna na obrázku 13, kde vysílač a přijímače antény jsou umístěny směrem k sobě na opačných stranách zemního tělesa mezi dvěma výkopy. Nevýhodou výše uvedené metody je, že není možné stanovit přesnou cestu signálu GPR. [15]



Obrázek 13 – Princip metody Transillumination

Zdroj: [15]

3.3 Další způsoby pro určení rychlosti

Další způsoby, jak se dá určit rychlost šíření EM vlnění v prostředí:

- kalibračním měřením/metodou známé hloubky – kdy se vypočte rychlost šíření EM vlnění na základě skutečně zjištěných hloubek nebo tloušťek, např. z vývrtního času příchodu odraženého impulsu od jednoznačně identifikovaného rozhraní či objektu dle vývrtního. [16]
- pomocí metody Complex Refraction Index Method (CRIM) – která se týká objemových dielektrických vlastností směsi a díky jednotlivým známým dielektrickým permitivitám materiálu, které směs obsahuje, vypočteme výslednou relativní dielektrickou hodnotu směsi pomocí rovnice (7). Tato metoda CRIM byla použita pro početní ověření provedených experimentů na směsích materiálu se zjištěnými permitivitami.

$$\sqrt{\varepsilon_T} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{100} \sqrt{\varepsilon_{A,i}} \quad (7)$$

kde: ε_T – relativní permitivita směsi

$\varepsilon_{A,i}$ – relativní dielektrická permitivita složky i

A_i – objemové procento směsi složky i

- rychlostní analýzou naměřených dat – pomocí korelace vypočtených difrakčních hyperbol o známých parametrech s projevy v radarovém záznamu. [16]
- použitím tabelární hodnoty relativní permitivity prostředí, příklady její hodnoty pro vybrané materiály jsou uvedeny v tabulce 3 pro frekvence 100 MHz. [16]

Tabulka 3 – Typické dielektrické hodnoty podloží a základových půd používaných v GPR

materiál	relativní permitivita	rychlost [m/ns]
vzduch	1	0,3
glaciální led	3,6	0,16
PVC	3	0,17
asfalt	3 - 5	0,17 - 0,13
beton	4 - 11	0,15 - 0,09
granit	4 - 7	0,15 - 0,11
pískovec	6	0,12
břidlice	5 - 15	0,13 - 0,08
vápenec	4 - 8	0,15 - 0,11
basalt	8 - 9	0,11 - 0,9
nasycené písky	19 - 24	0,07 - 0,06
zeminy	4 - 30	0,15 - 0,06
voda	81	0,03

Zdroj: [16]

3.4 Současný stav výzkumu dané problematiky

V této kapitole bylo vybráno několik studií ze studované oblasti, ve kterých jsou mimo jiné navrženy nové postupy či vylepšení stávajících metod pro určování rychlosti signálu GPR v materiálech.

Jedna z prvních studií zabývající se metodou určení rychlosti GPR přišel Reppert a kol. v roce 1999, kde k výpočtu rychlosti využívali Brewsterovi úhly. Tato metoda určuje poměr relativní dielektrické konstanty na rozhraních, kde dochází ke změně rychlosti. Aplikace Brewsterovi úhlové analýzy byla v dané době prostředkem k určení rychlosti v médiu pod nejhlubším zaznamenaným reflektorem. [25]

Rok na to Zhang Anxue a kol. představili svůj vlastní nový postup měření nazvaný F-K migrační metoda. Svůj pokus provedli na totožných předmětech ze dvou různých materiálu, které byly uloženy pod vrstvou půdy. Zjistili, že v homogenním prostředí lze tento postup použít k odhadu rychlosti EM vln v podloží a ke zlepšení rozlišení zobrazení. [27]

Dalšího přínosu, který se zaměřil na přesnost určení TWT rychlosti a TWT hloubky odvozené od CMP metody, dosáhl v roce 2002 výzkum Eisena a kol. Poprvé byly zkoumány rychlosti přímým srovnáním s profily vypočítanými z údajů o vysokém rozlišení dielektrického profilování v ledovém jádru. Jejich výsledky ukazují, že průzkumy CMP jsou užitečnou technikou pro určení hloubky detekovaných odrazů v kombinaci s běžnými měřeními. [24]

Se zajímavým nápadem na nový GPR algoritmus využívající zpomaleného signálu prostředím a útlumového zobrazování v řezech za použití aproximace dráhy EM vlny přišel v roce 2007 Gloaguen a kol. Analýza naměřených i známých dat ukazuje, že tato metoda vede k přesnému stanovení fyzikálních vlastností materiálu vývrtnu a poskytuje uživateli odhad nejistot spojených s tomografickým procesem. [33]

Když Novais a kol. v roce 2008 studovali metodu konečných diferencí, vytvořili velké množství modelů, na kterých provedli numerické experimenty. V těchto modelech získali dokonalou shodu mezi teoretickými predikcemi a číselnými výsledky. Také dokazují účinnost výpočetního algoritmu. Aplikací GPR dat bylo demonstrováno, že přesun obrazových vln lze použít k odhadu modelů s bočně se měnícími rychlostmi. Obdržené výsledky potvrzují konečnou změnu času detekce s nulovou odchylkou. [28]

V roce 2010 Lang Weifeng a Lin Mingxing zveřejnili studii, ve které přišli s novou metodou pro odhadování rychlosti GPR. Navržená metoda určuje rychlost vln porovnáním tvaru stop v radargramu s množinou uměle vytvořeného hyperbolického obrazu v šabloně. Rychlost, která odpovídala nejlepší shodné šabloně je odhadnutá rychlost GPR. Experiment jim ukázal, že mohou přesně vypočítat hloubku a lze dobře zaměřit radarový obraz s odhadovanou rychlostí. [29]

S další analýzou rychlosti přišel G. Hamanna a J. Tronicke v roce 2011. Navrhli využití spektrální analýzy rychlosti šíření vln vycházející z multi-offset nebo CMP metody k určení rychlosti GPR vln. Jejich metoda je podobná analýze rychlosti odražených vln CMP, kde jsou rychlostní spektra vypočítána s použitím hyperbolických trajektorií. [26]

V roce 2014 se na základě z předchozích GPR měření navrhla nová metoda pro predikci rychlosti vln. Tato metoda je založena na tvaru stop zaznamenaných v radargramu a algoritmu určeného pro posuzování vlivu shluků částic materiálu a ten může předpovědět přesnou vlnovou rychlost. Z výsledků experimentů vyplývá, že přesnost výpočtů této metody je vyšší než běžné metody. [31]

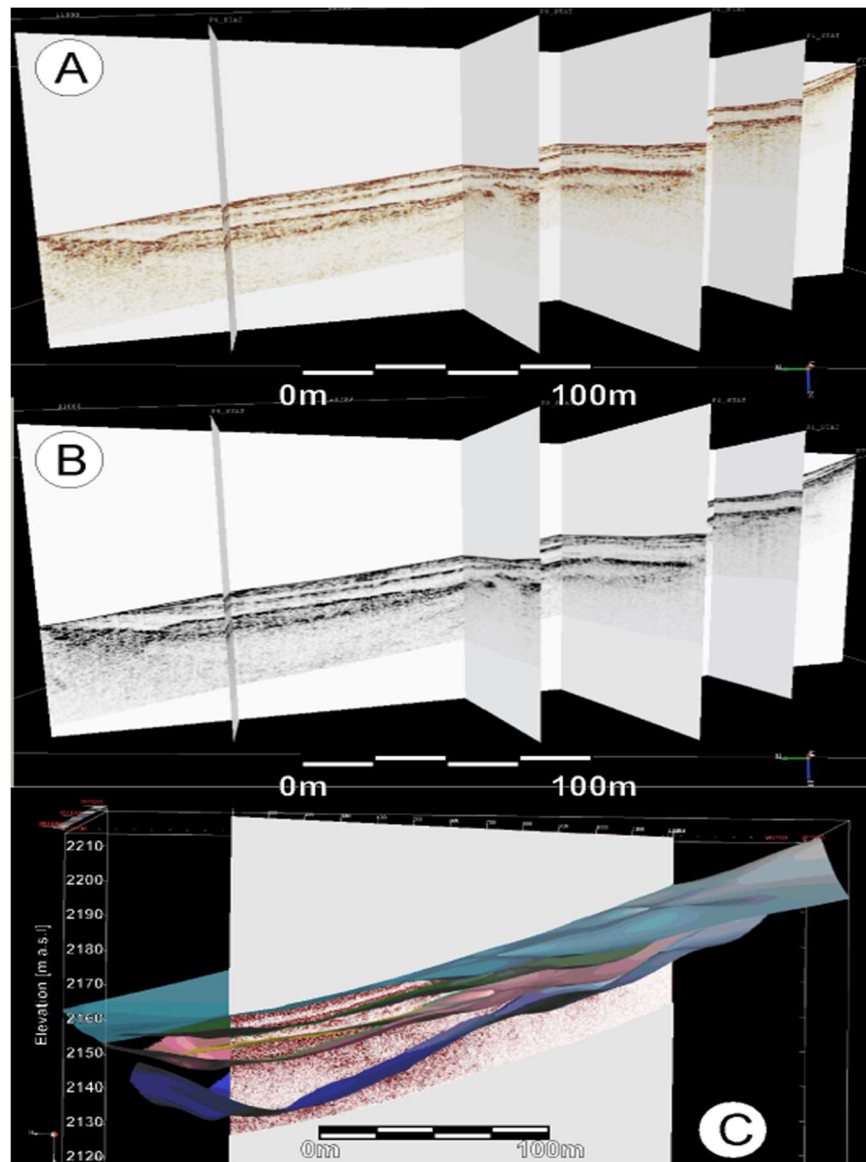
Zajímavého zjištění docílil De Pue a kol. v roce 2016, když zkoušeli vyhodnotit rychlost signálu s air-coupled anténou pomocí CMP s malým posunem antény. Technika byla původně vyvinuta pro seizmické průzkumy, za předpokladu malých rozestupů antén v jednotlivých krocích. Díky silnému lomu signálu na povrchu s malou zkoumanou hloubkou se ukázalo, že tato metoda není vhodná pro air-coupled antény. Z toho důvodu byla navržena změna

metody, která by odpovídala zaznamenanému lomu signálu na povrchu. Provedené experimenty demonstrovali, že tradiční metoda se prokázala jako neustále nadhodnocována, zatímco modifikovaná metoda výsledky výrazně zlepšila. [22]

Další studie ze stejného roku se zabývala chybami určením rychlosti, které jsou definovány jako odchylky mezi rychlostmi měření získaných pod různými úhly a hodnotami získaných v kolmém řezu vzhledem k orientaci objektu při common-offset nastavení antény. Rychlost GPR vln byla měřena z boku v libovolných polohách u ocelových tyčí pomocí jednoduché trigonometrie v poloautomatizovaném interním programu. Tím bylo zjištěno, že snížením úhlů při měření způsobí plošší hyperbolický odraz a související chyby rychlosti mohou být až o 30 % vyšší v případě úhlu 45° . [26]

Ve stejném roce vyšla studie zaměřující se na vývoj nového algoritmu pro odhad rychlosti šíření EM vlny se stíněnou GPR anténou s vysokou frekvencí 2 GHz. Pro sběr dat byla použita common-offset metoda s pevnou vzdáleností vysílače / přijímače a odpovídající trigonometrií. Stejně jako u většiny SW se metoda podobá metodám vycházejícím z posuzování tvaru hyperbolických obrazů. Metoda byla ověřena v konkrétních médiích a porovnána s hyperbolami naměřenými na konkrétních vzorcích. Výsledky ukazují, že chyby tohoto nového algoritmu jsou výrazně nižší než u hyperbolické metody. [30]

Další příspěvek je o vyvinutí metody pro předběžný odhad hustoty ledovce v italských Alpách pomocí metody COM od Forteho a kol. Byla zavedena technika k odhadu elektrické permitivity pro posuzovanou hloubku. Vycházeli z analýzy odražených amplitud pro výpočet sérií koeficientu odrazu. Navrhovaný postup byl testován ve východním ledovci Mt. Canin a ověřen přímým měřením hustoty sněhu, která byla získána pomocí vzorků shromážděných z ručně vykopaných jam, a s tabulárními hodnotami. Vypočtené hodnoty se blížily údajům získaných přímým měřením. Navíc tato analýza může pomoci najít a lokalizovat pozůstatky morény přikryté ledem. Obrázek 14 znázorňuje výsledky tohoto výzkumu při mapování ledovce Mt. Canin. [23]



Obrázek 14 – 3D analýza GPR dat, kde (A) jsou amplitudy odrazu, (B) charakteristické vlastnosti soudržnosti ledu, (C) znázornění povrchu firnů/ledů

Zdroj: [23]

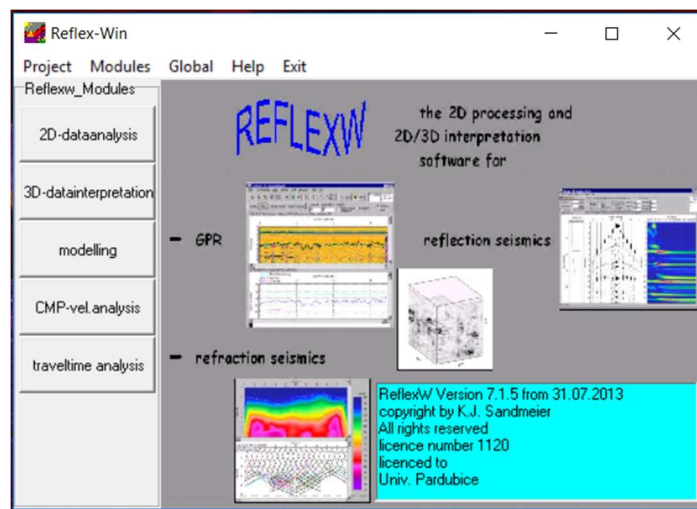
Georadarová technologie ukázal svoje široké uplatnění a velký potenciál v roce 2005 se řešil problém, jak zaměřit dno naleziště železitého písku (*ironsand*) na pobřeží Bayuranu. Jelikož je tento typ písků vysoce magnetický, ukázalo se měření s GPR jako jediná volba, neboť konvenční geofyzikální metody se ukázaly jako nevhodné a neúspěšné. Průzkum využíval 100 MHz anténu a CMP metodu na jejímž základě byla vytvořena nová metoda pro určování rychlosti EM vlnění železitého písku. Nakonec se rychlost vln stanovená z laboratorních měření shodovala s rychlostmi analýzy dle CMP. [32]

Uvedené a další postupy jsou často s výhodou používány v moderních programech pro post-processing GPR dat jako je např. ReflexW, který byl použit v této práci.

4 Popis dostupného HW a SW

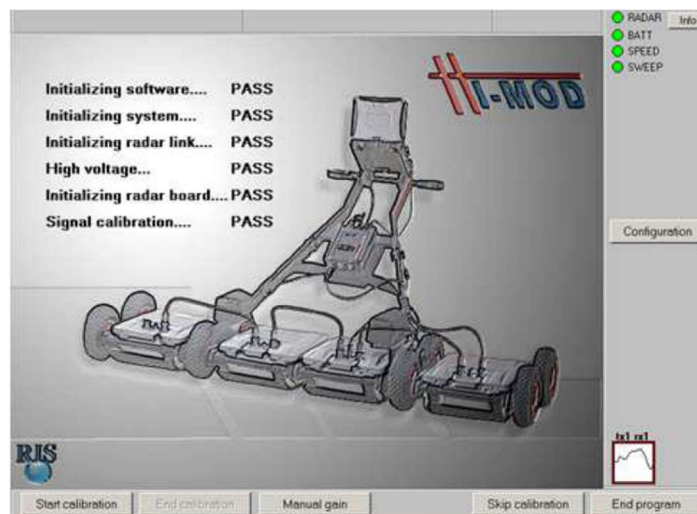
4.1 Software GPR

V této práci byl použit SW ReflexW od německé firmy Sandmeier Software na obrázku 15. Je to velmi rozsáhlý program pro zpracování GPR dat. Umožňuje zpracovat data ze seizmických průzkumů a navíc i zpracovává data z GPR jádrových vrtů. Součástí programu jsou také různé moduly odpovídající různým aplikacím a další analýze naměřených dat. Jedněmi z těchto modulů jsou modul pro modelování EM pole a modul pro zpracování a vizualizaci 3D seizmických dat.



Obrázek 15 – Software ReflexW

Pro sběr dat, tvorbu výstupů a pro zpracování dat byl použit software, který sjednotil práci antény, řídicí jednotky a notebooku. Je to K2 FAST WAVE, který je na obrázku 16.



Obrázek 16 – Software K2 Fast Wave

4.2 Hardware GPR

Součásti sestavy GPR byly popsány v kapitole 2.

Při měřeních byla použita anténa od výrobce IDS dodaná jako součást GPR sestavy. Jedná se o Horn air-coupled anténu HN-2000 (na obrázku 17) s centrální frekvencí 2GHz.



Obrázek 17 – Použitá anténa

Technické specifikace poskytnuté výrobcem:

anténa HN-2000

- Typ antény: stíněná dipólová (air-coupled)
- Počet kanálů: 1
- Centrální frekvence: 2GHz
- Rozměry: 60x22x40 cm
- Váha: 7 kg
- Provozní vlhkost: < 90 %
- Odolnost proti vodě (IP 65)
- Provozní teplota: -40 °C až 50 °C

Součástí systému K2 FW je řídicí jednotka **DAD Fast Wave Control Unit** (na obrázku 18). Ta je odpovědná za řízení antény a digitalizaci získaných radarových dat. Níže jsou uvedeny technické specifikace poskytnuté výrobcem:

DAD Fast Wave Control Unit

- Frekvence pulzů: 400kHz
- Rychlost skenování: až 4760 skenů za sekundu (@ 128 vzorků na sken)
- Dosah: až 9999ns
- Počet A/D převodníků: 2
- Frekvence sběru dat (A/D clock): 400kHz
- Vzorkování: 16bit
- Rozlišení: více než 5psec
- Počet vzorků na sken: 128-8192 (1 kanál); 128-4196 (2 kanály); 128-2048 (4 kanály)
- Porty: anténa 1, anténa 2, odometr, LAN, baterie
- Maximální počet antén: 2 standart; až 8 TR s rozšiřujícím boxem; až 4 TR DUAL F
- Počet kanálů: 8
- Rozměry: 22x17x5,5 cm
- Váha: 1,5 kg
- Odolnost proti prachu a vodě (IP 64)
- Průměrná spotřeba: < 10 W



Obrázek 18 – DAD Fast Wace control Unit

5 Vlastní měření pomocí GPR sestavy KDS

Měření bylo provedeno na materiálech v IBC kontejneru a v plastovém kontejneru s odstupem antény 30 cm od povrchu. Každé GPR měření proběhlo v pěti stopách o 512 vzorcích na stopu, aby se dala vyloučit případná náhodná krátkodobá rušení. Proběhlo celkem 65 měření na vzorcích. Před vložení materiálu se na dno umístil ocelový plech jako totální reflektor (obrázek 19 vlevo). Po vložení materiálu či další znečišťující vrstvy se povrch vždy rovnoměrně upěchoval sty ranami zhutňovačem (obrázek 19 vpravo). Poté proběhlo měření.



Obrázek 19 – Totální reflektor vlevo, zhutňovací technika vpravo

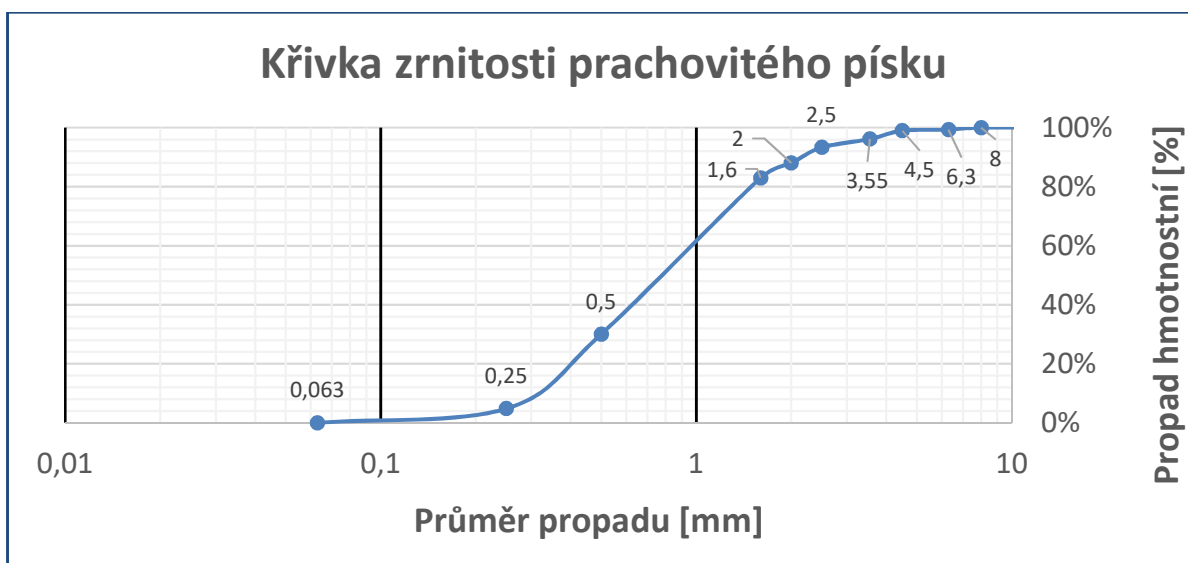
Při měření byli použity materiály: prachovitý písek (a), štěrk frakce 5-10 mm (b), štěrk z vápence frakce 0-31,5 mm (c), železniční kamenivo z žulového štěrku frakce 31,5-63 mm (d). Znečištění bylo pískem, štěrkem frakce 5-10 a jejich mixem s přírůstkem 10 %. Sběr GPR dat proběhlo právě v každé úrovni znečištění.



Obrázek 20 – Použité materiály

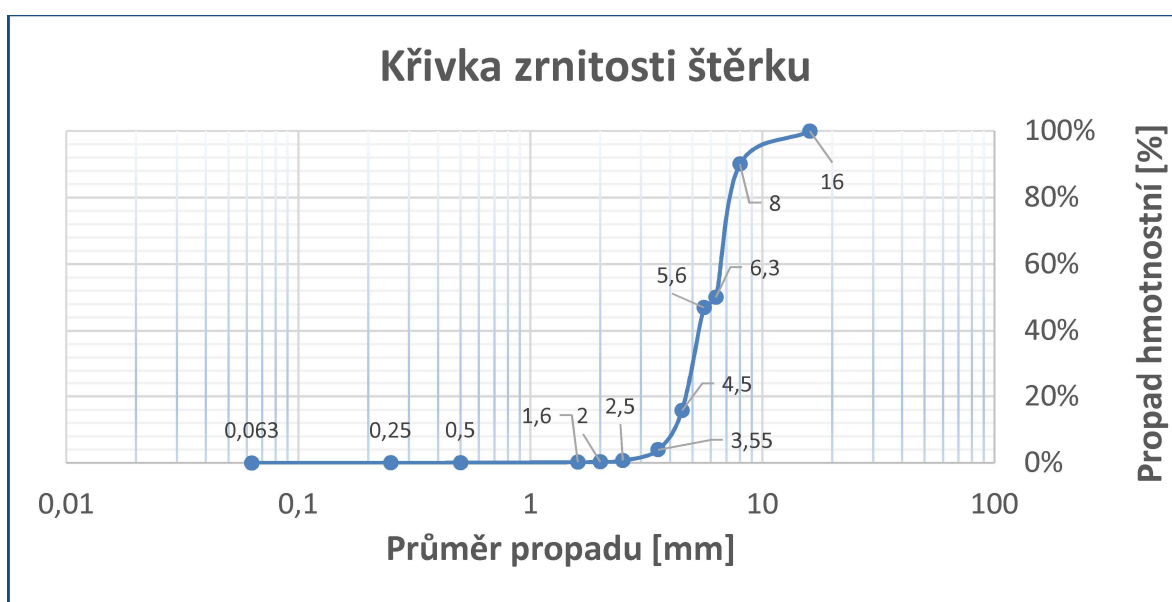
Při výpočtu mezerovitosti šterku (podle ČSN EN 1097-3) bylo použito laboratorní vědro o známém objemu, jako v nedávné studii podle Benedetto a kol. [34] Pro zvýšení přesnosti byl tento test opakován třikrát pro oba testované šterky, kde pro šterk frakce 0-31,5 mm byla zjištěna průměrná hodnota 38,8 % a pro šterk frakce 31,5-63 mm vyšla průměrná hodnota mezer 40,1 %. Obě tyto hodnoty jsou v souladu s tabulárními hodnotami vápence a žulového šterku.

Při prosévacích zkouškách *in situ* pro prachovitý písek vyšla křivka zrnitosti:



Obrázek 21 – Graf křivky zrnitosti prachovitého písku

Křivka zrnitosti jemně zrnitého šterku vyšla:



Obrázek 22 – Graf křivky zrnitosti jemného šterku

Následující kroky představují shrnutí všech měření:

1. Umístění ocelového plechu jako totálního reflektoru na dno kontejneru
2. Naplnění kontejneru základním materiálem na požadovanou výšku
3. Přidáním znečišťujícího materiálu v krocích po 10 % dle zjištěné mezerovitosti na požadovanou úroveň znečištění
4. Použití zhutňovače pro dokonalejší smísení a rovnoměrné zhutnění přidaného znečišťujícího materiálu
5. Sběr GPR údajů za každou úroveň
6. Vyprázdnění, vyčištění nádoby a případné vysušení materiálu
7. Pokračování v krocích 1. až 5. pro další úroveň znečišťujícího materiálu
8. Pokračování v krocích 1. až 7. pro další základní materiál

5.1 Stanovení relativní permitivity materiálů pomocí metody RCM

V této části se naplnil kontejner štěrkem frakce 0-31,5 mm s totálním reflektorem, pak následovalo měření. Poté se na povrch materiálu přidal druhý, horní reflektor (obrázek 23) a proběhl sběr dat. Toto se opakovalo pro každý dostupný materiál, tzn. písek, štěrk frakce 5-10 a štěrk frakce 31,5-63. Vyhodnocená data se dosadila do rovnice (6) a spočetla se relativní permitivita každého materiálu.



Obrázek 23 – Měření s přidaným reflektorem

5.2 Fáze měření A

Následující tabulka popisuje posloupnost měření ve fázi A, kde probíhalo znečištění štěrku frakce 0-31,5 písekem po 10 % objemové hmotnosti. Celková výška materiálu v kontejneru byla naměřena 50 cm.

Tabulka 4 – Postup měření fáze A

Krok měření	Obsah kontejneru
A0	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 0 % písku
A1	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 10 % písku
A2	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 20 % písku
A3	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 30 % písku
A4	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 40 % písku
A5	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 50 % písku
A6	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 60 % písku
A7	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 70 % písku
A8	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 80 % písku
A9	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 90 % písku
A10	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 100 % písku

Na obrázku 24 je štěrku frakce 0-31,5 plně znečištěn písekem.



Obrázek 24 – Plně znečištěná fáze A

5.3 Fáze měření B

Fáze měření B se uskutečnilo ve stejné nádobě, se stejnou výškou materiálu tj. 50 cm, kde probíhalo znečištění štěrku frakce 0-31,5 štěrkem frakce 5-10.

Tabulka 5 – Postup měření fáze B

Krok měření	Obsah kontejneru
B0	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 0 % štěrkem frakce 5-10
B1	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 10 % štěrkem frakce 5-10
B2	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 20 % štěrkem frakce 5-10
B3	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 30 % štěrkem frakce 5-10
B4	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 40 % štěrkem frakce 5-10
B5	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 50 % štěrkem frakce 5-10

Na obrázku 25 můžeme vidět znečištění štěrku frakce 0-31,5 štěrkem 5-10, které se nedostalo přes 50 % své objemové hmotnosti jako tomu bylo u písku. I přes důkladné hutnění se nám nepodařilo materiály více smísit.



Obrázek 25 – Plně znečištěná fáze B

5.4 Fáze měření C

Ve fázi C měření proběhlo ve stejné nádobě, kde se po 10 % objemové hmotnosti znečišťoval štěrk frakce 0-31,5 pomocí mixu, který se skládal z půlky (po 5 % stoupala) hmotnosti štěrku frakce 5-10 a z půlky (po 5 % stoupala) hmotnosti písku. Výška materiálu byla změřena 50 cm.

Tabulka 6 – Postup měření fáze C

Krok měření	Obsah kontejneru
C0	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 0 % mixu
C1	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 10 % mixu
C2	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 20 % mixu
C3	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 30 % mixu
C4	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 40 % mixu
C5	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 50 % mixu
C6	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 60 % mixu
C7	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 70 % mixu
C8	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 80 % mixu
C9	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 90 % mixu
C10	štěrk frakce 0-31,5 znečištěný 100 % mixu

Na obrázku 26 je štěrk frakce 0-31,5 plně znečištěn mixem štěrku frakce 5-10 a písku.



Obrázek 26 – Plně znečištěná fáze C

5.5 Fáze měření D

U měření fáze D se změnil hlavní materiál. Kontejner byl naplněn štěrkem frakce 31,5-63 a postupně byl znečišťován pískem po 10 % hmotnosti. Z důvodu omezeného množství štěrku byla výška změřena pouze na 45 cm.

Tabulka 7 – Postup měření fáze D

Krok měření	Obsah materiálu
D0	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 0 % písku
D1	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 10 % písku
D2	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 20 % písku
D3	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 30 % písku
D4	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 40 % písku
D5	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 50 % písku
D6	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 60 % písku
D7	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 70 % písku
D8	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 80 % písku
D9	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 90 % písku
D10	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 100 % písku

Na obrázku 27 je štěrk frakce 31,5-63 plně znečištěn pískem.



Obrázek 27 – Plně znečištěná fáze D

5.6 Fáze měření E

Ve fázi E se měření uskutečnilo ve stejné nádobě, se stejnou výškou materiálu tj. 45 cm, kde probíhalo znečištění šterku frakce 31,5-63 šterkem frakce 5-10.

Tabulka 8 – Postup měření fáze E

Krok měření	Obsah kontejneru
E0	šterk frakce 31,5-63 znečištěný 0 % šterkem frakce 5-10
E1	šterk frakce 31,5-63 znečištěný 10 % šterkem frakce 5-10
E2	šterk frakce 31,5-63 znečištěný 20 % šterkem frakce 5-10
E3	šterk frakce 31,5-63 znečištěný 30 % šterkem frakce 5-10
E4	šterk frakce 31,5-63 znečištěný 40 % šterkem frakce 5-10
E5	šterk frakce 31,5-63 znečištěný 50 % šterkem frakce 5-10
E6	šterk frakce 31,5-63 znečištěný 60 % šterkem frakce 5-10

U tohoto vzorku se nám podařilo dostat na hodnotu 60 % procent znečištění díky větší mezerovitosti šterku s vyšší frakcí. Obrázek 28 znázorňuje kontejner šterku frakce 31,5-63 znečištěn šterkem frakce 5-10 na 60 %.



Obrázek 28 – Plně znečištěná fáze E

5.7 Fáze měření F

Ve fázi F měření proběhlo ve stejné nádobě, kde se po 10 % hmotnosti znečišťoval štěrk frakce 31,5-63 pomocí mixu, který se skládal z půlky (po 5 % stoupala) hmotnosti štěrku frakce 5-10 a z půlky (po 5 % stoupala) hmotnosti písku. Výška materiálu byla změřena 45 cm.

Tabulka 9 – Postup měření fáze F

Krok měření	Obsah kontejneru
F0	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 0 % mixu
F1	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 10 % mixu
F2	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 20 % mixu
F3	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 30 % mixu
F4	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 40 % mixu
F5	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 50 % mixu
F6	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 60 % mixu
F7	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 70 % mixu
F8	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 80 % mixu
F9	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 90 % mixu
F10	štěrk frakce 31,5-63 znečištěný 100 % mixu

Na obrázku 29 je štěrk frakce 31,5-63 plně znečištěn mixem štěrku frakce 5-10 a písku.



Obrázek 29 – Plně znečištěná fáze F

6 Zpracování naměřených dat a tvorba výstupů

Při provádění výše uvedených fází experimentů se spoléhalo pro určení rychlosti na metodu známé hloubky. Ta se vypočítala pomocí rovnice (5) a měla poskytnout spolehlivý údaj o rychlosti šíření EM vln. Při této metodě zjišťování rychlosti však může docházet velice často k nepřesným výsledkům. Dalo by se říci, že když se udělá 1 % odchylka při určování hloubky materiálu, vznikne dvojnásobná chyba při stanovení rychlosti [19]. Proto je velice důležité tento postup opakovat víckrát než jednou.

Pro výpočet relativní permitivity použitých materiálů byla použita také metoda RCM, kde proběhlo měření povrchu vrstvy materiálu a poté ještě s plechem na tomto povrchu. Odečetly se hodnoty amplitud na obou měřených rozhraní. Tyto hodnoty se vložily do rovnice (6) a vyšla výsledná relativní permitivita základních použitých materiálů při této práci. Z relativní permitivity se pomocí rovnice (2) dostala rychlost stanovená pomocí metody RCM. Přesnost této metody je ovšem závislá na drsnosti povrchu, respektive frakci kameniva.

Ke stanovení výsledné rychlosti šíření v základních materiálech, se kterou se dále pracovalo, byl použit aritmetický průměr mezi hodnotami získanými z metody známé hloubky a z vyjádřené rychlosti pomocí RCM.

V dalších částech experimentu, kdy bylo nutné stanovit rychlosti šíření signálu jednotlivých fázích podle kapitoly 5, byla použita zjednodušená metoda CRIM, kde se využily právě hodnoty stanovené výše popsáním způsobem. Tato metoda je přímo určená ke stanovení relativní permitivity ve vzorcích složených z více materiálů. V této metodě byla permitivita stanovena tak, že pro základní materiál je uvažována jak zrna kameniva, tak mezery vyplněné vzduchem. Při znečišťování základního materiálu byl vzduch postupně nahrazován jemnozrnným materiálem. Došlo tedy ke změně poměru objemů složek s různou permitivitou a tedy ve výsledku ke změně celkové permitivity vzorku. Je zřejmé, že permitivita celistvého materiálu je jiná než permitivita zrnitého materiálu stejného původu.

6.1 Porovnání rychlostí EM vln na měřených materiálech

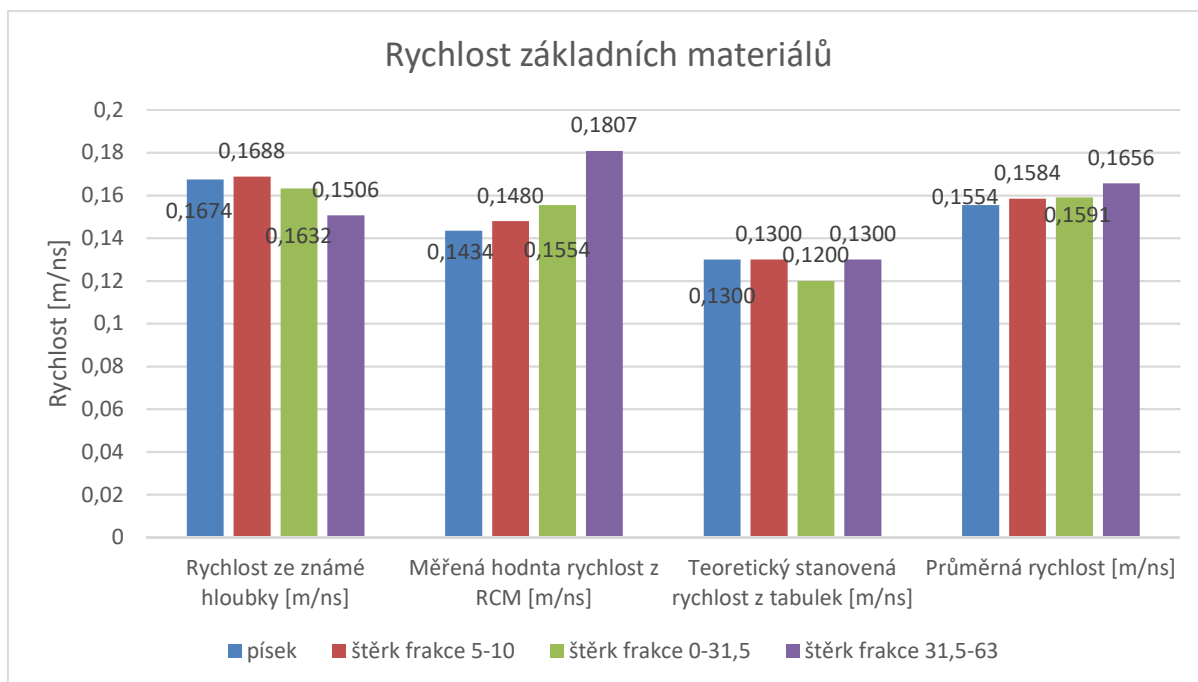
V prvním kroku se vyhodnotili výsledky naměřených dat. Z výsledků měření se stanovil čas průchodu, který se dosadil spolu se změřenou hloubkou do rovnice (5) pro výpočet rychlosti pomocí času a známé hloubky. Jako další se pomocí metody RCM určila relativní permitivita prostředí podle rovnice (6), ze které se dosadil výsledek do rovnice (5).

V následující tabulce jsou uvedeny výsledné hodnoty a hodnoty tabulární, včetně průměrných hodnot stanovených z metody známé hloubky a metody RCM.

Tabulka 10 – Výsledky měření

Materiál	Rychlost ze známé hloubky [m/ns]	Měřená hodnota rychlosti z RCM [m/ns]	Teoreticky stanovená rychlost z tabulek [m/ns] Zdroj: [20]	Průměrná rychlost [m/ns]
písek	0,1674	0,1434	0,1300	0,1554
štěrk frakce 5-10	0,1688	0,1480	0,1300	0,1584
štěrk frakce 0-31,5	0,1632	0,1554	0,1200	0,1591
štěrk frakce 31,5-63	0,1506	0,1807	0,1300	0,1656

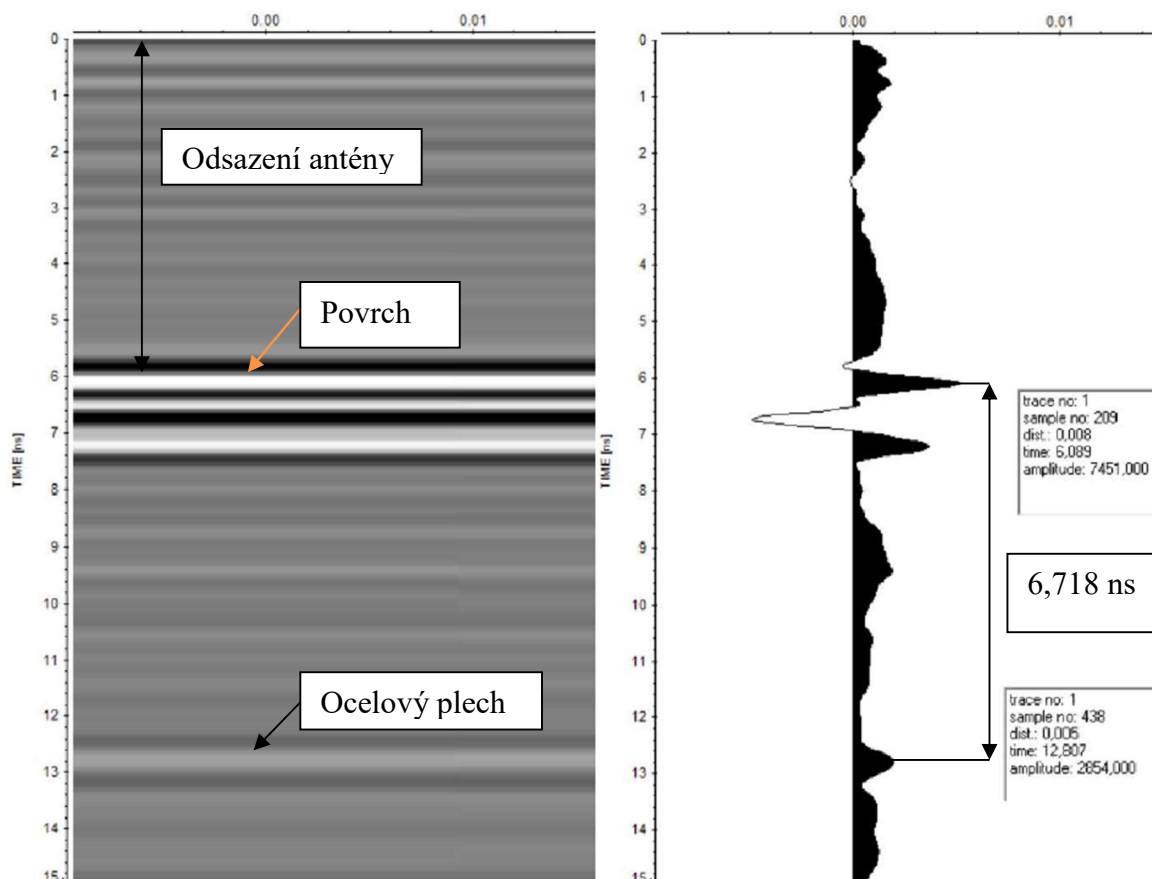
Následující graf znázorňuje tabulku 10, ve které převážně nejvyšších hodnot nabývá rychlost stanovená pomocí rovnice pro známou hloubku. Naopak při vyjádření rychlosti z relativní permitivity přes metodu RCM se dosáhlo průměrných hodnot, které by odpovídaly skutečnosti. Nejnižších výsledků dosahují tabelární hodnoty, které by mohly/měly být spíše orientační, protože uvedené hodnoty byly pravděpodobně určeny na blocích materiálu a ne na vrstvách materiálu v sypkém stavu.



Obrázek 30 – Graf výsledků měřených rychlostí

6.2 Výsledky fáze A

Na obrázku 31 je výsledný radargram vzorku A8, kde se štěrk frakce 0-31,5 znečišťoval pomocí písku. Z radargramu se určili vstupní hodnoty do rovnice (5) a (6) a vypočetli se rychlosti podle výše popsaných metod.

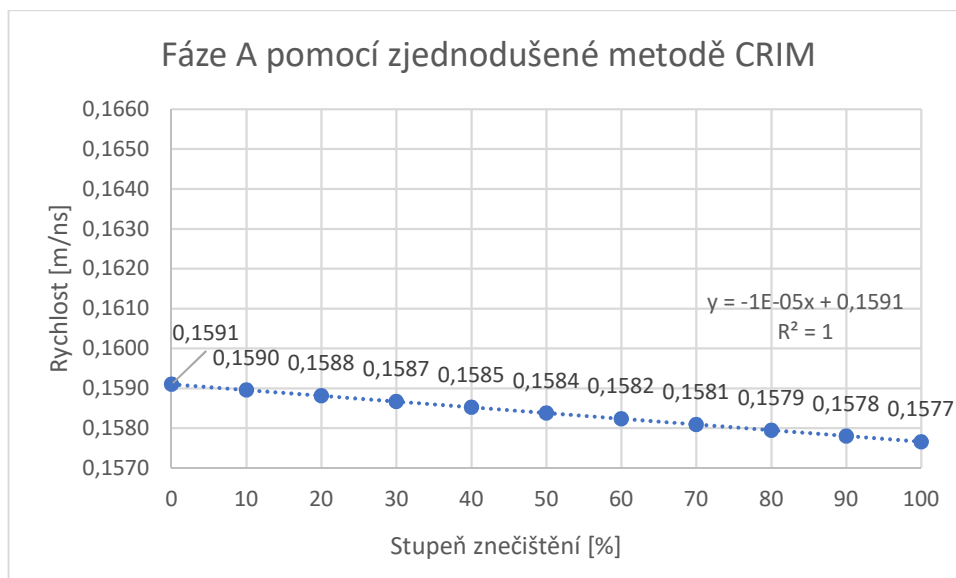


Obrázek 31 – Vzorek A4

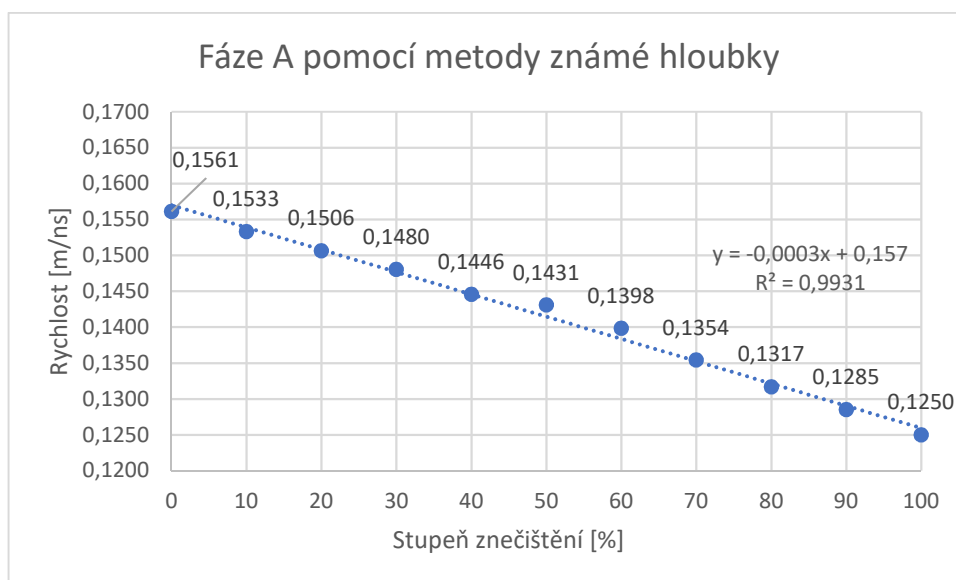
Následující tabulka znázorňuje výsledné hodnoty rychlosti v závislosti na znečištění.

Tabulka 11 – Výsledky fáze A

Krok měření	Stupeň znečištění	Rychlost ze známé hloubky [m/ns]	Rychlost z metody CRIM [m/ns]
A0	0 %	0,1561	0,1591
A1	10 %	0,1533	0,1590
A2	20 %	0,1506	0,1588
A3	30 %	0,1480	0,1587
A4	40 %	0,1446	0,1585
A5	50 %	0,1431	0,1584
A6	60 %	0,1398	0,1582
A7	70 %	0,1354	0,1581
A8	80 %	0,1317	0,1579
A9	90 %	0,1285	0,1578
A10	100 %	0,1250	0,1577



Obrázek 32 – Graf závislost rychlosti na znečištění fáze A pomocí zjednodušené metodě CRIM



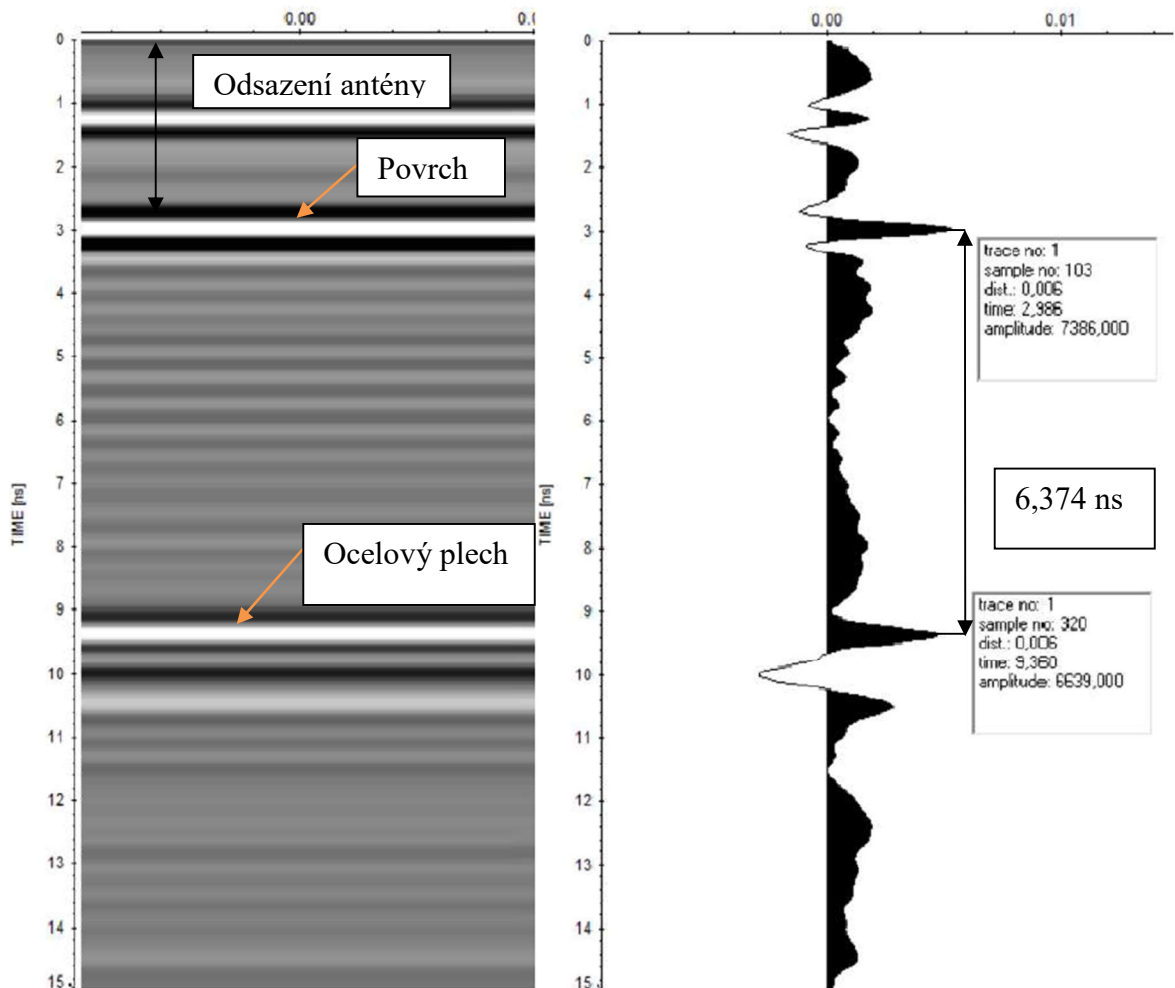
Obrázek 33 – Graf závislost rychlosti na znečištění fáze A pomocí metody známé hloubky

Na výše uvedených obrázcích je zcela jasně vidět, že čistým materiálem se EM vlny šíří nejrychleji. Postupným znečišťováním tato rychlost klesá z důvodu, že znečišťující materiály zaplňují mezery v kamenivu a nahrazují tak vzduch (ve kterém se EM vlny šíří nejrychleji) materiálem, kde jsou EM vlny zpomalovány.

Na obrázku 32 je úbytek rychlost pomalejší. Hodnoty jsou zde stanoveny pouze teoreticky na základě výpočtu zjednodušenou metodou CRIM. Na obrázku 33 jsou jako vstupní hodnoty brány spočítané hodnoty z metody o známé hloubce, kde je výsledný úbytek rychlosti o mnoho vyšší.

6.3 Výsledky fáze B

Na obrázku 33 je výsledný radargram fáze B, konkrétně vzorku B3, kde se šterk frakce 0-31,5 znečišťoval šterkem frakce 5-10.

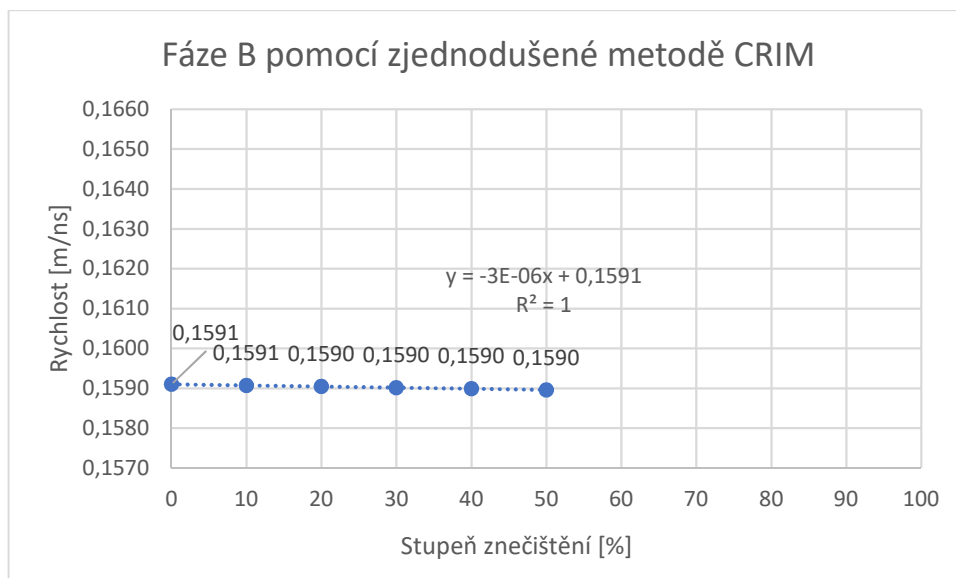


Obrázek 34 – Vzorek B3

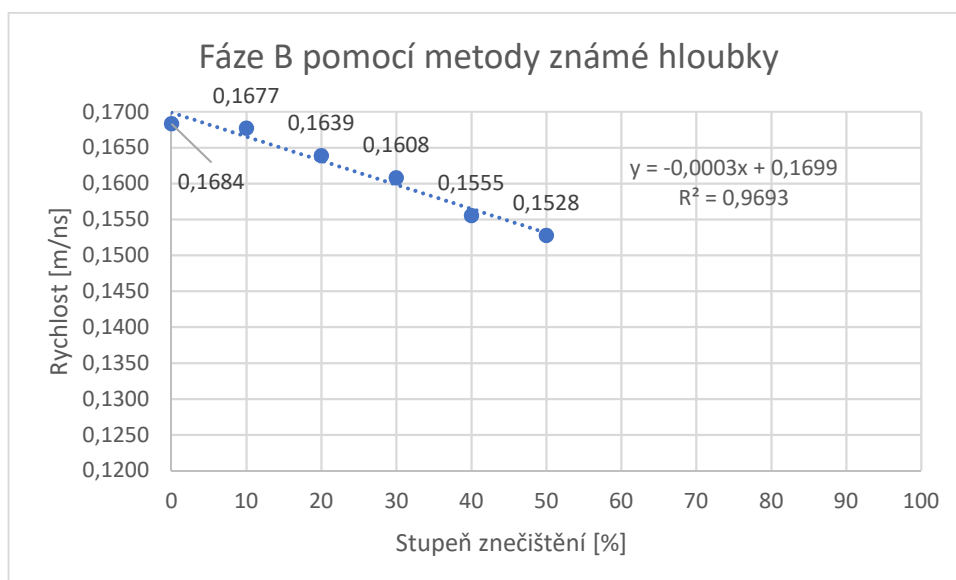
Následující tabulka znázorňuje výsledné hodnoty rychlosti v závislosti na znečištění.

Tabulka 12 – Výsledky fáze B

Krok měření	Stupeň znečištění	Rychlost ze známé hloubky [m/ns]	Rychlost z metody CRIM [m/ns]
B0	0 %	0,1684	0,1591
B1	10 %	0,1677	0,1591
B2	20 %	0,1639	0,1590
B3	30 %	0,1608	0,1590
B4	40 %	0,1555	0,1590
B5	50 %	0,1528	0,1590



Obrázek 35 – Graf závislosti rychlosti na znečištění fáze B pomocí zjednodušené metodě CRIM



Obrázek 36 – Graf závislosti rychlosti na znečištění fáze B pomocí metody známé hloubky

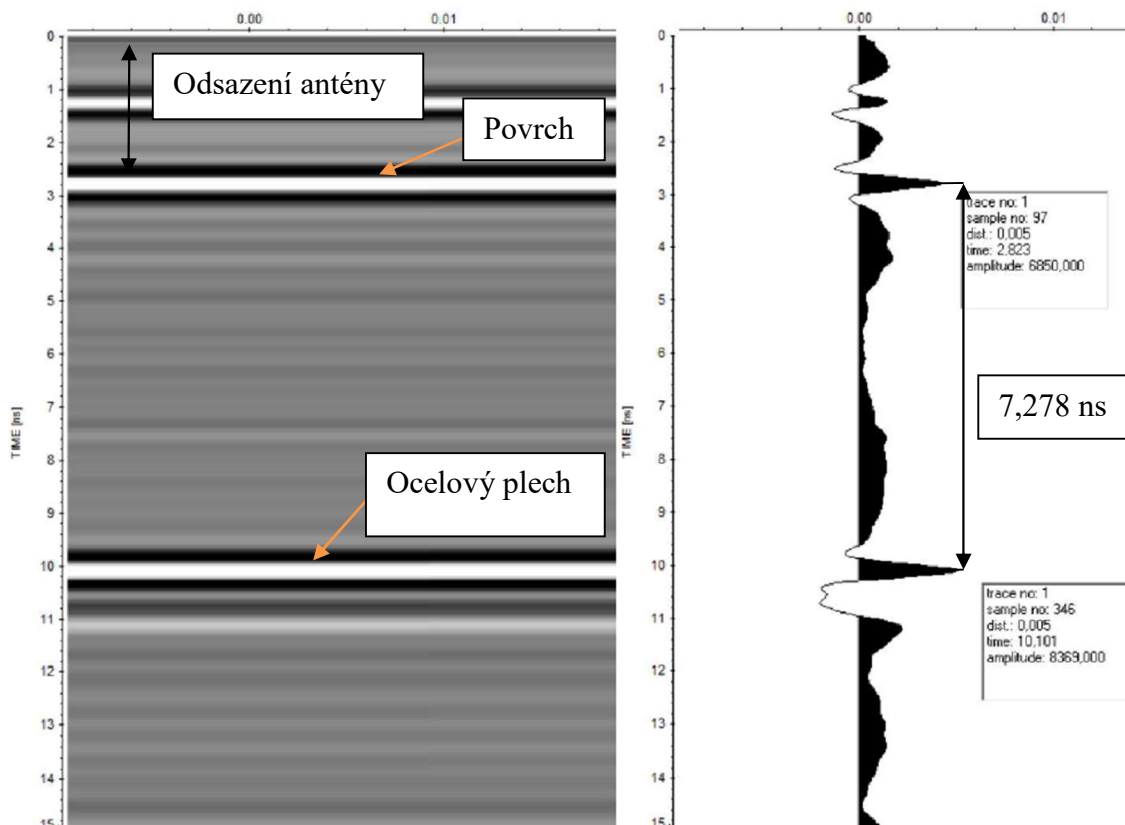
Na výše uvedených obrázcích s grafy je zcela patrné, že za použití jakékoli metody na stanovení rychlosti průchodu EM vln je vždy nejvyšší rychlost průchodu při nulovém znečištění, a to díky vyšší rychlosti průchodu EM vln skrze hlavní materiál.

Na obrázku 35 je znázorněn úbytek rychlosti v závislosti na znečišťujícím materiálu při použití metody CRIM.

Na obrázku 36 je úbytek rychlosti v závislosti na znečišťujícím materiálu dosti podobný. Oproti fázi A je pokles minimální, a to z důvodu použití znečišťujícího materiálu s vyšší mezerovitostí než v případě písku.

6.4 Výsledky fáze C

Na následujícím obrázku je uveden výsledný radargram fáze C pro vzorek C10, kde se znečišťoval šterk frakce 0-31,5 pomocí mixu, který se skládal z půlky hmotnosti šterku frakce 5-10 a z půlky hmotnosti písku.

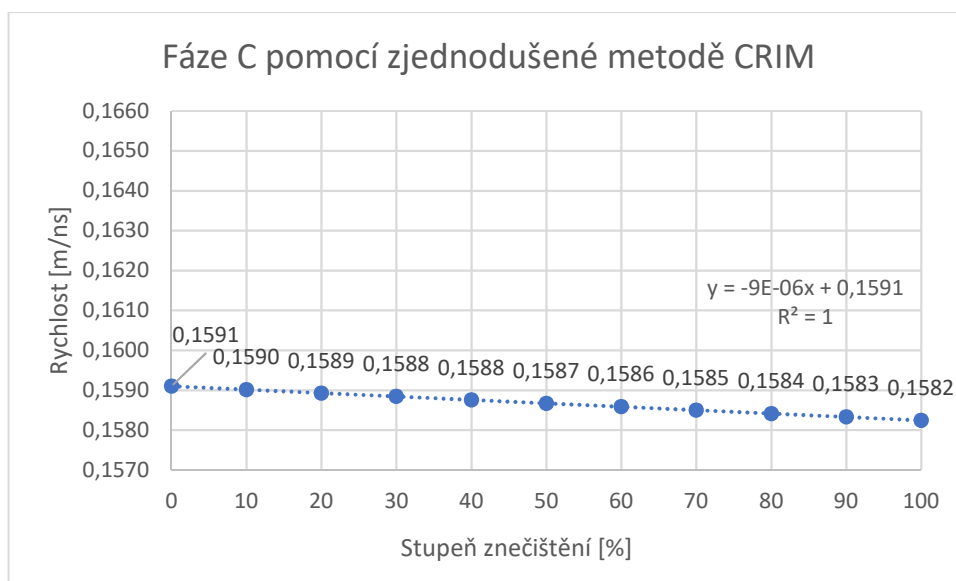


Obrázek 37 – Vzorek C10

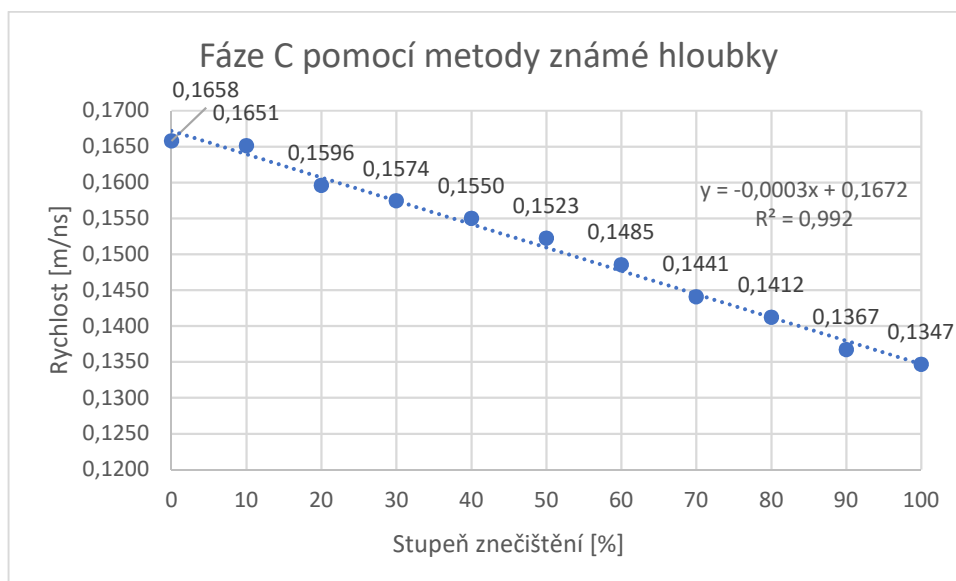
Následující tabulka znázorňuje výsledné hodnoty rychlosti v závislosti na znečištění.

Tabulka 13 – Výsledky fáze C

Krok měření	Stupeň znečištění	Rychlost ze známé hloubky [m/ns]	Rychlost z metody CRIM [m/ns]
C0	0 %	0,1658	0,1591
C1	10 %	0,1651	0,1590
C2	20 %	0,1596	0,1589
C3	30 %	0,1574	0,1588
C4	40 %	0,1550	0,1588
C5	50 %	0,1523	0,1587
C6	60 %	0,1485	0,1586
C7	70 %	0,1441	0,1585
C8	80 %	0,1412	0,1584
C9	90 %	0,1367	0,1583
C10	100 %	0,1347	0,1582



Obrázek 38 – Graf závislosti rychlosti na znečištění fáze C pomocí zjednodušené metodě CRIM

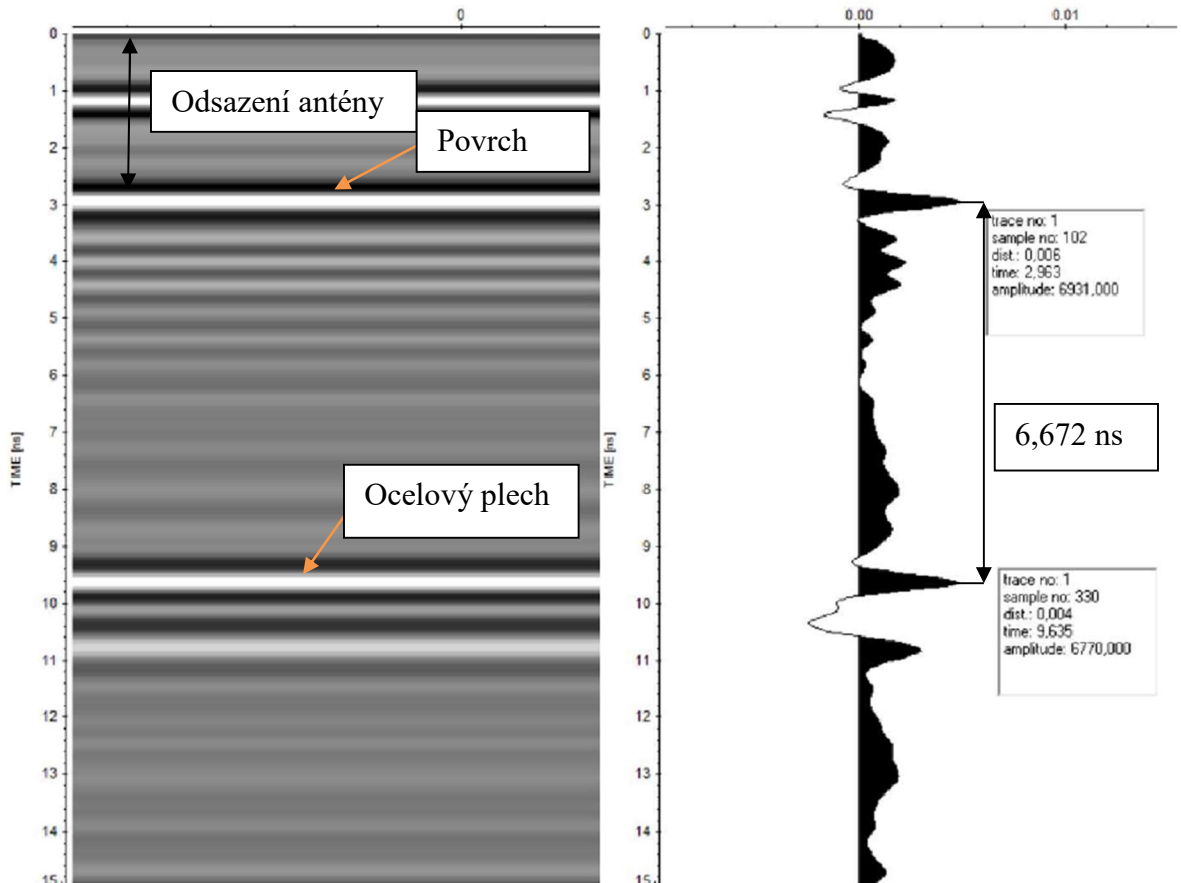


Obrázek 39 – Graf závislosti rychlosti na znečištění fáze C pomocí metody známé hloubky

Ve fázi C došlo ke znečištění hlavního materiálu znečišťujícím mixem, který výslednou rychlost snížil na přibližnou hodnotu aritmetického průměru měření z fáze A a z fáze B.

6.5 Výsledky fáze D

Na následujícím obrázku je uveden výsledný radargram fáze D pro vzorek D10, kde štěrk frakce 31,5-63 znečišťoval pískem.

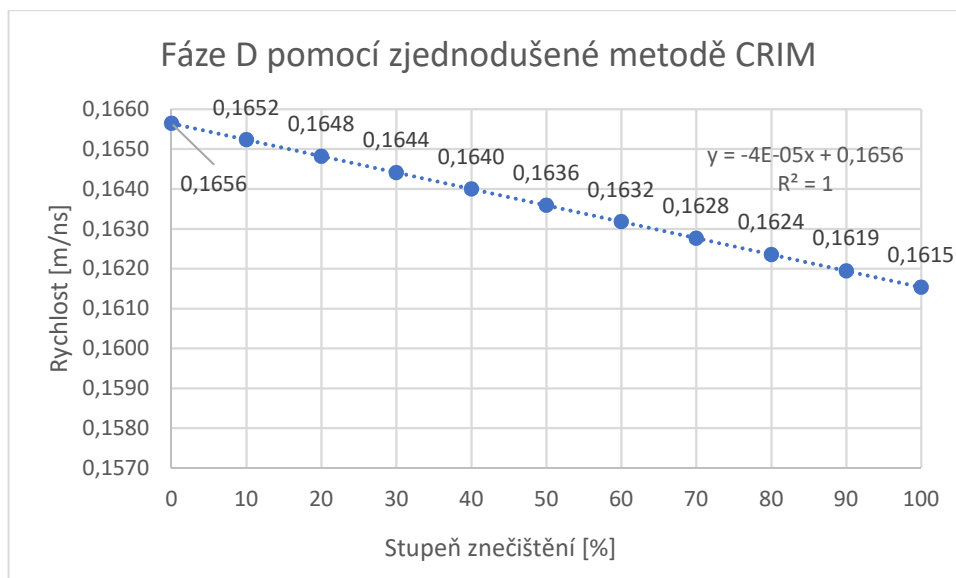


Obrázek 40 – Vzorek D10

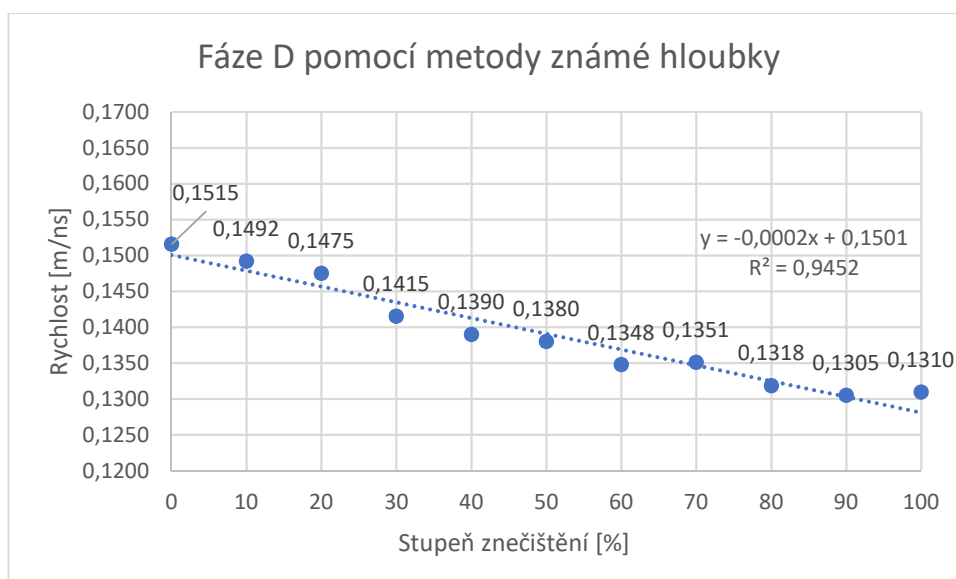
Následující tabulka znázorňuje výsledné hodnoty rychlosti v závislosti na znečištění.

Tabulka 14 – Výsledky fáze D

Krok měření	Stupeň znečištění	Rychlost ze známé hloubky [m/ns]	Rychlost z metody CRIM [m/ns]
D0	0 %	0,1515	0,1656
D1	10 %	0,1492	0,1652
D2	20 %	0,1475	0,1648
D3	30 %	0,1415	0,1644
D4	40 %	0,1390	0,1640
D5	50 %	0,1380	0,1636
D6	60 %	0,1348	0,1632
D7	70 %	0,1351	0,1628
D8	80 %	0,1318	0,1624
D9	90 %	0,1305	0,1619
D10	100 %	0,1310	0,1615



Obrázek 41 – Graf závislosti rychlosti na znečištění fáze D pomocí zjednodušené metodě CRIM



Obrázek 42 – Graf závislosti rychlosti na znečištění fáze D pomocí metody známé hloubky

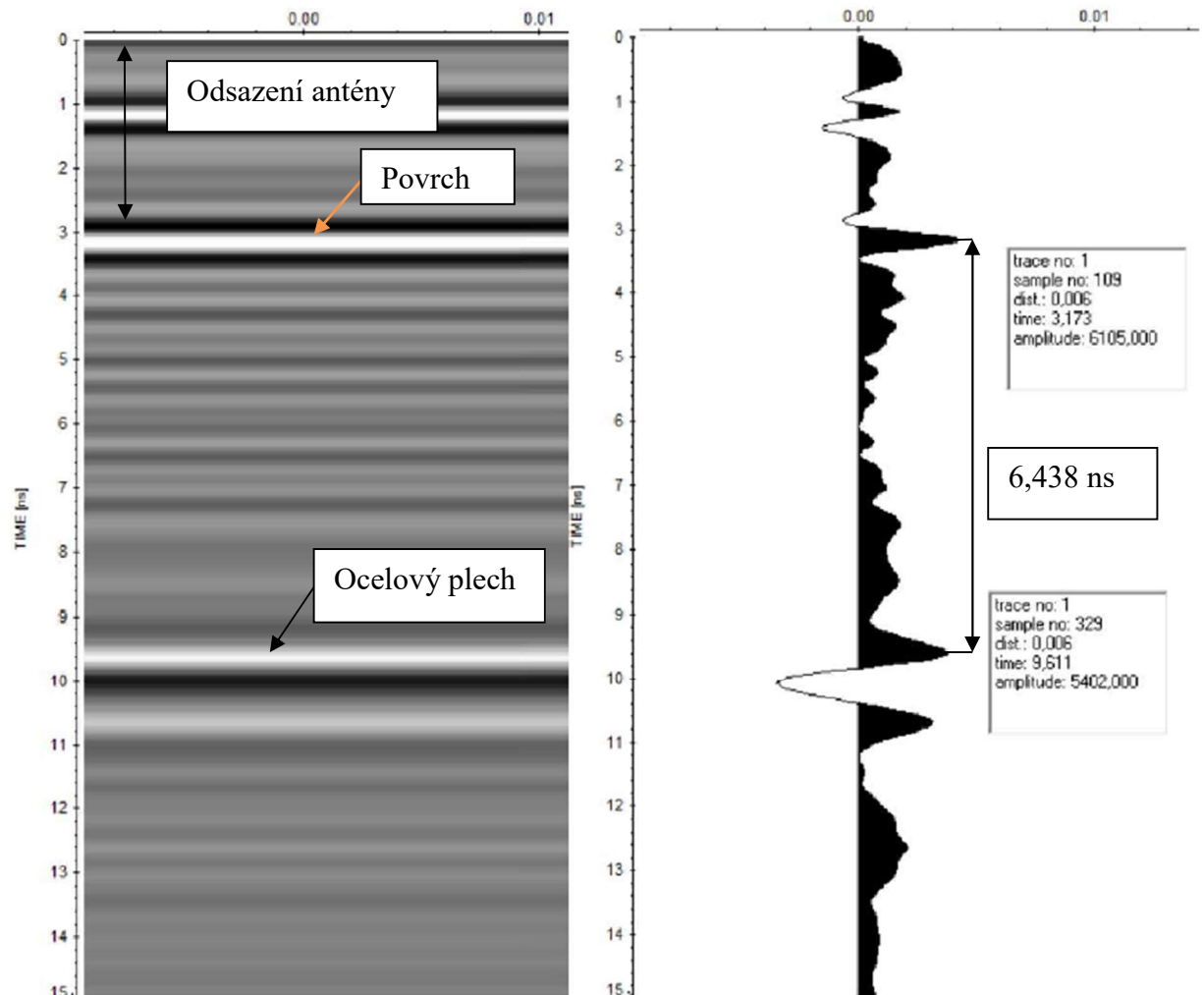
Od této fáze měření se změnil hlavní materiál na šterk s větší frakcí. Obecně díky větší mezerovitosti a tím pádem většímu podílu vzduchu se rychlost šíření EM vln zvýšila. Postupným znečišťováním pomocí písku zde dochází k lehkému úbytku na rychlosti šíření EM vln.

Na obrázku 41 je graficky znázorněn postupný úbytek rychlosti v závislosti na znečištění. V tomto případě je intervalový rozdíl větší a to díky písku, pomocí kterého znečišťujeme.

Na obrázku 42 je graf závislosti rychlosti na znečištění pomocí metody o známé hloubce, zde opět vyšli hodnoty v širším intervalu než za pomocí metody CRIM.

6.6 Výsledky fáze E

Na následujícím obrázku je uveden výsledný radargram fáze E pro vzorek E6, kde probíhalo znečištění šterku frakce 31,5-63 šterkem frakce 5-10.

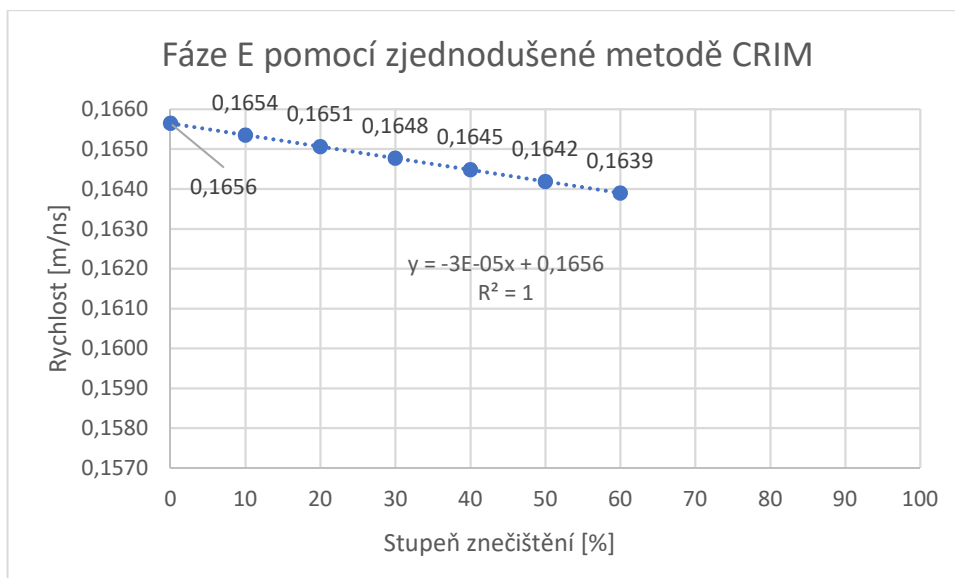


Obrázek 43 – Vzorek E6

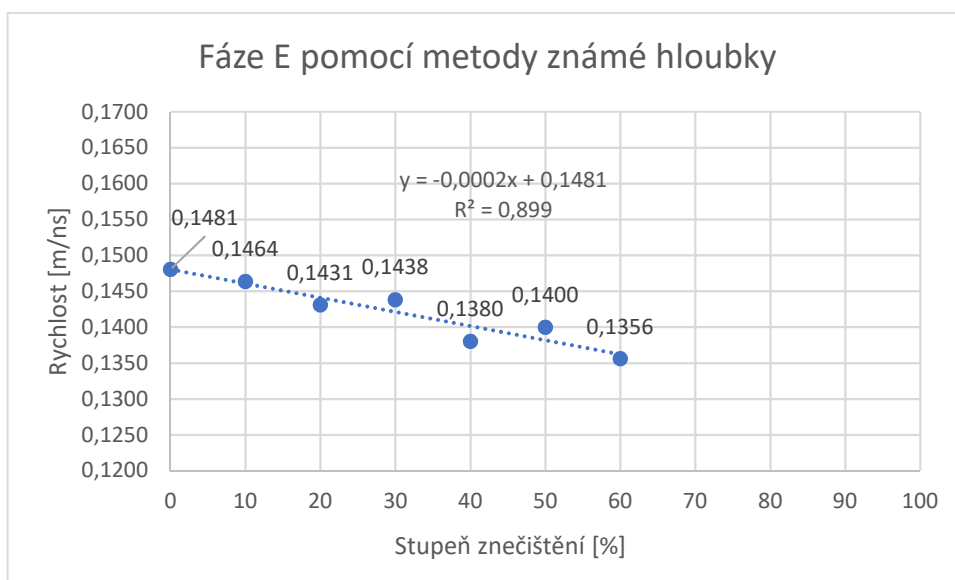
Následující tabulka znázorňuje výsledné hodnoty rychlosti v závislosti na znečištění.

Tabulka 15 – Výsledky fáze E

Krok měření	Stupeň znečištění	Rychlost ze známé hloubky [m/ns]	Rychlost z metody CRIM [m/ns]
E0	0 %	0,1481	0,1656
E1	10 %	0,1464	0,1654
E2	20 %	0,1431	0,1651
E3	30 %	0,1438	0,1648
E4	40 %	0,1380	0,1645
E5	50 %	0,1400	0,1642
E6	60 %	0,1356	0,1639



Obrázek 44 – Graf závislosti rychlosti na znečištění fáze E pomocí zjednodušené metodě CRIM



Obrázek 45 – Graf závislosti rychlosti na znečištění fáze E pomocí metody známé hloubky

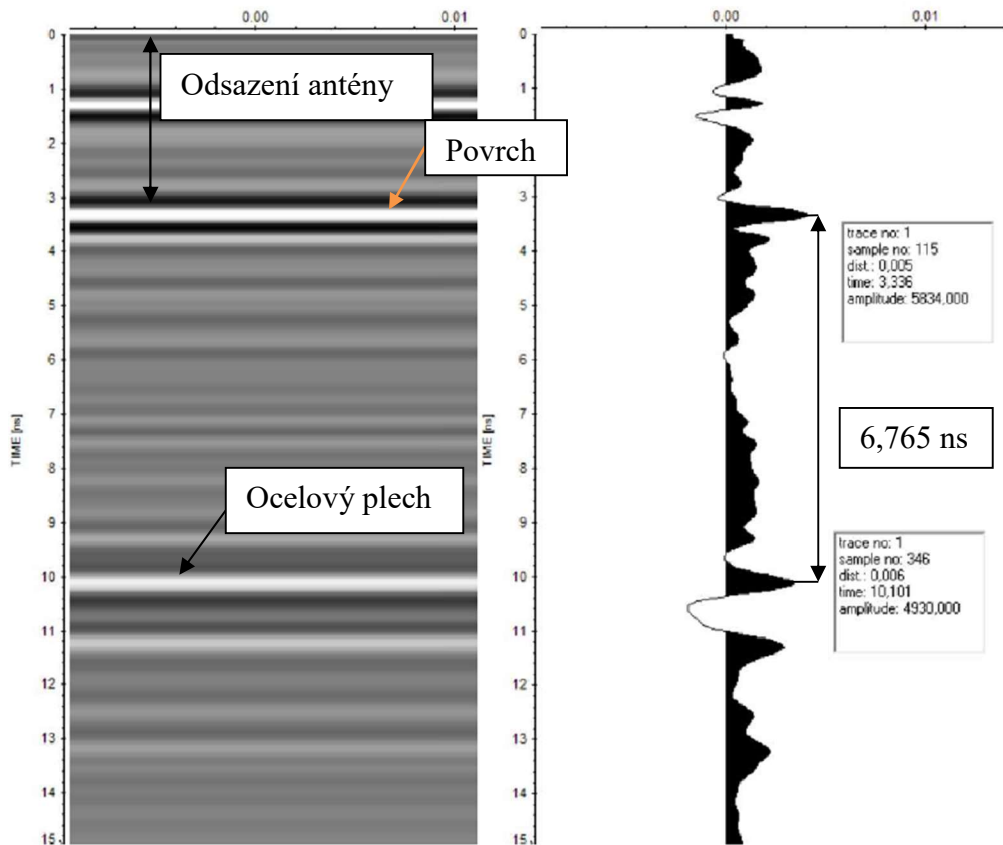
Během fáze E se štěrky frakce 31,5-63 znečistil štěrky 5-10, kde oba tyto materiály mají relativně větší mezerovitost a tím pádem více volného místa pro vzduch, kterým se EM vlny šíří rychle.

Na obrázku 44 je znázorněn tento slabý úbytek na rychlosti vlivem znečištění. Přesto že kontejner byl již naplněný na požadovanou výšku, stále nebyla dosažena nulová mezerovitost, a tak úbytek na rychlosti je výrazně malý.

Obrázek 45 znázorňuje zjištění rychlosti pomocí metody o známé hloubce, kde rychlostní úbytek byl výrazně nižší.

6.7 Výsledky fáze F

Na následujícím obrázku je uveden výsledný radargram fáze F pro vzorek F10, kde se znečišťoval šterk frakce 31,5-63 pomocí mixu, který se skládal z půlky hmotnosti šterku frakce 5-10 a z půlky hmotnosti písku.

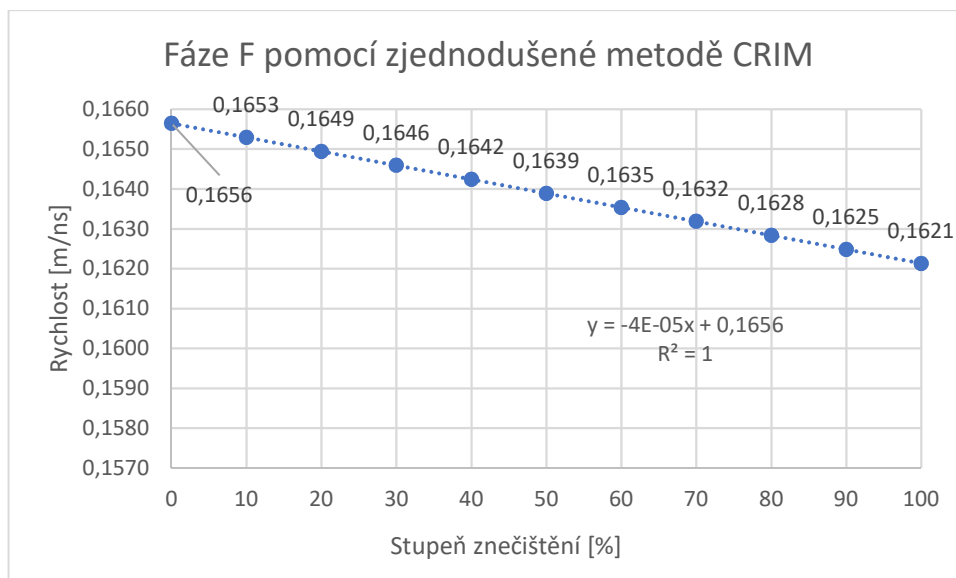


Obrázek 46 – Vzorek F10

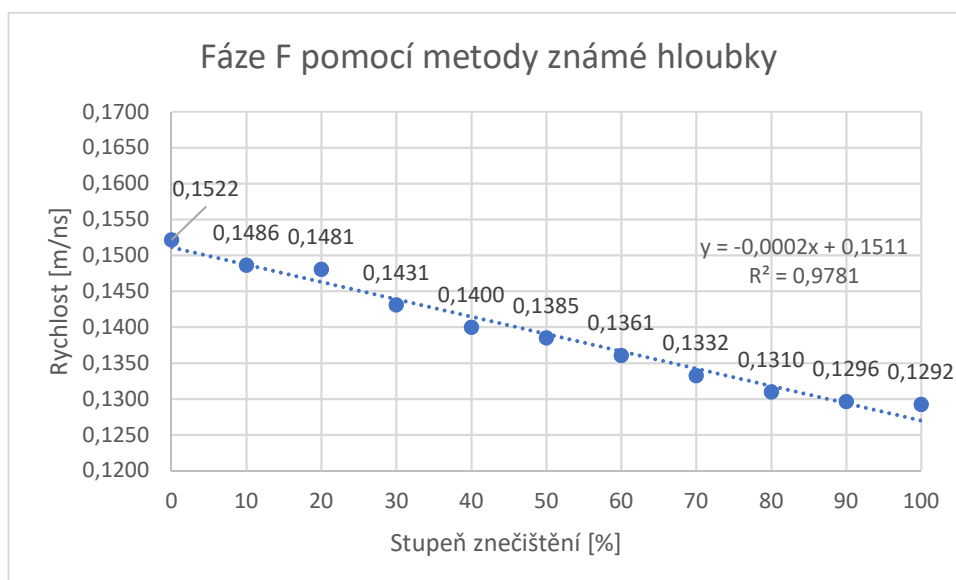
Následující tabulka znázorňuje výsledné hodnoty rychlosti v závislosti na znečištění.

Tabulka 16 – Výsledky fáze F

Krok měření	Stupeň znečištění	Rychlost ze známé hloubky [m/ns]	Rychlost z metody CRIM [m/ns]
F0	0 %	0,1522	0,1656
F1	10 %	0,1486	0,1653
F2	20 %	0,1481	0,1649
F3	30 %	0,1431	0,1646
F4	40 %	0,1400	0,1642
F5	50 %	0,1385	0,1639
F6	60 %	0,1361	0,1635
F7	70 %	0,1332	0,1632
F8	80 %	0,1310	0,1628
F9	90 %	0,1296	0,1625
F10	100 %	0,1292	0,1621



Obrázek 47 – Graf závislost rychlosti na znečištění fáze F pomocí zjednodušené metodě CRIM



Obrázek 48 – Graf závislost rychlosti na znečištění fáze F pomocí metody známé hloubky

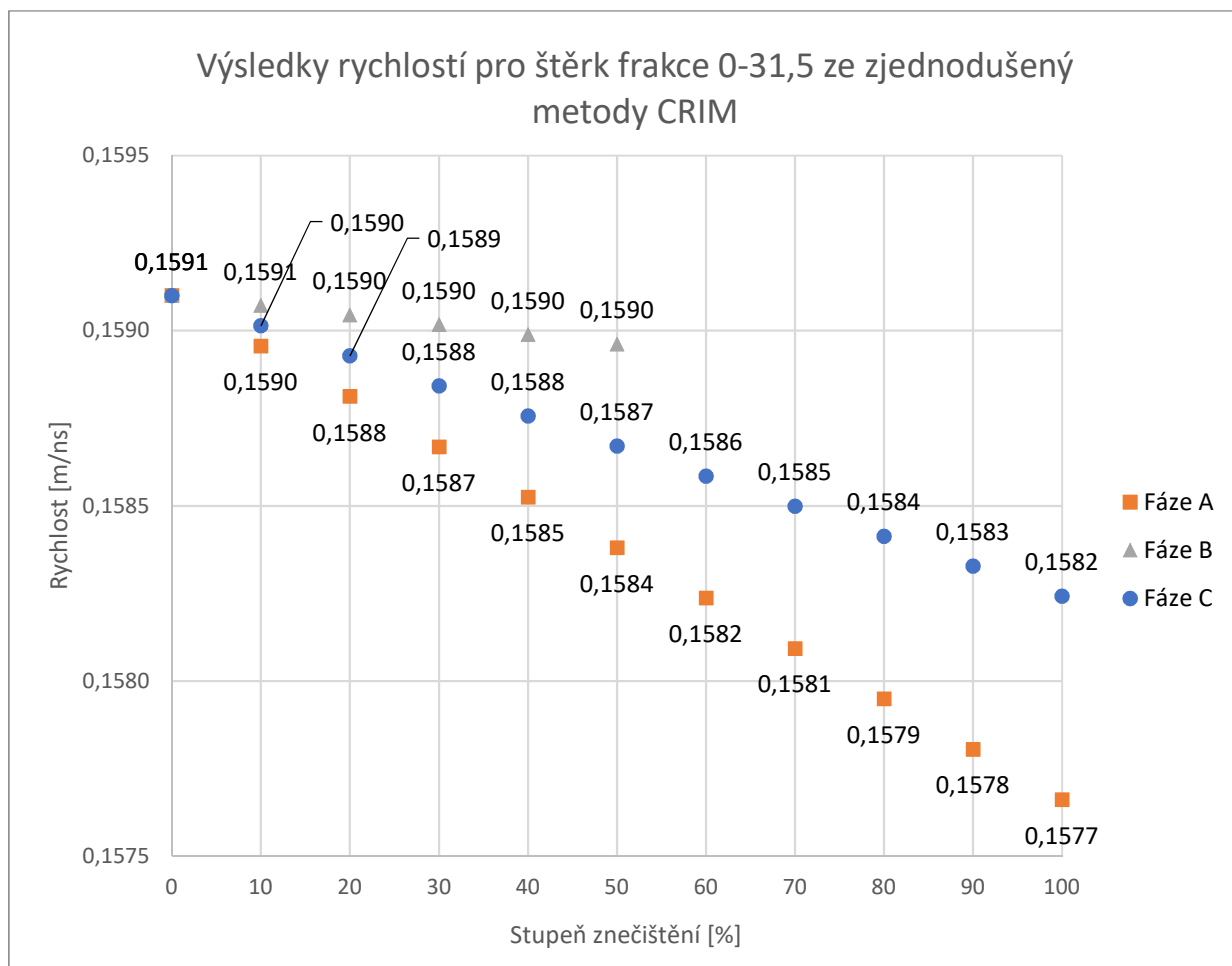
Ve fázi F došlo ke znečištění hlavního materiálu znečišťujícím mixem, který výslednou rychlost snížil na přibližný aritmetický průměr měření z fáze D a z fáze E.

Na obrázku 47 je úbytek rychlost pomalejší v závislosti na použité metodě, kde vstupní hodnoty jsou použity ze sběru dat přes CRIM.

Na obrázku 48 jsou jako vstupní hodnoty brány spočítané hodnoty z metody o známé hloubce, kde je výsledný úbytek rychlosti vyšší.

6.8 Shrnutí výsledků experimentální části práce

Na následujícím obrázku je graf znázorňující hlavní materiál, šterk frakce 0-31,5, a jeho výsledné rychlosti při znečišťování pískem (Fáze A), šterkem frakce 5-10 (Fáze B) a jejich mixem (Fáze C) za použití zjednodušené metody CRIM.

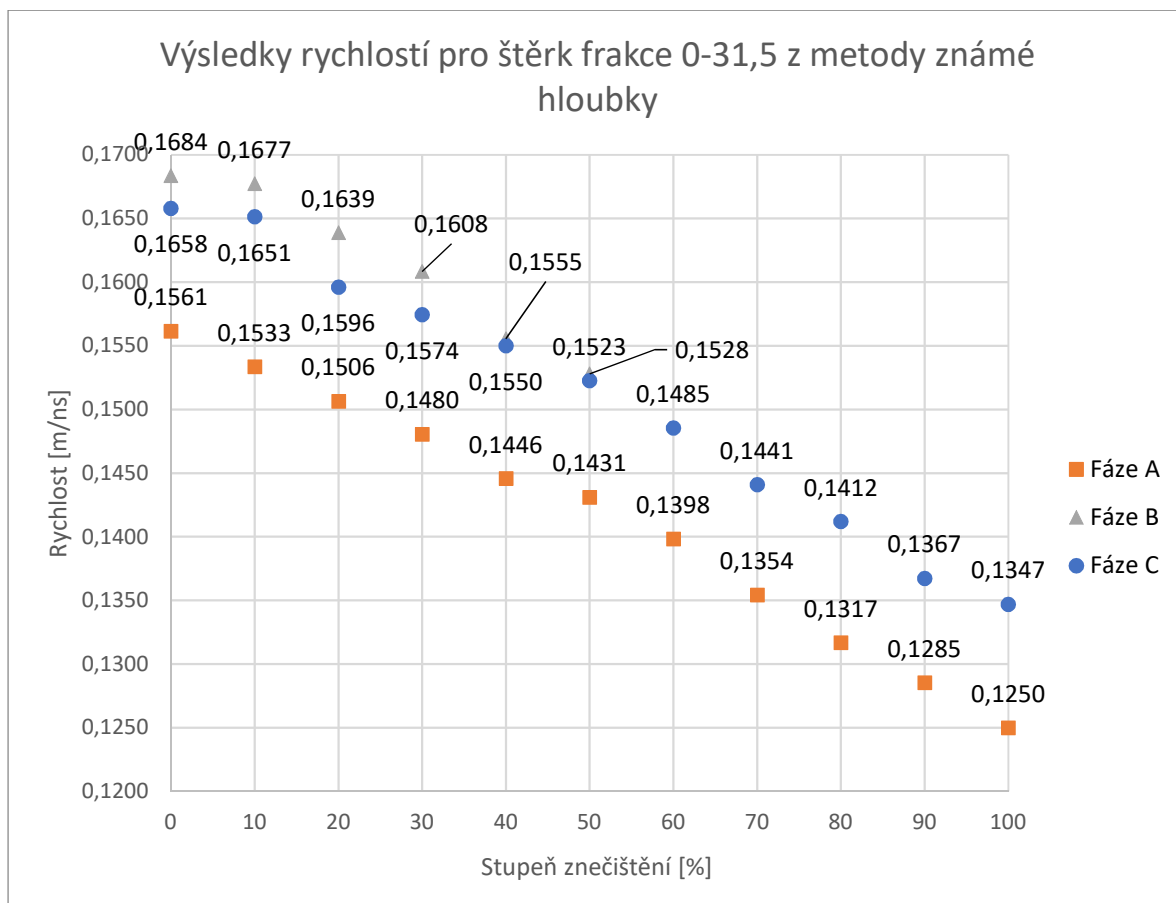


Obrázek 49 – Graf znázorňující výsledky měření pro šterk frakce 0-31,5 ze zjednodušené metody CRIM

Z obrázku 49 je zcela patrné, že při znečišťování šterkem frakce 5-10 nedochází k velkému úbytku na rychlosti díky neúplnému vyplnění mezerovitosti pomocí malé frakce šterku, pokud by plnění pokračovalo, dosáhli bychom pouze malého úbytku.

Při znečišťování pomocí mixu šterku frakce 5-10 a písku je úbytek rychlosti již větší, protože půlka znečišťujícího materiálu obsahuje šterk frakce 5-10 a půlka písek, který má malou mezerovitost a tím pádem i méně dutin pro rychlejší průnik EM vln a proto se řadí na druhou pozici při úbytku na rychlosti.

Při znečištění pískem se rychlost šíření EM vln dostala na nejmenší změřenou hodnotu právě kvůli nejnížší mezerovitosti u písku.

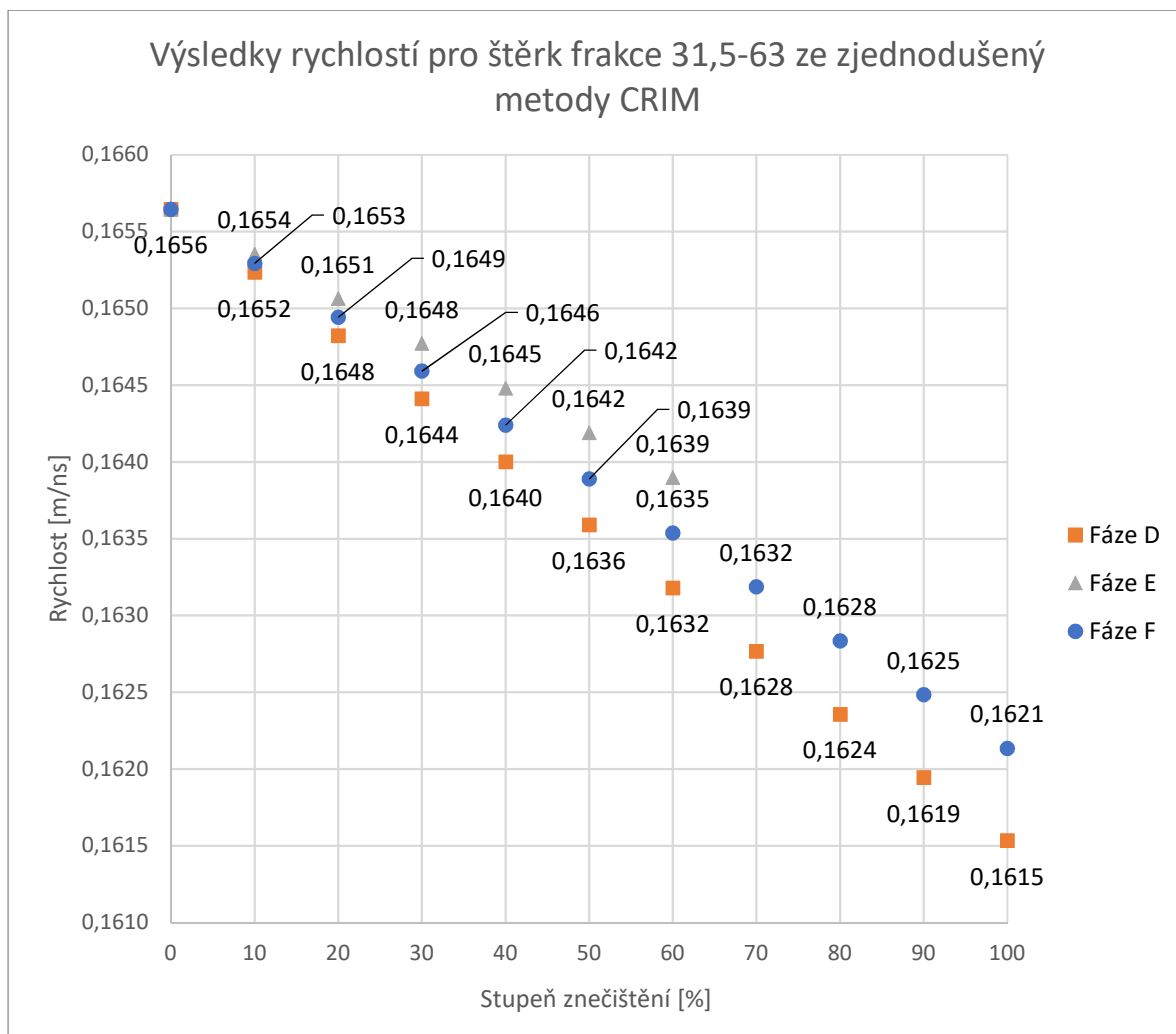


Obrázek 50 – Graf znázorňující výsledky měření pro šterk frakce 0-31,5 z metody známé hloubky

Na obrázku 50 je graf znázorňující výsledky měření z metody známé hloubky na hlavním materiálu šterku frakce 0-31,5 a jeho výsledné rychlosti při znečišťování pískem (Fáze A), šterkem frakce 5-10 (Fáze B) a jejich mixem (Fáze C). Je zde vidět, jak se znečištění pomocí šterku frakce 5-10 pomalu přibližuje k hodnotám, jako při znečišťování mixem. Kdyby se v experimentu dále pokračovalo, zřejmě by se dosáhlo podobných hodnot.

Na obrázku 51 je graf znázorňující druhý hlavní materiál, šterk frakce 31,5-63, a jeho výsledné rychlosti při znečišťování pískem (Fáze D), šterkem frakce 5-10 (Fáze E) a jejich mixem (Fáze F) za použití zjednodušené metody CRIM.

Z obrázku 51 je zcela patrné, že při znečišťování šterkem frakce 5-10 nedochází k velkému úbytku na rychlosti díky neúplnému vyplnění mezerovitosti pomocí malé frakce šterku, pokud by plnění pokračovalo, dosáhli bychom pouze malého úbytku.

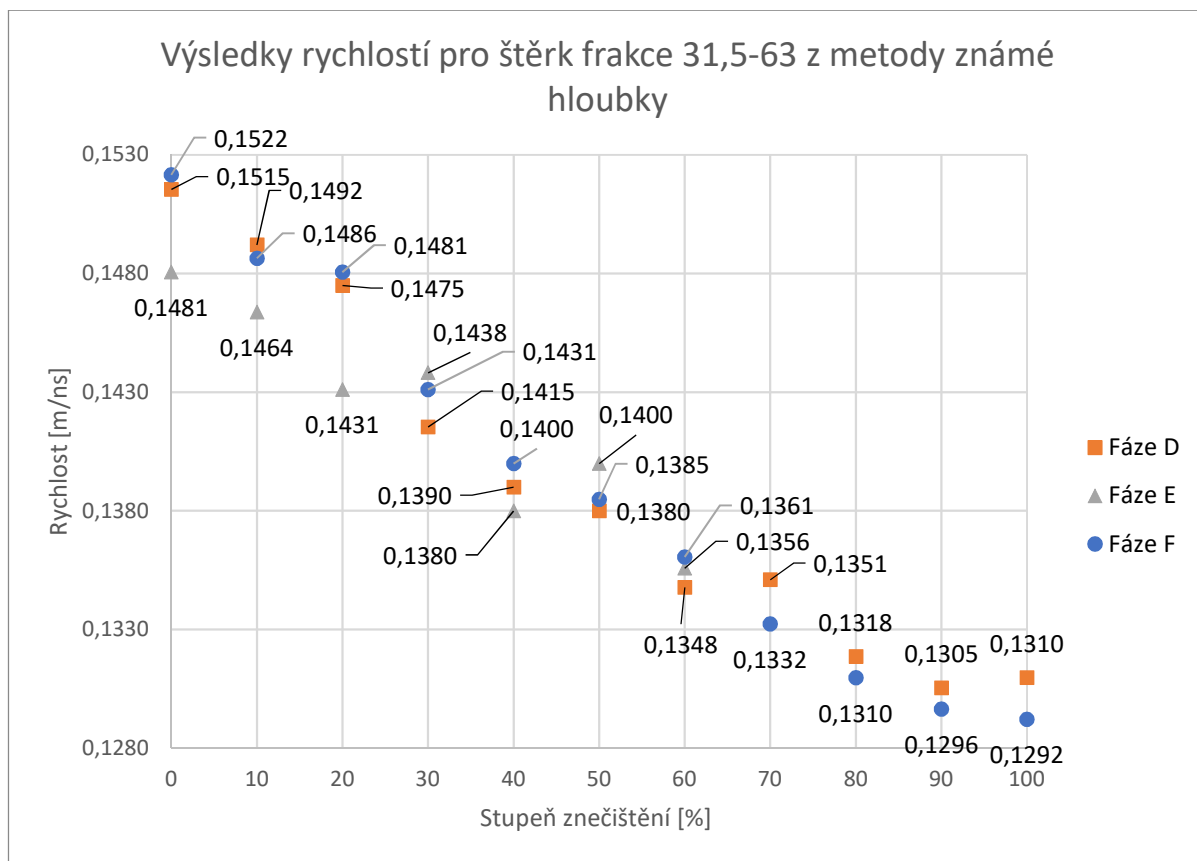


Obrázek 51 – Graf znázorňující výsledky měření pro štěrk frakce 31,5-63 ze zjednodušený metody CRIM

Při znečišťování pomocí mixu šterku frakce 5-10 a písku je úbytek rychlosti již větší, protože polovina znečišťujícího materiálu obsahuje šterk frakce 5-10 a polovina písek, který má malou mezerovitost, a tedy i méně dutin pro rychlejší průnik EM vln, a proto se řadí na druhou pozici při úbytku na rychlosti.

Při znečištění pískem se rychlost šíření EM vln dostala na nejmenší změřenou hodnotu právě kvůli nejnižší mezerovitosti u písku.

Na následujícím obrázku je uveden graf znázorňující výsledky měření z metody známé hloubky u druhého hlavního materiál šterku frakce 31,5-63 a jeho výsledné rychlosti při znečišťování pískem (Fáze D), šterkem frakce 5-10 (Fáze E) a jejich mixem (Fáze F).



Obrázek 52 – Graf znázorňující výsledky měření pro šterk frakce 0-31,5 z metody známé hloubky

Z obrázku 52 je vidět, že při znečišťování mixem se výsledné rychlosti dostanou na nejnižší měřenou hodnotu. Při znečišťování pískem se výsledné hodnoty řadí na druhou pozici.

Výsledků uvedených na obrázku 52 bylo zřejmě dosaženo proto, že i přes zhutnění nebyl stále celistvý povrch, a to díky mixům, které se snažily vyplnit mezerovitost základního materiálu a vznikly tím mírné hrbolky, které měly vliv na odražený EM signál zpět do přijímače.

V následující tabulce jsou uvedeny výsledné hodnoty rychlosti pro měřené fáze.

Tabulka 17 – Výsledky experimentu

Fáze	Metoda	Stupeň znečištění										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
A	CRIM	0,1591	0,1590	0,1588	0,1587	0,1585	0,1584	0,1582	0,1581	0,1579	0,1578	0,1577
	Známa hloubka	0,1561	0,1533	0,1506	0,1480	0,1446	0,1431	0,1398	0,1354	0,1317	0,1285	0,1250
B	CRIM	0,1591	0,1591	0,1590	0,1590	0,1590	0,1590	x	x	x	x	x
	Známa hloubka	0,1684	0,1677	0,1639	0,1608	0,1555	0,1528	x	x	x	x	x
C	CRIM	0,1591	0,1590	0,1589	0,1588	0,1588	0,1587	0,1586	0,1585	0,1584	0,1583	0,1582
	Známa hloubka	0,1658	0,1651	0,1596	0,1574	0,1550	0,1523	0,1485	0,1441	0,1412	0,1367	0,1347
D	CRIM	0,1656	0,1652	0,1648	0,1644	0,1640	0,1636	0,1632	0,1628	0,1624	0,1619	0,1615
	Známa hloubka	0,1515	0,1492	0,1475	0,1415	0,1390	0,1380	0,1348	0,1351	0,1318	0,1305	0,1310
E	CRIM	0,1656	0,1654	0,1651	0,1648	0,1645	0,1642	0,1639	x	x	x	x
	Známa hloubka	0,1481	0,1464	0,1431	0,1438	0,1380	0,1400	0,1356	x	x	x	x
F	CRIM	0,1656	0,1653	0,1649	0,1646	0,1642	0,1639	0,1635	0,1632	0,1628	0,1625	0,1621
	Známa hloubka	0,1522	0,1686	0,1481	0,1431	0,1400	0,1385	0,1361	0,1332	0,1310	0,1296	0,1292

Z výsledku experimentu je patrné, že při znečišťování základního materiálu se výsledná rychlost průchodu EM signálu vždy snižuje v závislosti na stupni znečištění při užití znečišťujícího materiálu s nižší rychlostí průchodu EM vln.

Při plném znečištění nebo při maximálně možném (fáze B, E) se výsledky přibližují vstupním aritmetickým hodnotám rychlostí základních materiálů, které byly použity pro danou fázi.

7 Vlastní souhrn studované problematiky

GPR jako nástroj pro nedestruktivní analýzu je schopen zaznamenávat jakékoli strukturální změny pod povrchem a dohledat skryté objekty, a to i takové, které nejsou kovové, tudíž je nelze detekovat konvenčními metodami. K určení pozice těchto rozhraní a objektů je jedním z nejdůležitějších požadavků určení rychlosti průchodu GPR signálu v diagnostikovaném prostředí.

Sběr GPR dat má některá omezení a měření může být ovlivněno počasím, obzvláště během deště se měření nedoporučuje. Na měřeném povrchu by nemělo být mokro ani vlhko, protože by to mohlo znehodnotit měření. Teplota měřeného povrchu by měla být nad 0 °C. V případě nevhodně zvolené frekvence může mít záznam nedostatečné rozlišení pro danou aplikaci nebo může být signál utlumen natolik, že není možné vyšetřované objekty a rozhraní identifikovat. Dosah a rozlišení systému ovlivňují parametry GPR systému, ale také okolní prostředí, kalibrace a umístění antény a parametry nastavované pro sběr dat.

Naopak výhodou při sběru dat je možné umístění naměřených dat do souřadnicového systému a to díky propojení systému GPR se systémy GNSS, což umožňuje přesně stanovit místo sběru dat. Dalším přínosem systému GPR je možnost skenování měřeného úseku pomocí soustavy antén, kdy je získán 3D záznam, což umožňuje vytvoření časových řezů v určité hloubce.

Pro stanovení rychlosti signálu se často používá metoda CMP, která umožňuje stanovit tloušťku vrstev. Tuto metodu však nelze použít u všech GPR systémů. Nejjednodušší univerzální metodou pro stanovení rychlosti průchodu EM signálu je metoda známé hloubky, kde je nutné znát zaznamenaný čas průchodu signálu skrze objekt zájmu a jeho případná výška či délka. Tato metoda však vyžaduje přímé měření hloubky, čímž zaniká hlavní výhoda použití GPR, kterou je nedestruktivní povaha jeho použití. Na přesnost výsledků této metody má zásadní vliv právě přesnost přímého měření hloubky. Pro vhodný terén se může pro stanovení relativní permitivity a tím pádem i rychlosti šíření EM signálu využít metoda RCM.

Faktorů, které ovlivňují rychlost šíření EM vln je mnoho. Jedná se především o přítomnost vodivých materiálů, pórovitosti, mezerovitosti, obsah vody v zemině, výplň pórů. Obecně materiály s vysokou vodivostí značně utlumují signál. Při stanovení rychlosti šíření EM vln pomocí metod na principu odražených vln se mohou vyskytovat nepřesnosti ve

stanovení rychlosti bez využití například průzkumných vrtů, protože by se mohlo narazit na materiály v podloží, které jsou vysoce vodivé, a proto mají vysoký útlum signálu.

Při provádění experimentů se sestavou GPR doporučuji nejdříve se seznámit s předmětem měření, vyšetřit okolní vlivy a zvážit také aplikaci a druh a vlastnosti požadovaných výstupů měření. Samozřejmostí je seznámení se se základními principy fungování GPR a metodami zpracování dat. Při prozkoumání základních informací či základních principů fungování ještě před konáním experimentu lze předejít případným chybám, které by mohly vzniknout. Určitě je zapotřebí zvážit, pomocí jaké metody proběhne sběr dat.

Na základě vlastních zkušeností z proběhlého měření a studované literatury vidím jako důležité provádět měření opakovaně z důvodu vyloučení krátkodobých nežádoucích vlivů na zaznamenaná data a také z důvodu vyloučení náhodných a hrubých chyb měření. Důležité je také průběžné zaznamenávání konfigurací a popisů experimentů a vyhodnocení měřených dat, pokud možno ihned po ukončení jejich záznamu.

Při stanovování rychlosti doporučuji, pokud to bude možné, v průběhu spuštění měření se nepohybovat a ani nemít kovové předměty v okruhu 2 metrů z důvodu nechtěných dočasných lokálních rušení. I tyto drobnosti mohou ovlivnit výsledky sběru dat, které se v radargramu projeví jako nechtěné lokální odrazy či kontinuální šum, což může ztížit identifikaci a vyhodnocení žádoucích jevů.

8 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo na základě rešerše z literatury a vlastních zkušeností z měření a zpracování GPR dat vypracovat analýzu metod pro určení rychlosti signálu GPR. Kromě teoretického přístupu bylo tohoto cíle dosaženo také pomocí série experimentálních měření popsaných v kapitole pět, kde se jednalo o stanovení změny rychlosti signálu GPR vlivem postupného přidávání jemnozrnného materiálu do kostry základního materiálu, které simulovalo znečištění železničního šterkového lože materiálem podloží. Kapitola šest představuje výsledky této práce, které platí pouze pro měření na použitých materiálech.

Před vlastním měření s GPR bylo nejprve nutné seznámit se se základními principy a fungováním této technologie. Vlastní práce s GPR sestávala s časově náročné přípravy skupiny experimentů a vyhodnocení naměřených dat ve specializovaném SW. Na začátku práce byly nastíněny teoretické poznatky týkající se technologie GPR, byly uvedené obecné informace o této metodě a představeny metody pro určení rychlosti šíření signálu GPR. V této práci se k tomuto účelu použily metody o známé hloubce, RCM a CRIM. Poté byla popsána použitá anténa a software na vyhodnocení výsledků ReflexW. Konkrétním úkolem bylo stanovení rychlosti šíření EM vln skrze vytvořené vzorky simulující kolejové lože. Během praktické části uvedené v kapitole 6 došlo ke stanovení rychlostí skrze hlavní materiály se znečišťujícími materiály.

Výsledky této práce bychom mohli použít pro porovnání závažnosti znečištění lože v případech některých terénních výzkumů, zabývajících se touto problematikou. Takto by mohl být zjištěn nebo ověřen stupeň znečištění železničního šterkového lože porovnáním hodnot relativních permitivit resp. rychlosti signálu získaných při experimentální fázi této práce.

V průběhu zpracování mé bakalářské práce jsem se seznámil s novou nedestruktivní technologií diagnostiky dopravních staveb. Studium příslušné literatury jsem se seznámil se širokou škálou využití a uplatnění georadarové technologie. Technologie GPR mi připadá zajímavá, přestože její využití pro diagnostiku dopravních staveb je v ČR stále poměrně málo rozšířené, zřejmě z důvodu, že s ní odborná veřejnost není dostatečně seznámena nebo si myslí, že dosahuje nepřesných výsledků. Proto bych chtěl pokračovat v dalším studiu této metody a v budoucnu se případně zasadit o její širší uplatnění.

9 Použitá literatura

- [1] D. J. Daniels, „Ground Penetrating Radar 2nd edition: The Institution of Electrical Engineers", *Lond. Engl.* 726p, 2004.
- [2] K. Manish, *Problems, perspectives and challenges of agricultural water management*. InTech, 2012.
- [3] „History of Ground Penetrating Radar (GPR)", [Online]. Dostupné z: <https://www.obonic.de/article/ground-peentrating-radar-history/>.
- [4] Y. Cao, S. Dai, J. Labuz, a J. Pantelis, „Implementation of Ground Penetrating Radar", Local Road Research Board, Minnesota Department of Transportation, Report, srp. 2007.
- [5] H. M. Jol, Ed., *Ground penetrating radar: theory and applications*, 1. ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2009.
- [6] T. Saarenketo, *Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys*. 2006.
- [7] „Ground Penetrating Radar (GPR) Equipment | GSSI Inc. | Georadar", *GSSI Geophysical Survey Systems, Inc.* [Online]. Dostupné z: <https://www.geophysical.com/>.
- [8] „Archaeo-Physics, LLC | Case Studies in archaeological geophysics". [Online]. Dostupné z: <http://www.archaeophysics.com/cases/index.html>.
- [9] M. B. Magakgala, „Possibilities of using Ground penetrating radar in the Diagnosis of Road Pavements", Univerzita Pardubice, 2014.
- [10] Technické podmínky TP 233, *Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací*. 2011
- [11] Y. Cao, S. Dai, J. Labuz, a J. Pantelis, „Implementation of Ground Penetrating Radar", Local Road Research Board, Minnesota Department of Transportation, Report, srp. 2007.
- [12] T. Saarenketo, *Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys*. 2006.

- [13] R. D. Bold, „Non-Destructive Evaluation of Railway Trackbed Ballast", The University of Edinburgh, 2011.
- [14] T. R. Sussmann JR, „Application of Ground Penetrating Radar to Railway Track", The University of Massachusetts, 1999.
- [15] V. Malinská, „Analýza možností GPR pro detekci konstrukčních vrstev netuhých vozovek PK", Univerzita Pardubice, 2017.
- [16] D. J. Daniels, *Ground Penetrating Radar 2nd edition: The Institution of Electrical Engineers*. IET, 2004.
- [17] P. Anbazhagan a U. Planning, „Characterization of Rail Track Ballast Fouling Using Ground Penetration Radar and Field Sampling", 2013.
- [18] L. B. Conyers a J. E. Lucius, „Velocity analysis in archaeological ground-penetrating radar studies", *Archaeol. Prospect.*, roč. 3, č. 1, s. 25–38, 1996.
- [19] S. S. Artagan a V. Borecký, „Estimation Methods for Obtaining GPR Signal Velocity", s. 5.
- [20] M. Robinson, C. Bristow, J. McKinley, a A. Ruffell, „1.5.5. Ground Penetrating Radar", *Geomorphol. Tech.*, s. 26, 2013.
- [21] R. Matula, „Nedestruktivní diagnostika konstrukcí vozovek pozemních komunikací georadarem", Univerzita Pardubice, 2013.
- [22] J. De Pue, M. Van Meirvenne, a W. M. Cornelis, „Accounting for Surface Refraction in Velocity Semblance Analysis With Air-Coupled GPR", *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, roč. 9, č. 1, s. 60–73, led. 2016.
- [23] *2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2012): Shanghai, China, 4 - 8 June 2012*. Piscataway, NJ: IEEE, 2012.
- [24] O. Eisen, U. Nixdorf, F. Wilhelms, a H. Miller, „Electromagnetic wave speed in polar ice: validation of the common-midpoint technique with high-resolution dielectric-profiling and γ -density measurements", *Ann. Glaciol.*, roč. 34, s. 150–156, 2002.

- [25] P. M. Reppert, F. D. Morgan, a M. N. Toksöz, „Dielectric constant determination using ground-penetrating radar reflection coefficients", *J. Appl. Geophys.*, roč. 43, č. 2–4, s. 189–197, 2000.
- [26] W. W.-L. Lai, T. Kind, J. F.-C. Sham, a H. Wiggenhauser, „Correction of GPR wave velocity at different oblique angles between traverses and alignment of line objects in a common offset antenna setting", *NDT E Int.*, roč. 82, s. 36–43, zář. 2016.
- [27] Zhang Anxue, Jiang Yansheng, Wang Wenbing, a Wang Cheng, „Experimental studies on GPR velocity estimation and imaging method using migration in frequency-wavenumber domain", 2000, s. 468–473.
- [28] A. Novais, J. Costa, a J. Schleicher, „GPR velocity determination by image-wave remigration", *J. Appl. Geophys.*, roč. 65, č. 2, s. 65–72, čer. 2008.
- [29] Lang Weifeng a Lin Mingxing, „The estimation of the ground penetrating radar wave velocity based on template matching", 2010, s. 362–364.
- [30] J. F. C. Sham a W. W. L. Lai, „Development of a new algorithm for accurate estimation of GPR's wave propagation velocity by common-offset survey method", *NDT E Int.*, roč. 83, s. 104–113, říj. 2016.
- [31] X. Qiao, H. Zhang, T. Liu, Y. Y. Zhang, Y. H. Xia, a F. Yang, „GPR Wave Velocity Estimation Based on the Method of Curves Character and K-Means Clustering", *Appl. Mech. Mater.*, roč. 533, s. 242–246, úno. 2014.
- [32] S. Bijaksana, I. Rusyanti, M. I. T. Taib, L. A. Pasasa, a A. S. Andreas, „The Use of GPR in Delineating an Iron Sand Boundary and the Determination of Its Electromagnetic Wave Velocity: A Case Study in Jepara, Central Java", s. 14.
- [33] E. Gloaguen, D. Marcotte, B. Giroux, C. Dubreuil-Boisclair, M. Chouteau, a M. Aubertin, „Stochastic borehole radar velocity and attenuation tomographies using cokriging and cosimulation", *J. Appl. Geophys.*, roč. 62, č. 2, s. 141–157, čer. 2007.
- [34] A. Benedetto, F. Tosti, L. B. Ciampoli, A. Calvi, M. G. Brancadoro, a A. M. Alani, „Railway ballast condition assessment using ground-penetrating radar—An experimental, numerical simulation and modelling development", *Constr. Build. Mater.*, roč. 140, s. 508–520, 2017.

10 Přílohy

Příloha A – *Zaznamenaná data – CD disk*