

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh metodiky Správy železnic, s. o. pro použití georadaru v diagnostice a průzkumu  
drážního tělesa

Diplomová práce

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Anna Borkovcová**  
Osobní číslo: **D19330**  
Studijní program: **N0732A260017 Dopravní stavitelství**  
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**  
Téma práce: **Návrh metodiky Správy železnic, s. o. pro použití georadaru v diagnostice a průzkumu drážního tělesa.**  
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

## Zásady pro vypracování

**Vypracujte diplomovou práci zabývající se možnostmi použití georadaru na železničních drahách v ČR. V rámci práce navrhnete, na základě stávajících předpisů, metodiku týkající se použití georadaru pro diagnostiku a průzkum drážního tělesa v rámci organizace Správa železnic, s.o. Na základě rešerše souvisejících zahraničních i tuzemských norem navrhnete obecné postupy měření a metody vyhodnocování naměřených dat a získaných parametrů. Uveďte základní principy fungování GPR technologie, a specifikujte používaná zařízení a programové vybavení.**

Práce bude strukturována přibližně v následujícím smyslu:

1. Úvod
2. Cíle práce a použité metody
3. Teorie GPR, způsoby využití GPR na železnici
4. Rešerše literatury a norem používaných v ČR a zahraničí
5. Popis použitého HW a SW
6. Závěr

Příloha: Návrh metodického pokynu SŽ s.o.

Rozsah pracovní zprávy:  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

#### Seznam doporučené literatury:

HYSLIP, James P., Stanley S. SMITH, Gary R. OLHOEFT a Ernest T. SELIG. Assessment of railway track substructure condition using ground penetrating radar  
OLHOEFT, Gray R. a Ernest T. SELIG. Ground penetrating radar: Evaluation of railway track substructure conditions  
INNTRACK TIP5. Methodology of geophysical investigation of railway track defects  
DE BOLD, Robert Paul. Non-destructive evaluation of railway trackbed ballast  
SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY, S. O. Pokyny pro použití nedestruktivních geofyzikálních metod v diagnostice a průzkumu tělesa železničního spodku  
SUSSMANN, Theodore R. Railway track condition indicators from ground penetrating radar  
HUGENSCHMIDT, J. Railway track inspection using GPR.  
TP 233 – Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací  
TP 207 – Experiment přesnosti zařízení pro měření povrchových vlastností a dalších parametrů vozovek pozemních komunikací

#### **Další literatura dle doporučení vedoucího práce**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladislav Borecký, Ph.D.**  
Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání diplomové práce: **27. října 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **29. ledna 2021**

L.S.

---

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

---

**Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.**  
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byla jsem seznámena 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 § 47 b 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.

V Pardubicích dne \_\_\_\_\_

Bc. Anna Borkovcová

Poděkování:

Mé největší poděkování patří panu Ing. Vladislavu Boreckému, Ph.D. za ochotu, neocenitelné rady, podporu, trpělivost, odborné vedení a dohled v průběhu měření, vyhodnocování a zpracování mé diplomové práce. Nadále bych chtěla nejsrdečněji poděkovat své rodině za podporu a obětavost v průběhu celého mého studia.

## **ABSTRACT**

This study deals with the possibilities of using Ground Penetrating Radar (GPR) on railways in the Czech Republic. As part of the work, a draft methodology concerning the use of GPR for the diagnostics and survey of railway bodies within the organization of Správa železnic, s. o. was developed, based on existing regulations, standards, own knowledge and experience. Based on the search of related foreign and domestic technical standards, a general survey procedure and methods of evaluating measured data and obtained parameters in the testing of antenna systems were proposed. The basic principles of operation of GPR technology have been listed and the equipment and software used have been specified.

## **KEYWORDS**

Ground Penetrating Radar, GPR, signal velocity, relative permittivity, antenna tests, railways

## **ANOTACE**

Diplomová práce se zabývá možnostmi použití georadaru na železnicích v České republice. V rámci práce byl vypracován, na základě stávajících předpisů, norem, vlastních poznatků a zkušeností, návrh metodiky týkající se použití georadaru pro diagnostiku a průzkum drážního tělesa v rámci organizace Správy železnic, s. o. Na základě rešerše souvisejících zahraničních i tuzemských norem byl navržen obecný postup měření a metody vyhodnocování naměřených dat a získaných parametrů při testování anténních systémů. Byly uvedeny základní principy fungování GPR technologie a specifikována používaná zařízení a programová vybavení.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

georadar, GPR, rychlost šíření signálu, relativní permitivita, testy antén, železnice

## **TITLE**

Draft of methodology for the use of GPR in diagnostics and survey of railway body for Správa železnic, s. o.

# Obsah diplomové práce

0. Úvod.....	12
1. Cíle práce a použité metody.....	13
2. Georadar.....	14
2.1. Princip fungování.....	14
2.2. Vlastnosti materiálu .....	17
2.3. Sestava georadaru a sběr dat .....	22
3. Použití GPR pro diagnostiku železniční infrastruktury .....	26
4. Použité vybavení.....	33
4.1. Hardware.....	33
4.2. Software .....	38
5. Relevantní normy používané v ČR a zahraničí .....	41
6. Testování GPR sestav .....	43
6.1. Příprava měření.....	45
6.2. Průběh měření a jeho parametry. ....	48
6.3. Souhrn.....	49
7. Vyhodnocení určených parametrů GPR sestav .....	50
7.1. Warm-up period.....	51
7.2. Frekvenční spektra .....	59
7.3. Doporučené testy .....	67
7.4. Souhrn a doporučení .....	73
8. Závěr .....	76
Literatura:.....	78
Příloha I – Návrh metodiky Správy železnic, s. o. ....	87
Příloha II – Naměřená data a jejich zpracování (CD).....	87

## SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1 Princip transformace záznamu GPR [10].....	16
Obrázek 2 - Šíření signálu GPR [13].....	17
Obrázek 3 - Blokové schéma hlavních komponent GPR [24].....	22
Obrázek 4 - Příklady dipolových antén [26].....	23
Obrázek 5- Ukázka A-scanu [30] .....	24
Obrázek 6 - Ukázka B-scanu [30].....	24
Obrázek 7 - Ukázka C-scanu [30].....	25
Obrázek 8 - Technologický způsob vzniku radargramu při diagnostice drážního tělesa [31] .25	
Obrázek 9 - Řez železničním tělesem s detaily užitých materiálů [34].....	26
Obrázek 10 - Příčný řez standardním drážním tělesem [35] .....	27
Obrázek 11 - Sestava GPR na dvoucestném vozidle [37] .....	28
Obrázek 12 - Sestava GPR na kolejovém vozidle [38] .....	28
Obrázek 13 - Měřicí vůz Správy železnic, s. o. [40] .....	29
Obrázek 14 - Procedurální schéma údržby [70] .....	31
Obrázek 15 - Řídící jednotka IDS.....	33
Obrázek 16 - Ukázka antény HN-2000.....	34
Obrázek 17 - Ukázka antény TR DUAL-F 400/900.....	35
Obrázek 18 - Kontrolní jednotka SIR 30 .....	36
Obrázek 19 - Ukázka antén Správy železnic, s. o.....	36
Obrázek 20 - Ukázka HORN antény 2000 MHz od společnosti GSSI při samotném měření .37	
Obrázek 21 - Pracovní rozhraní K2 Fast Wave .....	38
Obrázek 22 - Pracovní rozhraní použitého programu ReflexW .....	39
Obrázek 23 - Zobrazení základních modulů programu ReflexW.....	39
Obrázek 24 - Rozhraní programu RADAN 7 [90] .....	40
Obrázek 25 - Fotografie ukázky měření GSSI systému Správy železnic, s. o. ....	44
Obrázek 26 - Fotografie ukázky měření IDS systému univerzity Pardubice .....	44
Obrázek 27 - Fotografie referenční plochy při nastavování výšky GC antény .....	46
Obrázek 28 - Nastavení pozice Air Coupled antény HN - 2000 .....	47
Obrázek 29 - Ukázka zobrazení dat ve formě Wigglemode programu ReflexW .....	51
Obrázek 30 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu UPa 2000 (C1 nahoře, C2 dole) .....	52
Obrázek 31 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu UPa 900 (C1 nahoře, C2 dole) .....	53
Obrázek 32 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu UPa 400 (C1 nahoře, C2 dole) .....	54
Obrázek 33 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu SŽ_2000 (C1 nahoře, C2 dole).....	55

Obrázek 34 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu SŽ_1000 (C1 nahoře, C2 dole).....	56
Obrázek 35 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu SŽ_400 č.3 (C1 nahoře, C2 dole)...	57
Obrázek 36 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu SŽ_400 č.4 (C1 nahoře, C2 dole)...	58
Obrázek 37 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu UPa 2000 (C1 nahoře, C2 dole) .....	60
Obrázek 38 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu UPa 900 (C1 nahoře, C2 dole) .....	61
Obrázek 39 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu UPa 400 (C1 nahoře, C2 dole) .....	62
Obrázek 40 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu SŽ 2000 (C1 nahoře, C2 dole).....	63
Obrázek 41 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu SŽ 1000 (C1 nahoře, C2 dole).....	64
Obrázek 42 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu SŽ 400 č.3 (C1 nahoře, C2 dole)....	65
Obrázek 43 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu SŽ 400 č.4 (C1 nahoře, C2 dole)....	66
Obrázek 44 - Vyznačení hodnot Amp a An na stopě měření s popisem – upraveno z [91].....	67
Obrázek 45 - Nákres stop získaných během kroků měření 1(a), 2(b), 3(c) s popisem [91] .....	70

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Vodivost, permitivita a rychlost signálu GPR v materiálech [15] .....	18
Tabulka 2 - Parametry řídicí jednotky IDS.....	34
Tabulka 3 - Parametry použitých antén IDS.....	35
Tabulka 4 - Parametry kontrolní jednotky SIR 30 [87] .....	37
Tabulka 5 - Parametry antén GSSI [88], [89].....	38
Tabulka 6 - Základní testovací parametry .....	45
Tabulka 7 - Použité délky časového okna [ns] .....	47
Tabulka 8 - Základní parametry záznamu dat .....	48
Tabulka 9 - Stanovená délka tzv. warm-up period .....	59
Tabulka 10 - Hodnoty $Amp$ a $A_n$ pro jednotlivé antény a cykly SNR.....	68
Tabulka 11 - Hodnoty $I_{NSR}$ pro jednotlivé antény a cykly.....	68
Tabulka 12 - Hodnoty $AMAX$ , $A_{min}$ a $A_{avg}$ pro jednotlivé antény a cykly SST.....	69
Tabulka 13 - Hodnoty $I_{Stability}$ pro jednotlivé antény a cykly .....	69
Tabulka 14 - Výpočtové koeficienty LIT pro jednotlivé antény a cykly.....	71
Tabulka 15 - Hodnoty $S_{v,rel}$ pro jednotlivé antény a cykly.....	71
Tabulka 16 - Hodnoty $Q_1$ a $Q_2$ pro jednotlivé antény a cykly LTST .....	72
Tabulka 17 - Hodnoty $Q_{max}$ pro jednotlivé antény a cykly.....	73
Tabulka 18 - Hodnoty výsledných ukazatelů testů SNR, SST, LIT a LTST v obou cyklech ..	74

## SEZNAM ZKRATEK

<b>1D</b> - One Dimensional	<b>GPRSPC</b> - GPR system performance
<b>2D</b> - Two Dimensional	compliance according to COST
<b>3D</b> - Three Dimensional	action TU1208 guidelines
<b>AC</b> - Air-coupled	<b>GSSI</b> - Geophysical Survey Systems, Inc.
<b>ASF</b> – Auto-stacking factor	<b>IDS</b> - Ingegneria dei Sistemi S. p. A.
<b>ASTM</b> – American Society for Testing and Materials	<b>KDS</b> - Department of Transport Structures
<b>CAD</b> – Computer Aided Design	<b>LIT</b> - Linearity Test
<b>CMP</b> - Common Mid-point	<b>LTST</b> - Long term Stability Test
<b>COST</b> - Cooperation in Science and Technology	<b>MIT</b> - Massachusetts Institute of Technology
<b>ČR</b> – Česká Republika	<b>PTP</b> – Peak-to-peak
<b>ČD</b> - České dráhy a.s.	<b>R&amp;TTE</b> - Radio and Telecommunications Terminal
<b>DFJP</b> – Dopravní fakulta Jana Pernera	Equipment
<b>DS</b> – Dopravní stavitelství	<b>RADAR</b> - Radio Detection and Ranging
<b>EC</b> – European Commission	<b>RDP</b> - Relative Dielectric permittivity
<b>EEC</b> - <i>European Economic Community</i>	<b>SNR</b> - Signal to Noise Ratio Test
<b>EHS</b> – Evropské hospodářské společenství	<b>SST</b> - Signal Stability Test
<b>EN</b> – Evropská norma	<b>SW</b> - Software
<b>ETSI</b> – European Telecommunications Standards Institute	<b>SŽ</b> - Správa železnic, s. o.
<b>EU</b> – Evropská unie	<b>TW</b> – time window
<b>GC</b> - Ground-coupled	<b>twt</b> - Two-way Travel Time
<b>GNSS</b> - Global Navigation Satellite System	<b>USA</b> - United States of America
<b>GPR</b> - Ground Penetrating Radar	<b>VVCD</b> – Výukové a výzkumné centrum v dopravě
	<b>WARR</b> - Wide Angle Reflection and Refraction
	<b>UPa</b> – Univerzita Pardubice

## ZÁKLADNÍ GPR TERMINOLOGIE

- **A-scan:** křivka, která se skládá z amplitud na časové ose, stopa signálu
- **Air-coupled anténa:** anténa GPR, která při měření využívá volný prostor mezi anténou a povrchem
- **Anténa:** zařízení, které mění elektrický proud na elektromagnetické vlnění a opačně
- **Anténní pole:** soustava mono nebo bi-statických antén pracujících současně
- **Anomálie:** jev způsobený odrazem signálu vlivem heterogenního prostředí
- **B-scan:** měřicí linie/profil, sestava A-scanů v řadě s definovaným rozestupem
- **Bistatická anténa:** druh antény s odděleným vysílačem a přijímačem
- **Útlum:** ztráta EM energie při průchodu vlnění materiálem
- **Frekvenční spektrum:** rozsah frekvencí zařízení
- **C-scan:** sestava paralelních B-scanů, 3 D radarový záznam
- **Centrální frekvence:** aritmetický průměr frekvencí frekvenčního spektra
- **Dipól:** lineárně polarizovaná anténa složená ze dvou vodivých částí
- **Ground-coupled anténa:** GPR anténa, která je při měření v přímém kontaktu s povrchem
- **Hloubkový dosah:** maximální hloubka radarového signálu, který lze zaznamenat
- **Horn anténa:** lineárně polarizovaná anténa s rozšířeným kovovým vlnovodem
- **Kontrolní jednotka:** elektronické zařízení kontrolující generující EM pulzy a sbírající naměřená data
- **Krok měření:** vzdálenost mezi dvěma následujícími stopami měření
- **Magnetická permeabilita:** fyzikální vlastnost popisující schopnost materiálu stát se magnetickým
- **Mono statická anténa:** anténa, kde je vysílač a přijímač jedním komponentem
- **Propojení:** schopnost GPR antény přenášet EM energii z vysílače do přijímače
- **Radargram:** radarový záznam ve formě 1D, 2 D nebo 3 D scanu
- **Relativní permitivita:** schopnost látky uchovávat a přenášet elektrický náboj
- **Rozptyl signálu:** jev způsobený šířením a odrazem signálu v heterogenním prostředí
- **Stopa měření:** viz. A-scan
- **Two-way travel time:** časový údaj charakterizující interval mezi vysláním a záznamem EM signálu
- **Vodivost:** fyzikální vlastnost materiálu popisující schopnost vést elektrickou složku vlny
- **Vzorek:** datový bod na zaznamenané stopě signálu
- **Warm-up period:** doba potřebná ke stabilizaci systému z důvodu zahřívání elektronických součástí

## 0. Úvod

Železniční doprava vyžaduje vysoké nároky na údržbu infrastruktury. Tato údržba by měla být prováděna na základě komplexní a přesné diagnostiky. Současné diagnostické metody jsou často velmi finančně náročné, což souvisí s jejich destruktivní povahou a ztrátami způsobenými dopravními omezeními a souvisejícími komplikacemi. Cílem požadavků provozovatelů železniční infrastruktury je maximalizovat zkrácení doby diagnostiky a souvisejících činností, s cílem snížení finančních nákladů s tím spojených.

Jednou z moderních metod diagnostiky železničního tělesa je využití georadaru. Je to metoda, která stále není jednou z hlavních, ale postupem času se díky svým výhodám uplatňuje stále více. Mezi tyto výhody patří zejména rychlost provádění průzkumu, možnost nepřetržitého měření dlouhých úseků, nedestruktivní povaha a možný hloubkový dosah. Použití GPR na železnici zahrnuje určení tloušťky a stavu šterkového lože, dohledání nehomogenit, detekci dutin a zvodnělých míst, diagnostiku mostních objektů a další.

Georadarová metoda má však také své nevýhody. Jedná se zejména o nároky na znalosti a zkušenosti operátora při vlastním sběru dat, ale i při jejich zpracování. Nutná je také znalost prostředí a okolních podmínek, které měření významně ovlivňují. Ač je georadar považován za univerzální nástroj, je vždy zásadní vybrat pro konkrétní aplikaci vhodný hardware a vhodně přizpůsobit jak způsob měření, tak kroky zpracování dat, které probíhá ve specializovaném softwaru. Při zanedbání těchto hledisek pak často dochází k nepřesné nebo mylné interpretaci dat, snižuje se tím efektivita diagnostiky a důvěra v georadar jako spolehlivou metodu obecně.

Z těchto důvodů je nutné zavedení určitých standardů jak pro metody a postupy měření, tak pro postupy při zpracování dat a formu výstupů. Nelze také opomenout standardizaci hardwarového vybavení, tedy určení mezních hodnot parametrů zařízení ovlivňujících kvalitu a spolehlivost měření. Obecné standardy zpracované na mezinárodní úrovni by měly být doplněny detailnějšími technickými standardy zpracovanými pro použití přímo osobami nebo organizacemi provádějícími správu, údržbu a diagnostiku infrastruktury, či vyžadovány takovými organizacemi v případě měření třetí stranou pro potřeby těchto organizací.

## 1. Cíle práce a použité metody

V mé bakalářské práci v předchozím studiu jsem se zabývala diagnostikou železničního tělesa pomocí georadaru. Hlavní součástí mé práce bylo měření a vyhodnocení GPR dat z vybraného úseku železniční trati. Z důvodu neexistence podrobných předpisů pro použití georadaru na železnici v České republice (ČR) jsem při studiu podkladů a přípravě měření vycházela především ze zahraničních článků, což představovalo značnou časovou zátěž. V průběhu tvorby práce jsem tuto situaci konzultovala mimo jiné také se zaměstnanci bývalé Správy železniční dopravní cesty.

Protože jsem se při svém dalším studiu chtěla i nadále věnovat oblasti GPR, zvolila jsem z výše popsaných důvodů téma práce:

### **Návrh metodiky Správy železnic, s. o. pro použití georadaru v diagnostice a průzkumu drážního tělesa**

Hlavním cílem této práce je příprava dokumentu, jenž by tvořil vhodný podklad pro oficiální závaznou metodiku používanou Správou železnic, s. o. v oblasti diagnostiky železničního tělesa pomocí georadaru. Dokument bude vypracován na základě rešerše zahraničních norem, souvisejících předpisů v České republice, a na základě poznatků a zkušeností získaných při předchozích měřeních. V této souvislosti je mým záměrem do metodiky také zahrnout část týkající se testování GPR systémů, které jsem se také v průběhu studia věnovala, a jež by měla dle mého názoru být nedílnou součástí takového dokumentu. Dále zde bude popsána možnost srovnávacího měření zařízení GPR na vybraném traťovém úseku či experimentálním měřícím poli, k jehož zahrnutí do zpracovávané metodiky jsem se inspirovala na základě tzv. experimentu přesnosti prováděného v souvislosti s diagnostikou pozemních komunikací.

Vlastní diplomová práce bude rozdělena na teoretickou (rešeršní) část mimo jiné popisující zařízení GPR a obecné metody jeho využití na železnici, a část experimentální, týkající se mnou provedených a vyhodnocených testování anténních systémů GPR. Práce bude tedy jak teoretickým, tak praktickým podkladem pro samotnou metodiku.

Vlastní dokument návrhu metodiky bude tvořit přílohu práce a bude kromě popisu metod sběru a vyhodnocení dat, obecných specifikací zařízení a dalších, také obsahovat části týkající se testování parametrů GPR systémů a srovnávacích měření GPR sestav.

## 2. Georadar

Na počátku dvacátého století bylo poprvé použito slovo RADAR, jakožto název složený z počátečních písmen spojení Radio Detection and Ranging. Význam tohoto názvu je stanovování poloh či vzdáleností pomocí radiových vln. Georadar, jako speciální typ radarového zařízení, se za účelem diagnostiky a monitorování podpovrchových a stavebních materiálů a jevů používá přibližně 50 let. [1, 2].

V roce 1861 byl skotským všestranným fyzikem Jamesem Clerkem Maxwellem (1831–1879) poprvé vylíčen výskyt elektromagnetických (EM) vln, avšak výzkum zákonitosti vysílání, zpětného odrazu, zachycení a následného zpracování signálu probíhal až od konce devatenáctého století. První pokusy provedl německý fyzik Heinrich Hertz (1857–1894), který experimentálně ověřil Maxwellovu teorii uveřejněnou v roce 1873 pod názvem “Pojednání o elektřině a magnetismu”. Hertz také roku 1887 zkonstruoval první funkční elementární vysílač a přijímač, při jehož užití bylo zjištěno různorodé pronikání nebo odražení signálu na základě struktury a typu měřeného materiálu. [3], [4].

V 60. letech minulého století vznikl v Massachusetts Institute Technology (MIT) naprosto první novodobý GPR. [5]. V roce 1972 započal vůbec první prodej komerčních GPR systémů americkou společností Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI) v čele s Rexem Morey a Artem Drakem. Tento přelom v poskytování GPR zařízení k běžnému civilnímu využití symbolizoval začátek masivního vývoje, jehož důkazem je patentování zhruba 300 nových typů zařízení během pouhých 20 let výzkumu. Zhruba v polovině 90. let minulého století došlo k enormnímu nárustu využívání technologií GPR, což vedlo i k vývinu a následnému rozvoji velkého počtu hardwaru a softwaru různými výrobci. [6]. Právě tento vývoj zapříčinil masivní zvýšení zájmu o využívání GPR technologií na celém světě. [1].

### 2.1. Princip fungování

Základní fyzika EM polí, generovaných GPR systémem, je popsána Maxwellovými rovnicemi, konstitutivní rovnice pak kvantifikují materiálové vlastnosti. Kombinace těchto dvou typů rovnic umožňuje kvantitativní popis signálů GPR [7]. Prostorové a časové proměnné spojují elektrické a magnetické pole, a jejich vzájemná závislost je popsána následujícími čtyřmi diferenciálními rovnicemi. [8]

$$\nabla \cdot E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

Zákon Maxwellova modifikovaného obvodu:

$$\nabla \cdot E = -\frac{\partial D}{\partial t} + J$$

Diferenciální tvar Gaussova zákona v elektrostatice:

$$\nabla \cdot D = \rho$$

Gaussova věta v magnetostatice (pro nestacionární pole):

$$\nabla \cdot B = 0$$

kde

$\rho$  je objemová hustota volného náboje [ $C/m^3$ ],

$E$  je vektor intenzity elektrického pole [ $V/m$ ],

$D$  je vektor hustoty elektrického toku (elektrické indukce) [ $C/m^2$ ]

$B$  je derivace magnetické indukce [ $T = kg/s/C$ ].

Příslušné parametry materiálních vlastností permitivity, magnetické permeability a vodivosti jsou popsány následujícími třemi rovnicemi konstitutivních vztahů.

$$D = \varepsilon E$$

kde  $\varepsilon$  je absolutní permitivita materiálu [ $F/m$ ],

$$D = \sigma E$$

kde  $\sigma$  je konduktivita (měrná elektrická vodivost) materiálu [ $S/m$ ],

$$B = \mu H$$

kde

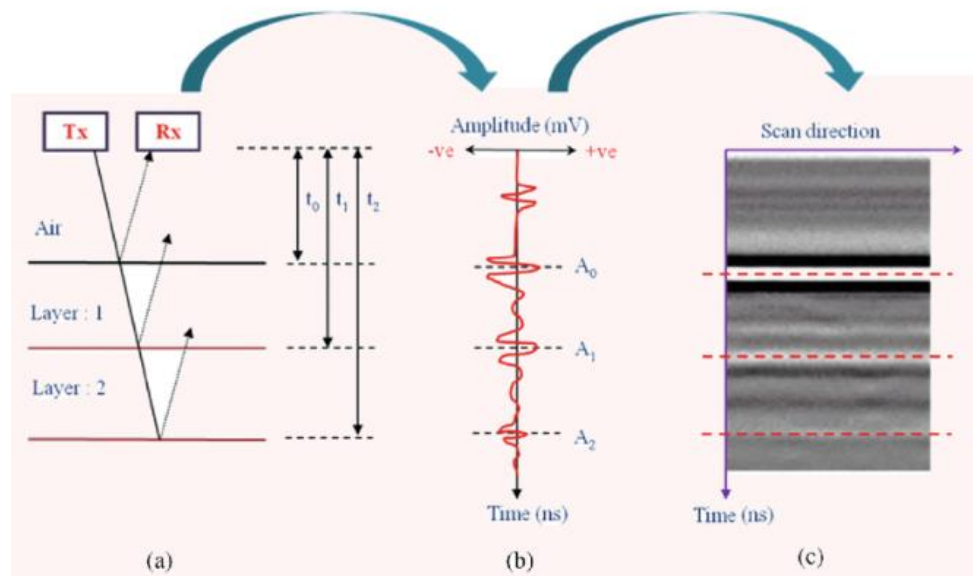
$\mu$  je magnetická permeabilita (propustnost) materiálu [ $H/m$ ],

$H$  je vektor intenzity magnetického pole [ $A/m$ ].

GPR je zařízení umožňující identifikovat rozhraní či objekty pod zemským povrchem. Hlavním parametrem pro detekci objektů jsou jejich odlišné EM vlastnosti vzhledem k okolnímu prostředí. Reflektovaný signál obsahuje informace o materiálu ve formě tvu, amplitudového tvaru a polaritě přijímaného signálu [21]. S pomocí těchto odlišností je tak možné určit umístění cizího objektu, jeho rozměry, velikost i materiál, ze kterého je složen [36]. V průběhu měření vzniká radarový záznam, který je označován jako radargram.

GPR systém vysílá diskretní pulzy EM energie. Rozsah frekvenčního pásma je přibližně od 10 MHz do 2,5 GHz pro impulsní systémy, a od 1 do 8 GHz pro stupňovité systémy [9]. Když pulz dorazí na rozmezí dvou materiálů s odlišnými EM vlastnostmi, dochází k reflexi

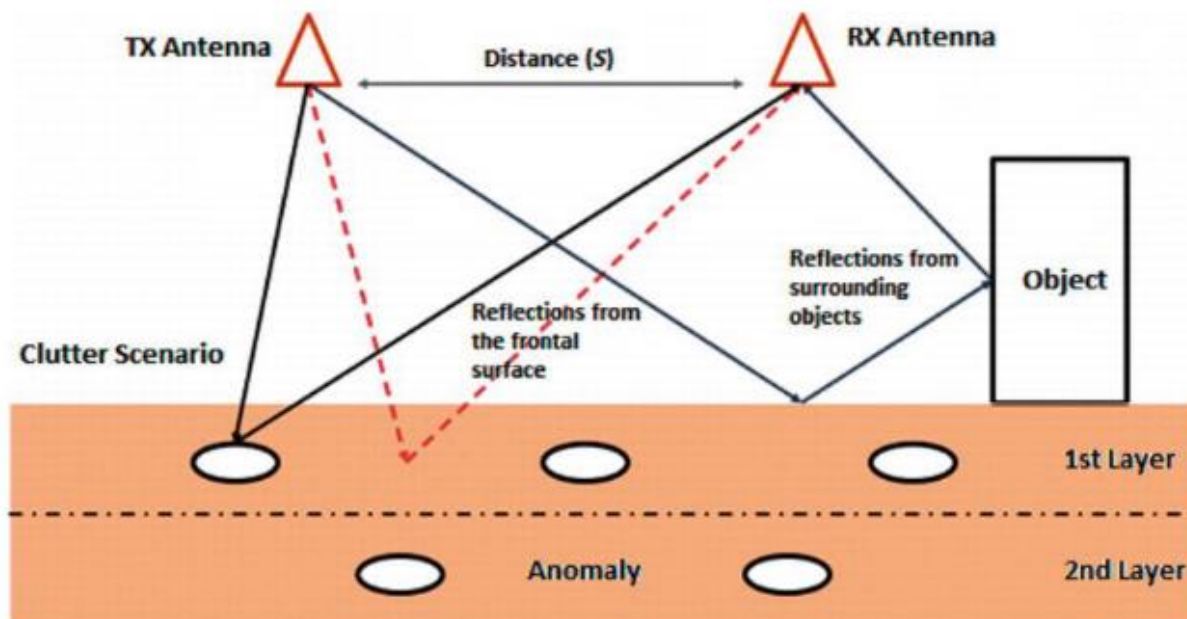
části energie, kdežto zbylá část proniká hlouběji do materiálu nebo konstrukce. Takzvanými anomáliemi, které jsou detekovány pomocí GPR, mohou být například změny vrstev půdy a hornin, hladina podzemní vody nebo umělé předměty uložené v měření prostředí [2]. Reflektovaná energie od těchto anomálií je přijímána a znázorňována jako křivka sestávající z výchylek na časové linii (nazývaná A-scan), která představuje časové období mezi emitováním a přijetím signálu. Tento časový interval [ns] se nazývá two-way travel time (twt) [6]. Na základě znalostí rychlosti EM vln, může být twt transformována na údaje o hloubce odrazu [2]. Tento základní princip je ilustrován viz Obrázek 1.



Obrázek 1 Princip transformace záznamu GPR [10]

Signály se šíří mezi vysílačem a přijímačem po několika trajektoriích. Naměřená data GPR sestávají z (viz Obrázek 2) EM spojení mezi anténami – přijímací a vysílací (direct coupling/ground coupling), povrchových odrazů, stochastického EM rušení (ze systému GPR nebo z okolního prostoru), odrazů od podpovrchových anomálií, a rozptýlených nebo odražených signálů [11]. Pro selektivní potlačení nežádoucích signálů se do antén aplikuje tzv. stínění. Hlavní cíle návrhu stínění jsou [12]:

- maximalizovat energii na trajektorii k a z podpovrchového cíle,
- minimalizovat energii přímé vlny,
- minimalizovat energii, která uniká do okolního prostředí,
- minimalizovat vnější EM šum.



Obrázek 2 - Šíření signálu GPR [13]

Předností využití GPR je jeho neinvazivní a nedestruktivní charakter, který dovoluje průzkum rozsáhlých ploch v relativně krátké době s poměrně nízkými investicemi. Navzdory těmto přednostem má GPR také některé omezující [11]:

- Užitím v nehomogenním prostředí se může navýšit počet chybných detekcí a limitních hodnot,
- Senzibilita na nechtěné signály (interference) způsobená různými přírodními i umělými činiteli,
- Citlivost na jiné zdroje EM polí,
- Potřeba zpracování a interpretace dat na základě zkušeností a znalostí školených specialistů

## 2.2. Vlastnosti materiálu

Z fyzikálního pohledu jsou možnosti využití GPR ovlivněny EM vlastnostmi materiálu. Je to především relativní dielektrická permitivita (RDP)  $\epsilon_r$ , magnetická permeabilita  $\mu$  a elektrická vodivost  $\sigma$ .

Relativní dielektrická permitivita (také označována jako dielektrická konstanta)  $\epsilon_r$ , charakterizuje schopnost látky uchovávat a přenášet elektrický náboj způsobený přítomností elektromagnetického pole. RDP materiálu může být definováno jako množství elektrostatické

energie uložené v objemu látky. Prakticky jde o hodnotu označující rychlost radarové energie, která prostupuje materiálem [11], [14]. Níže (viz Tabulka 1) jsou sepsány hodnoty permitivity, rychlosti a vodivosti pro vybrané materiály. Ve vzduchu je hodnota permitivity totožná jako ve vakuu (viz následující rovnici).

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0} \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ [F/m]}$$

kde

$c$  je rychlost světla [m/s],

$\mu_0$  je permeabilita vakua [H/m]

Relativní permitivita RDP může být poté formulována podle následující rovnice jako:

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

kde

$\varepsilon$  je permitivita média [F/m]

$\varepsilon_0$  je permitivita vakua [F/m].

Tabulka 1 - Vodivost, permitivita a rychlost signálu GPR v materiálech [15]

Material	$\varepsilon_r$ ; Davis and Annan (1989)	$\varepsilon_r$ ; Daniels (1996)	Velocity (m/ns)	Velocity (ft/ns)
Air	1	1	0.3	0.98
Distilled water	80		0.03	0.11
Fresh water	80	81	0.03	0.11
Sea water	80		0.03	0.49–0.57
Fresh water ice	3–4	4	0.15–0.17	0.35–0.49
Sea water ice		4–8	0.11–0.15	0.28–0.35
Snow		8–12	0.09–0.11	0.35–0.50
Permafrost		4–8	0.11–0.16	0.40–0.57
Sand, dry	3–5	4–6	0.12–0.17	0.18–0.31
Sand, wet	20–30	10–30	0.05–0.09	0.57–0.70
Sandstone, dry		2–3	0.17–0.21	0.31–0.44
Sandstone, wet		5–10	0.09–0.13	0.35–0.49
Limestones	4–8		0.11–0.15	0.37
Limestone, dry		7	0.11	0.35
Limestone, wet		8	0.11	0.25–0.44
Shales	5–15		0.08–0.13	0.33–0.40
Shale, wet		6–9	0.10–0.12	0.18–0.44
Silts	3–30		0.05–0.13	0.16–0.44
Clays	5–40		0.05–0.13	0.16–0.44
Clay, dry		2–6	0.12–0.21	0.40–0.70
Clay, wet		15–40	0.05–0.08	0.16–0.25
Soil, sandy dry		4–6	0.12–0.15	0.40–0.49
Soil, sandy wet		15–30	0.05–0.08	0.18–0.25
Soil, loamy dry		4–6	0.05–0.08	0.40–0.49
Soil, loamy wet		15–30	0.07–0.09	0.22–0.31
Soil clayey dry		4–6	0.12–0.15	0.40–0.49
Soil, clayey wet		10–15	0.08–0.09	0.25–0.31
Coal, dry		3.5	0.16	0.53
Coal, wet		8	0.11	0.35
Granites	4–6		0.12–0.15	0.40–0.49
Granite, dry		5	0.13	0.44
Granite, wet		7	0.11	0.37
Salt, dry	5–6	4–7	0.11–0.15	0.37–0.49

Ačkoli relativní permitivitu dílčích látek lze vyčíslat v odborných publikacích, lze je využít pouze orientačně a nelze je využít pro konkrétní materiál a podmínky [16]. Veškeré stavební materiály včetně zemin a hornin lze totiž charakterizovat jako kompozitní materiály, pro které je příznačné, že hodnoty jejich relativní permitivity jsou závislé na hodnotách relativních permitivit jejich dílčích složek, objemového poměru složek, geometrii a tvaru součástí, a na elektrochemické interakci mezi těmito složkami. V půdě a nestmelených stavebních materiálech, jsou tyto složky vzduch, voda (sněh či led), minerální látky a jejich erozní deriváty, jako jsou jíly, koloidní částice, soli a organické sloučeniny [36].

Hodnota amplitudy impulzu reflektovaného na rozhraní dvou vrstev závisí na rozdílu hodnot jejich RDP. Čím markantnější je rozdíl, tím větší kvantum energie se odráží na rozhraní [17]. Tyto diference jsou mnohdy dány zvláště podílem vody, rozdílnou texturou hornin, litologií, pórovitostí a hustotou materiálů [18]. U stavebního inženýrství jsou nejčastější rozhraní např. rozhraní mezi strukturálními vrstvami a u betonové výztuže. Poměr reflektované energie k celkové emitované energii se označuje jako koeficient odrazu (R), který závisí na rychlostech signálu v obou prostředích dle následující rovnice [17],

$$R = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2}$$

kde

$V_1$  je rychlost signálu v materiálu 1 [m/s],

$V_2$  je rychlost signálu v materiálu 2 [m/s].

Tvar reflektované vlny odpovídá zhruba sinusoidě, kde amplitudy mají kolísavě kladné a záporné hodnoty. Amplituda výchylky je nejdříve v kladných hodnotách, pokud EM vlna nejprve postupuje materiálem s poměrně nižší hodnotou relativní permitivity a dosáhne rozhraní s vyšší hodnotou relativní permitivity. Záporná amplituda je pak typická pro příklad průchodu elektromagnetické vlny nejprve materiálem s vyšší relativní permitivitou a následně dosáhne rozhraní materiálu s nižší hodnotou relativní permitivity. [19], [20]

**Magnetická permeabilita**  $\mu$  [H/m] charakterizuje schopnost látky zmagnetizovat se v blízkosti elektromagnetického pole. Jde o výši magnetické polarizace této látky. Látky s vyšší

magnetickou propustností více ovlivňují prostupující EM vlny, které jsou utlumeny, a v důsledku dochází ke snížení dosahu georadaru. [11], [14].

**Relativní permeabilita** může být popsána podle následující rovnice.

$$\mu_r = \mu/\mu_0 [-]$$

kde

$\mu$  je permeabilita materiálu [H/m]

$\mu_0$  je permeabilita vakua [H/m], jak je popsáno v následující rovnici.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ [H/m]}$$

Z podstaty hodnoty relativní permeability jsou látky rozděleny do tří skupin: diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické. Diamagnetické materiály jsou typické relativní permeabilitou menší než 1 (např. Ag, Au, Cu). Tyto materiály se prokazují velice limitovaným vzájemným působením s okolním magnetickým polem. Paramagnetické materiály jsou typické relativní permeabilitou nepatrně větší než 1 (např. Al, Mg, Pt) a také u nich dochází k malému vzájemnému působení s okolním magnetickým polem. Oproti tomu feromagnetické látky, které mají relativní permeabilitu výrazně vyšší než 1 (např. Co, Ni, Fe) jsou významně ovlivněny magnetickým polem. U těchto materiálů dochází k významným ztrátám, které jsou vztaženy k frekvenci okolního elektromagnetického pole [4]. U stavebních materiálů je relativní permeabilita rovna přibližně 1, a proto se s tímto vlivem při georadarovém měření nepočítá. [11].

**Elektrická vodivost**  $\sigma$  [S/m], popsána v následující rovnici, jako převrácená hodnota elektrického odporu, označuje schopnost materiálu vést elektrickou část EM vlny. Signál prostupuje do velkých hloubek u látek s nízkou vodivostí, jako je třeba zralý beton či štěrk, naopak u vodivých látek, jako je třeba zvodnělé jíly či čerstvý beton, jsou EM vlny poměrně rychle utlumeny, což ovlivňuje dosah georadaru. [14]

Elektrická vodivost je fyzikální vlastnost látek, závislá na frekvenci EM pole, ovlivňující jejich způsobilost vést elektrický proud [21], a lze ji popsat v rovnici:

$$\sigma = 1/\rho \text{ [S/m]}$$

kde

$\rho$  je elektrický odpor [ $\Omega$ ].

**Rychlost signálu GPR**  $v$  [m/s] je ovlivněna především relativní permitivitou materiálu a je určena a základě hodnoty  $twt$  získané přímým měřením. Jak vyplývá z výše uvedeného, lze rychlost šíření určit jako:

$$v = c / (\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}) \text{ [m/s]}$$

kde

$c$  je rychlost světla ve vakuu (přibližně  $3 \times 10^8$  m/s),

$\mu_r$  je relativní magnetická permeabilita [-],

$\epsilon_r$  je relativní dielektrická permitivita [-].

V případě cíleného přehlédnutí interakce georadarového signálu a magnetického pole je možné stanovit rychlost elektromagnetického signálu  $v_r$  jako:

$$v_r = c / (\sqrt{\epsilon_r}) \text{ [m/s]}$$

kde

$c$  je rychlost světla

$\epsilon_r$  je RDP [22].

Na základě těchto hodnot lze určit hloubku objektu  $d$  jako:

$$d = v_r \cdot (twt/2) \text{ [m]}$$

kde

$twt$  je two-way travel time [22].

A následně lze vypočítat útlum signálu  $\alpha$ , který se určí dle následující rovnice [15],

$$\alpha = 1,69 \cdot 10^3 (\sigma / \sqrt{\epsilon_r}) \text{ [dB/m]}$$

kde

$\sigma$  je vodivost [S/m]

$\epsilon_r$  je relativní dielektrická permitivita [-].

V souhrnu lze konstatovat, že možnost, jakým způsobem prochází signál látkou, ovlivňuje z hlediska rychlosti především relativní permitivita a z hlediska dosahu potom vodivost dané látky, a navzájem tyto charakteristiky mezi sebou nekorelují.

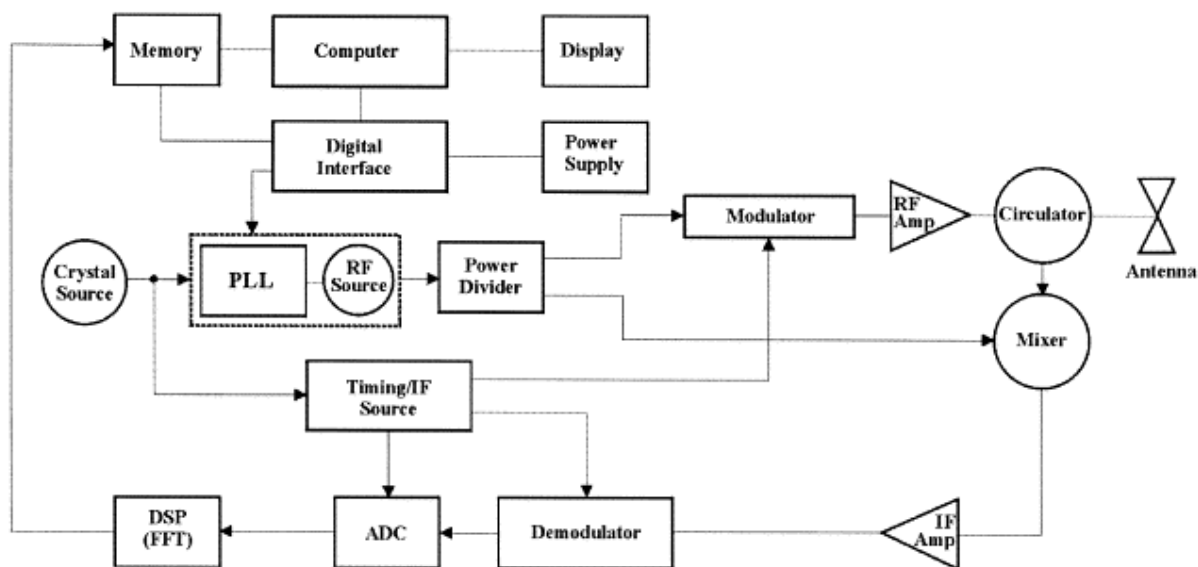
### 2.3. Sestava georadaru a sběr dat

Parametry použitého GPR hardwaru závisí na konkrétním druhu a způsobu použití, jež je dán především požadavky na rozlišení a hloubkový dosah měření. Tyto parametry jsou ovlivněny vlastnostmi dané lokality a vlastního měřeného materiálu. Vlastnosti, které jsou užívány pro charakterizaci GPR systému jsou především centrální frekvence, frekvenční rozsah, typ antén a jejich výkon, nastavení dosahu, odsazení měřících stop a metody post-procesingu. [23].

Georadarová sestava nejčastěji obsahuje tyto komponenty: [11].

- Jednotlivá anténní pole a monostatické či bistatické antény
- Centrální jednotka
- PC pro zobrazení a zpracování dat
- Zdroj elektrické energie
- Měřicí platformy
- další součásti jako jsou datové a napájecí kabely, zařízení pro určení polohy ad.

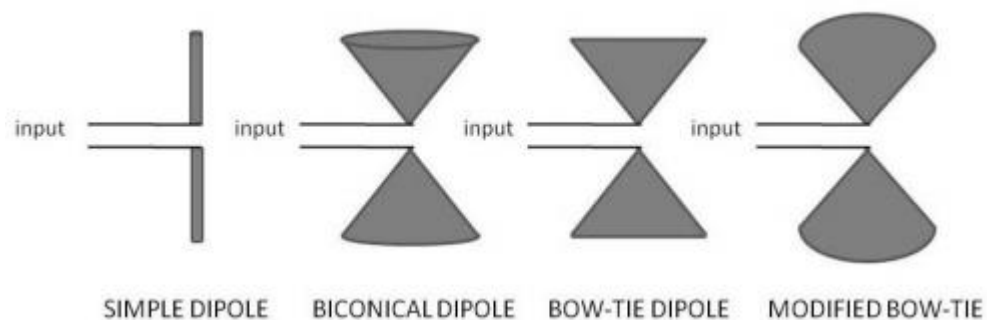
Blokové schéma hlavních komponentů je schematicky znázorněno viz Obrázek 3:



Obrázek 3 - Blokové schéma hlavních komponent GPR [24]

Vlastnosti GPR systému jsou dány především použitou anténou a její frekvencí, na které závisí její fyzické rozměry. Antény mohou být monostatické (vysílač i přijímač je jedním

komponentem) a bistatické (vysílač a přijímač jsou na sobě nezávislé komponenty). [9]. Nově se využívají i anténní pole, která se skládají z více antén. [25]. V současnosti se využívá široká škála druhů antén (cylindrical monopoles and dipoles, vee dipoles, biconical dipoles, bow – tie, dielectric horn, double-ridged horn, quad-ridged horn atd.). Některé příklady dipolových antén lze vidět viz Obrázek 4:



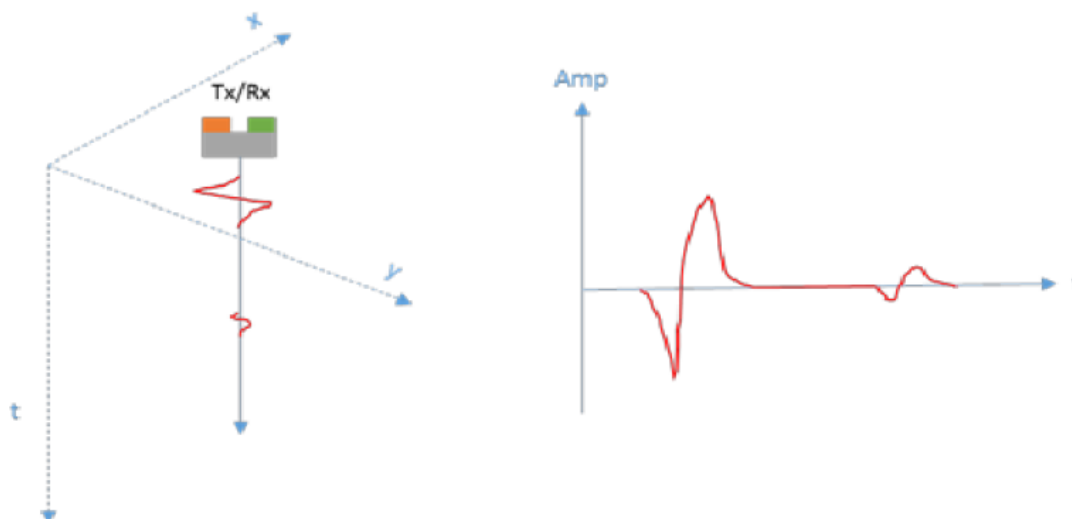
Obrázek 4 - Příklady dipolových antén [26]

Centrální frekvence je vybírána s ohledem na účel daného měření a hloubkový dosah. Vzhledem k vyššímu útlumu signálu v závislosti na narůstající frekvenci se v případě nutnosti většího hloubkového rozsahu použijí antény s nižší centrální frekvencí. Právě tato centrální frekvence se pohybuje pro GPR ve škále od několika desítek MHz až do jednotek GHz.

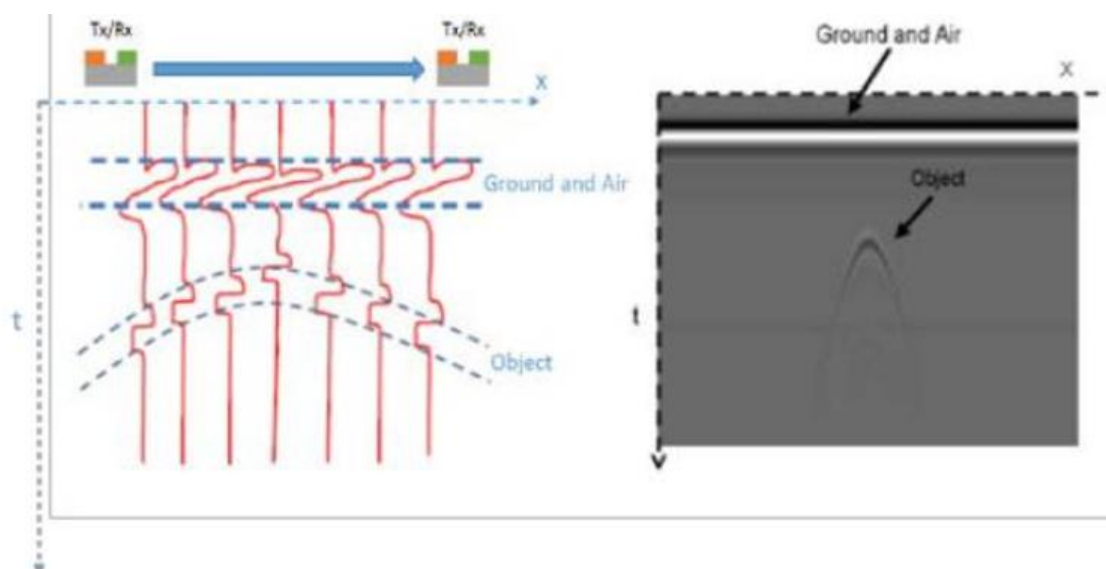
Dalšími činiteli majícím vliv na volbu GPR systému je poloha antény a způsob získávání dat. Z tohoto pohledu se antény rozdělují na air-coupled (AC) a ground-coupled (GC). První zmíněný typ je určen pro měření s volným prostorem (odsazení výšky 15–50 cm) mezi anténou a měřeným povrchem, což lze s výhodou využít při měření dlouhých úseků liniových staveb bez omezení provozu a mimořádných opatření [44]. Nedostatkem tohoto typu je malý hloubkový dosah pohybující se v intervalu 50–90 cm, podle použité frekvence. U druhého typu dochází k přímému kontaktu samotné antény a měřeného media, což dovoluje větší hloubkový dosah. Nedostatkem druhého typu antény je však tzv. near-field effect [36].

GPR lze použít k provádění měření buď v jednom přesném bodě, ve kterém je zaznamenána jedna stopa měřeného signálu (lze časem opakovat), která se označuje jako A-scan, nebo v řezu, který je tvořen množstvím A-scanů jdoucích chronologicky po sobě, což se označuje jako B-scan [27]. Takový datový záznam je pak tvořen tzv. vzorky (sample), které se skládají v měřicí stopy. Tyto stopy jsou pak sloupci 2D matice právě tohoto datového záznamu. Číselné vyjádření vzorků je rovno napěťové výchylce v dané stopě s konkrétním twt. [28]. V poslední

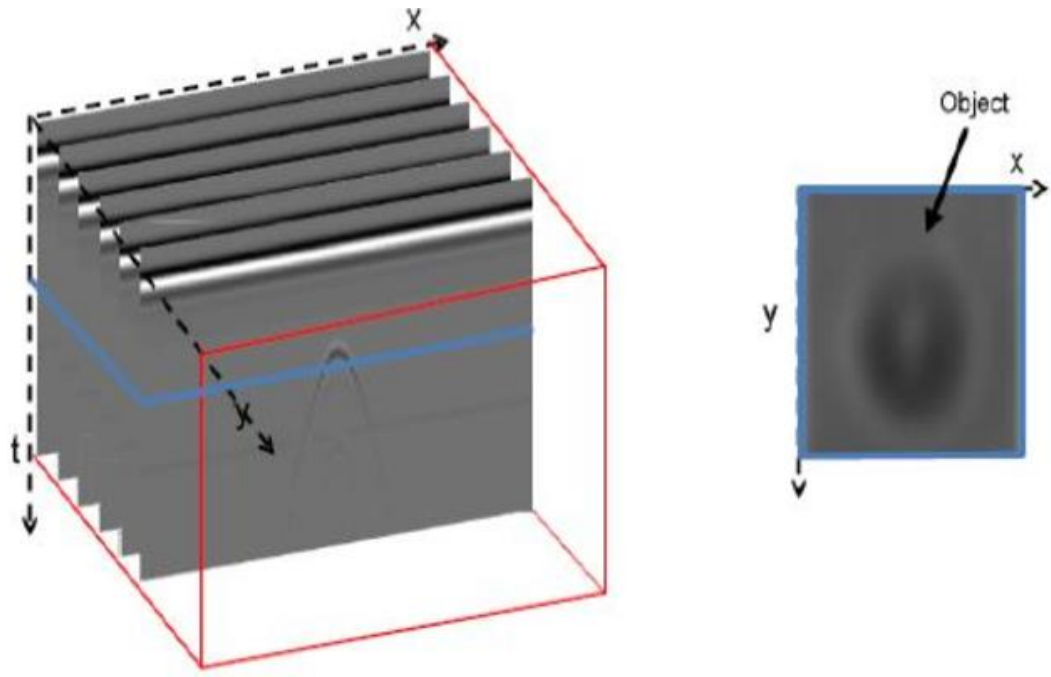
době je možné měřit i pomocí tzv. C-scanu, což je soustava ekvidistantních měřících řezů umožňujících oproti výše popsaným postupům provádět a vyhodnocovat 3D měření s možností tvorby svislých a vodorovných řezů. [11]. Na obrázku 5, 6 a 7 je znázorněn A-scan, B-scan a C-scan. Jiná odpovídající znázornění jsou uvedena například v [29].



Obrázek 5- Ukázka A-scanu [30]

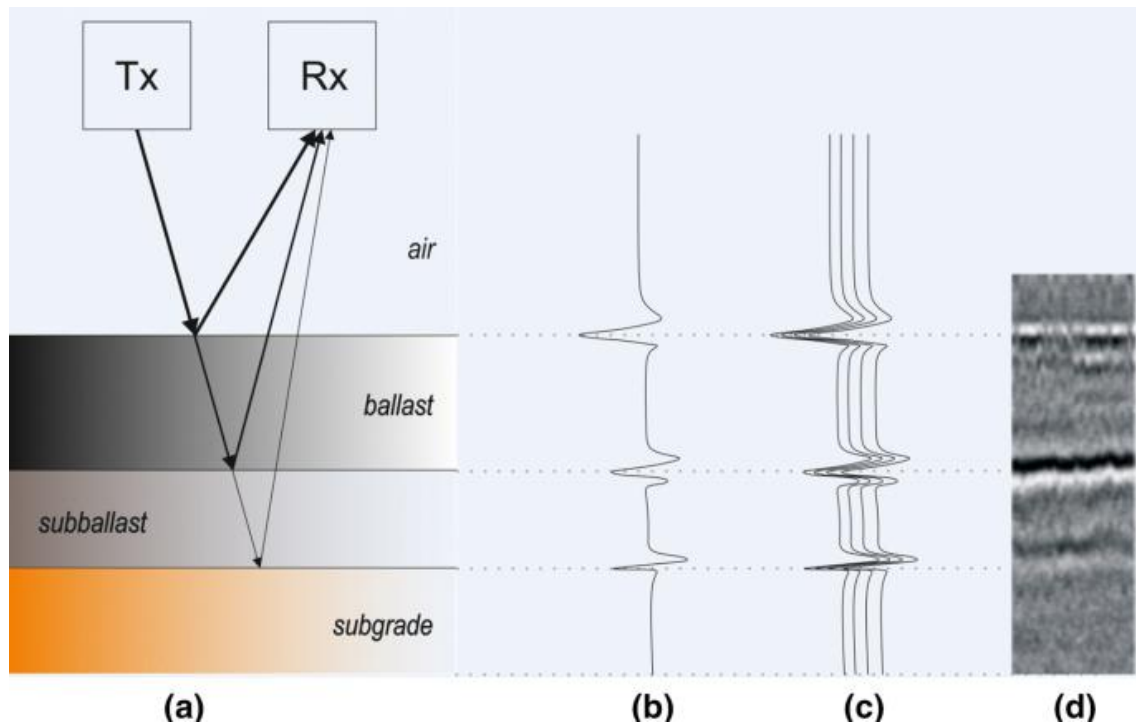


Obrázek 6 - Ukázka B-scanu [30]



Obrázek 7 - Ukázka C-scanu [30]

Na obrázku 8 je schematicky znázorněn vznik radargramu (B-scanu) při diagnostice drážního tělesa:



Obrázek 8 - Technologický způsob vzniku radargramu při diagnostice drážního tělesa [31]

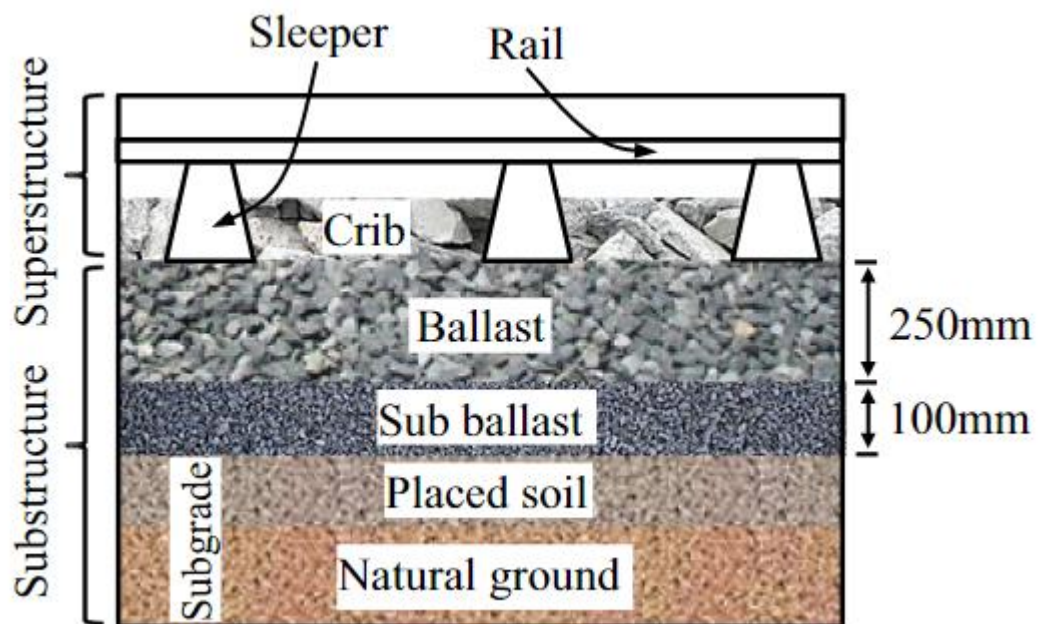
### 3. Použití GPR pro diagnostiku železniční infrastruktury

Tato kapitola rozvíjí s ohledem na téma práce kapitolu 2 v oblasti GPR diagnostiky drážního tělesa. Zásadním zdrojem informací v této oblasti byla práce [32], jejíž hlavním cílem bylo rozpracovat implementaci metody GPR do diagnostiky železnic, převážně šterkového lože.

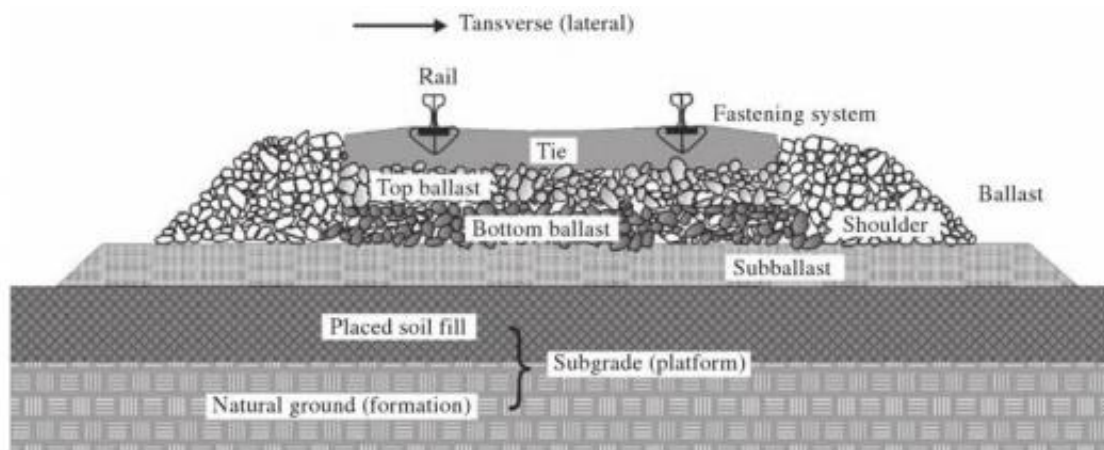
Šterkové lože lze podle [33] z hlediska diagnostiky rozdělit do čtyř oblastí

- **Crib** – mezipražcový prostor
- **Shoulder** – oblast za hlavami pražců
- **Top ballast** – svrchní část kolejového lože (pracovní oblast podbíječek)
- **Bottom ballast** – spodní část kolejového lože uložená na pláni tělesa žel. spodku

Částečný řez drážním tělesem je znázorněn v obrázku 9 a v obrázku 10.



Obrázek 9 - Řez železničním tělesem s detaily užitých materiálů [34]



Obrázek 10 - Příčný řez standardním drážním tělesem [35]

Primární funkcí štěrkového lože je přenášet zatížení od dopravy šířící se přes kolejnice a další prvky do železničního spodku a zároveň zajistit odvodnění bez vzniku poruch. [35]. Podrobněji lze nejdůležitější funkce štěrkového lože podle [33] shrnout jako:

- Reakce na zatížení přenášené z pražců na spodní vrstvy (svislé, příčné a podélné síly),
- Transfer a absorbování energie z kolejnic do spodních vrstev
- Umožnění konsolidace zrn kameniva vzniklých drcením materiálu a zněčištěním
- Zajištění rychlého odvodnění
- Redukce tlaků v prostoru pod pražci
- Při strojním podbíjení kolejí slouží jako materiál určující jejich geometrické uspořádání. Díky němu je pak samotné podbíjení rychlejší a přesnější

Přesná znalost stavu železničního tělesa na základě kvalitní diagnostiky je důležitá pro efektivní hodnocení a proces rozhodování o jeho údržbě a rekonstrukci. GPR začal být pro tyto účely užíván čím dál více v polovině 90. let [36]. Jedno z prvních úspěšných kontrolních měření GPR provedl ve Švýcarsku v letech 1998 a 2000 Hugenschmidt a v roce 1988 Gallagher a kol. [36]. Od té doby bylo provedeno množství výzkumů týkajících se různých aplikací GPR na železnici, při použití mnoha typů zařízení a měřících platform. Příklady sestav GPR na dvoucestném a kolejovém voze jsou znázorněny na obrázku 11 a na obrázku 12.



Obrázek 11 - Sestava GPR na dvoucestném vozidle [37]



Obrázek 12 - Sestava GPR na kolejovém vozidle [38]

Na tomto místě je důležité zdůraznit hlavní rozdíly v pokynech pro používání GPR na železnici v různých zemích. Například v USA v roce 2009 zahájilo středisko US Transport Technology Center rozsáhlý projekt společně financovaný Americkou asociací železnic a Federální správou železnic, zaměřený na objektivní hodnocení různých technologií GPR na železničních tratích, rozvoj GPR, pokyny v této oblasti a určení dalších potřeb výzkumu pro zlepšení aplikací GPR [86]. V mnoha zemích však takové pokyny nejsou zpracovány nebo GPR jako diagnostický nástroj není používán vůbec.

Průzkum GPR na železnicích v České republice se řídí zejména těmito technickými předpisy:

- *Pokyny pro použití nedestruktivních geofyzikálních metod v diagnostice a průzkumu tělesa železničního spodku [39]. Zde jsou mimo jiné popsány příklady využití georadaru, jeho výhody, nevýhody, omezení, příprava a způsob měření, zpracování a vyhodnocení údajů včetně interpretace výsledků.*
- *Podmínky pro měření tratí Českých drah (ČD) georadarem a pro měření překážek prostorové průchodnosti tratí ČD mimodrážními zhotoviteli.*
- *Pokyny pro používání georadaru v měřícím voze pro železniční svršek.*

Diagnostická souprava Centra telematiky a diagnostiky Správy železnic, s. o. s GPR vybavením je vidět na Obrázku 13:



Obrázek 13 - Měřící vůz Správy železnic, s. o. [40]

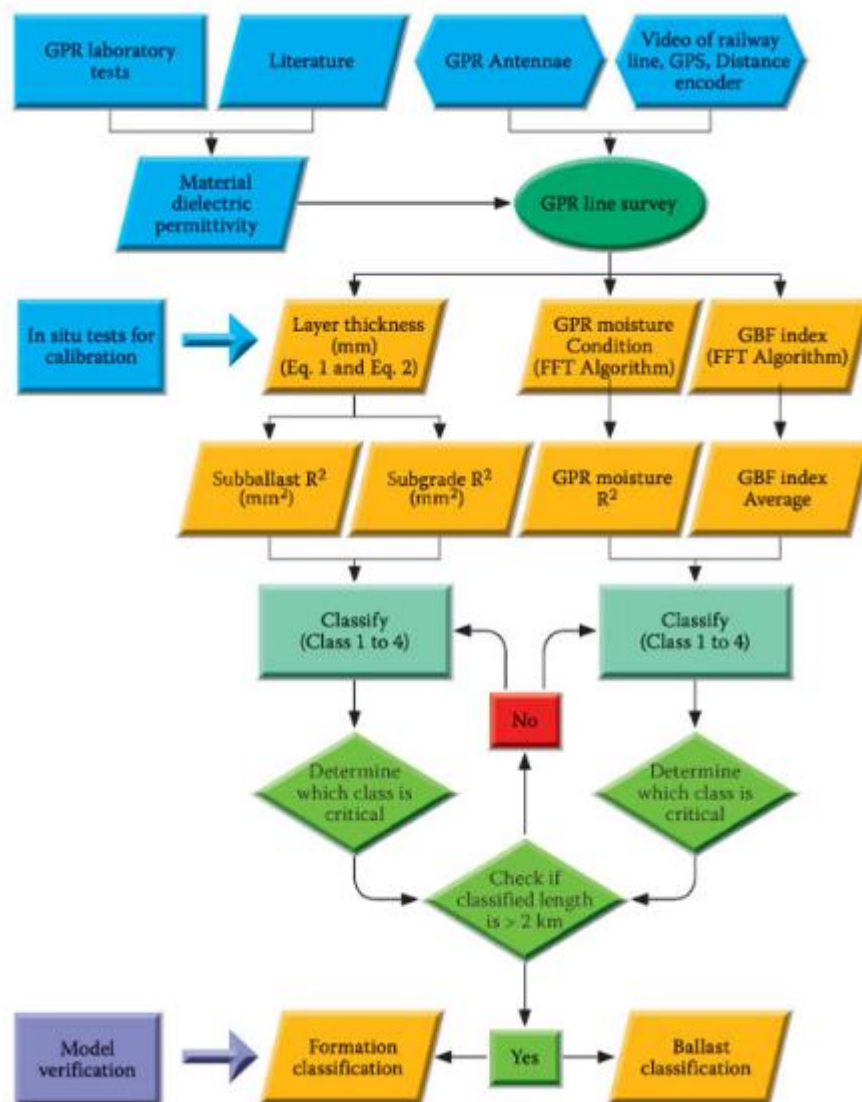
Přítomnost kolejnic, pražců a dalších objektů činí železniční tratě poměrně obtížným prostředím pro provádění průzkumu GPR s vysokými nároky na metody sběru a zpracování dat [41]. Proto pro správnou kalibraci a validaci GPR dat v reálných podmínkách je stále nutné provádět příčné výkopy nebo sondy na klíčových místech. Dalším možností je určení rychlosti signálu pomocí metod, jako je *Wide-angle Reflection and Refraction* (WARR) nebo *Common Mid-point* (CMP). Základní obtíže a nevýhody při sběru dat jsou uvedeny například v [36, 42, 43, 59] a lze je shrnout jako: [32]

- rušení kolejnicemi a pražci (zejména betonovými pražci)
- elektrická vedení rušící signál v případě bistatických a nestíněných antén
- množství různých podpovrchových a povrchových zařízení, a dalších objektů
- velikost kameniva šterkového lože blízkosti se vlnové délce GPR signálu (v případě použití vyšších frekvencí)

Za účelem správného vyhodnocení stavu šterkového lože je tedy nutná především minimalizace nebo odstranění nežádoucích účinků železobetonových pražců, kabelů a kolejnic [44–47]. V tomto ohledu vyvinuli Al-Qadi a kol. [42] metodu zpracování dat v časově-frekvenční oblasti, díky níž lze odstranit rušení a výše popsané vlivy železničního prostředí. Hugenschmidt [59], [48] definoval sekvenci kroků post-processingu dat pro snížení a následné odstranění účinků pražců. V [49] je popsán SW filtr, který byl použit k potlačení vícenásobných vln a jejich rozptylu. V [50] byla použita parabolická transformace zaznamenaného signálu pro eliminaci vlivu železničních pražců.

GPR se používá na železnici nejen pro stanovení stavu šterkového lože, ale v široké škále aplikací – od stanovení tloušťky vrstev [51], zkoumání stability násypů [48, 52], lokalizaci zvodnělých míst [44], až po např. detekci úseků permafrostu [53–56]. Mnoho studií, např. [57], [36], [58], [59], [60], bylo zaměřeno na hodnocení stavu podloží. GPR lze použít také k detekci anomálií, jako jsou dutiny, vodní kapsy nebo umělá tělesa [57], [61]. Studie [62] se zabývala zhodnocením možností použití georadaru pro diagnostiku kolejového svršku obecně, především ale byla zaměřena na zjišťování tloušťky konstrukčních vrstev a vyhodnocení stupně znečištění šterkového lože. Zhodnocením stavu kameniva šterkového lože pomocí GPR se také zabývala studie [63], měření bylo prováděno pomocí ručního kolejového vozíku na zkušebním úseku depa kolejových vozidel. Vlivem vlhkosti a míry znečištění šterkového lože na parametry odraženého a zaznamenaného GPR signálu se pak zabývala studie [64].

Rozhodující, z hlediska posuzování stavu železničního tělesa, jsou základní geotechnické vlastnosti. Jedním z nejdůležitějších cílů je v této souvislosti hodnocení obsahu vlhkosti [65, 66]. Přibližné stanovení této veličiny přímo z analýzy amplitud bylo provedeno bez výpočtu dielektrické permitivity v [67]. Jiným klíčovým kritériem je modul přetvárnosti. Několik studií ukázalo velmi vysokou závislost mezi EM vlastnostmi a deformačními vlastnostmi v různých typech půd a kameniva. Ve výzkumu [68] prováděném v Transport Technology Center, Inc. (USA), autoři deklarují možnost stanovení modulu pružnosti pomocí GPR s přesností až 3,4 MPa. V [82] autoři použili spektrální analýzy ve frekvenční oblasti k posouzení “kritických” geometrických prvků kameniva kolejového lože. V [69] bylo z pohledu GPR diagnostiky navrženo procedurální schéma pro provádění účinné údržby. Podobné schéma je znázorněno v obrázku 14.



Obrázek 14 - Procedurální schéma údržby [70]

Rovněž byl řešen výběr centrální frekvence jako jednoho z nejdůležitějších parametrů systémů GPR. V současnosti se místo nízkofrekvenčních antén používají vysokofrekvenční AC systémy, které mají, pokud jde o hodnocení stavu znečištění, mnoho výhod [71, 72]. Důležitost optimalizace výběru centrálních frekvencí podle cíle měření je zdůrazněna v [36]. Byla také provedena porovnání AC a GC antén pro posouzení stavu podloží [73]. Obdobné testy byly provedeny s 1GHz [43], 400MHz [53, 74] a 500MHz [21, 58] anténami. V nedávné době se ukázalo, že účinným nástrojem pro diagnostiku železničního tělesa je použití multifrekvenčních GPR systémů [75]. Optimalizace konfigurace antén pro práci ve vícefrekvenčním systému byla popsána v [45]. V [76] bylo popsáno významné zvýšení kvality diagnostiky podloží a detekce rozhraní díky použití tzv. 3 D georadaru.

Z důvodu požadavků na průzkum dlouhých úseků tratí je důležitým aspektem automatizace vyhodnocování naměřených dat. Nový přístup k průzkumu a analýze dlouhých sekcí, založený zejména na analýze ve frekvenční oblasti byl využit např. v [77] a [78]. V případě diagnostiky železničního spodku byla také často používána kombinovaná časově-frekvenční analýza za účelem vybrat odpovídající data pro následující aplikaci v automatickém detekčním systému. V [79] byl představen automatický systém pro hodnocení stavu šterkového lože na základě výběru amplitud odrazů charakteristických frekvencí a jejich klasifikace. Byl také vyvinut automatizovaný systém založený na analýze spektra amplitud pro klasifikaci znečištění šterkového lože [80]. V [81] bylo představeno zařízení GPR speciálně určené pro kontrolu a ověřování železničních tratí bez nutnosti přerušování pravidelného provozu.

V několika studiích byla pro simulaci signálu GPR v časové oblasti použita metoda konečných diferencí [81–83]. Používá se také kombinace GPR s jinými nedestruktivními metodami [84], a také se např. řeší otázka instalace umělých rozhraní do železničního tělesa pro lepší diagnostiku pomocí GPR [85]. Vzhledem k tomu, že se dnes používá mnoho komerčních hardwarových a softwarových nástrojů [86], je vzájemné srovnání různých systémů také důležitým úkolem. V této souvislosti Maturana a kol. [65] porovnali různé systémy GPR od tří různých výrobců s cílem zhodnotit kvalitu naměřených dat. V [2] bylo hodnoceno šest komerčních GPR systémů s různými centrálními frekvencemi.

## 4. Použité vybavení

Sestava GPR využitá pro potřeby této diplomové práce je ve vlastnictví Katedry dopravního stavitelství (KDS) Dopravní fakulty Jana Pernera (DFJP) na Univerzitě v Pardubicích (UPa). Jedná se o měřicí systém firmy Ingegneria dei Sistemi (IDS) GeoRadar s názvem RIS Hi-Pave. Pro záznam dat byl použit Software K2 FAST WAVE a pro jejich zpracování software Rexlex W. Zároveň byly testovány i antény Správy železnic, s. o. od výrobce Geophysical Survey System, Inc. (GSSI) s kontrolní řídicí jednotkou SIR-30 se softwarem pro sběr dat RADAN 7. Pro zpracování naměřených dat byl použit stejný program jako v případě sestavy KDS.

### 4.1. Hardware

Součástí systému IDS je vícekanálová řídicí jednotka DAD MCh Fast Wave, baterie s kapacitou 12 Ah o napětí 12 V, měřicí antény, Odometr – zařízení pro měření vzdálenosti WHE PAVE, nosné konstrukce a dalšího příslušenství (kabely, upevnění, a další), včetně počítačové jednotky Toughbook Panasonic CF-53. Pro měření na železniční trati byl použit ruční kolejový měřicí vozík navržený a sestavený na Katedře dopravního stavitelství (měření v rámci BP). Pro laboratorní měření bylo využito vybavení laboratoří sekce DS Výukového a výzkumného centra v dopravě (VVCD) v Doubravících u Pardubic. Speciálně pro testování antén byl použit převážně portálový jeřáb o nosnosti 5000 kg.

Použitá řídicí jednotka IDS je znázorněna v obrázku 15.



Obrázek 15 - Řídicí jednotka IDS

Parametry řídicí jednotky jsou uvedeny v následující tabulce 2:

Tabulka 2 - Parametry řídicí jednotky IDS

Frekvence pulzů:	400 kHz;
Rychlost skenování:	až 4760 skenů za sekundu (@ 128 vzorků na sken)
Dosah:	až 9999 ns;
Počet:	A/D převodníků: 2;
Frekvence sběru dat (A/D clock):	400 kHz;
Vzorkování:	16 bit;
Rozlišení:	více než 5 psec;
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 standard; až 8 TR s rozšiřujícím boxem; až 4 TR DUAL F;
Počet kanálů:	8;
Rozměry:	22 cm x 17 cm x 5,5 cm;
Váha:	1,5 kg;
Odolnost proti prachu a vodě:	(IP 64);
Průměrná spotřeba:	< 10 W

Využité antény Katedry dopravního stavitelství od společnosti IDS jsou dvojího typu. První z antén je typu air-coupled (AC) konstrukce tvaru horn s označením HN-2000 o centrální frekvenci 2000 MHz, druhá anténa je typu ground-coupled (GC) konstrukce bow – tie o centrálních frekvencích 400 a 900 MHz s označením TR DUAL-F 400/900. První typ je znázorněn v obrázku 16 a druhý typ je v obrázku 17:



Obrázek 16 - Ukázka antény HN-2000



Obrázek 17 - Ukázka antény TR DUAL-F 400/900

Parametry použitých antén IDS jsou uvedeny v následující tabulce 3:

Tabulka 3 - Parametry použitých antén IDS

anténa	HN-2000	anténa	TR DUAL-F 400/900
Typ antény:	stiněná dipólová (air coupled)	Typ antény:	stiněná dipólová
Počet kanálů:	1	Počet kanálů:	2
Centrální frekvence:	2 GHz	Centrální frekvence:	400/900 MHz
Rozměry:	60 cm x 22 cm x 40 cm	Rozměry:	43 cm x 37 cm x 20 cm
Váha:	7 kg	Váha:	6 kg
Provozní vlhkost:	< 90 %	Provozní vlhkost:	< 90 %
Odolnost proti vodě:	(IP 65)	Odolnost proti vodě:	(IP 65)
Provozní teplota:	-40°C až 50°C	Provozní teplota:	-40°C až 50°C

Kromě vybavení KDS bylo použito vybavení Správy železnic, s. o. Šlo o antény o frekvencích 400 (typ Ground-coupled, konstrukce bow – tie), 1000 a 2000 MHz (typ Air-coupled a konstrukce horn). Jak antény, tak kontrolní jednotka jsou znázorněny v obrázku 18, 19, 20, technické specifikace kontrolní jednotky a antén jsou potom uvedeny v tabulkách 4 a 5.



Obrázek 18 - Kontrolní jednotka SIR 30



Obrázek 19 - Ukázka antén Správy železnic, s. o.



Obrázek 20 - Ukázka HORN antény 2000 MHz od společnosti GSSI při samotném měření

Tabulka 4 - Parametry kontrolní jednotky SIR 30 [87]

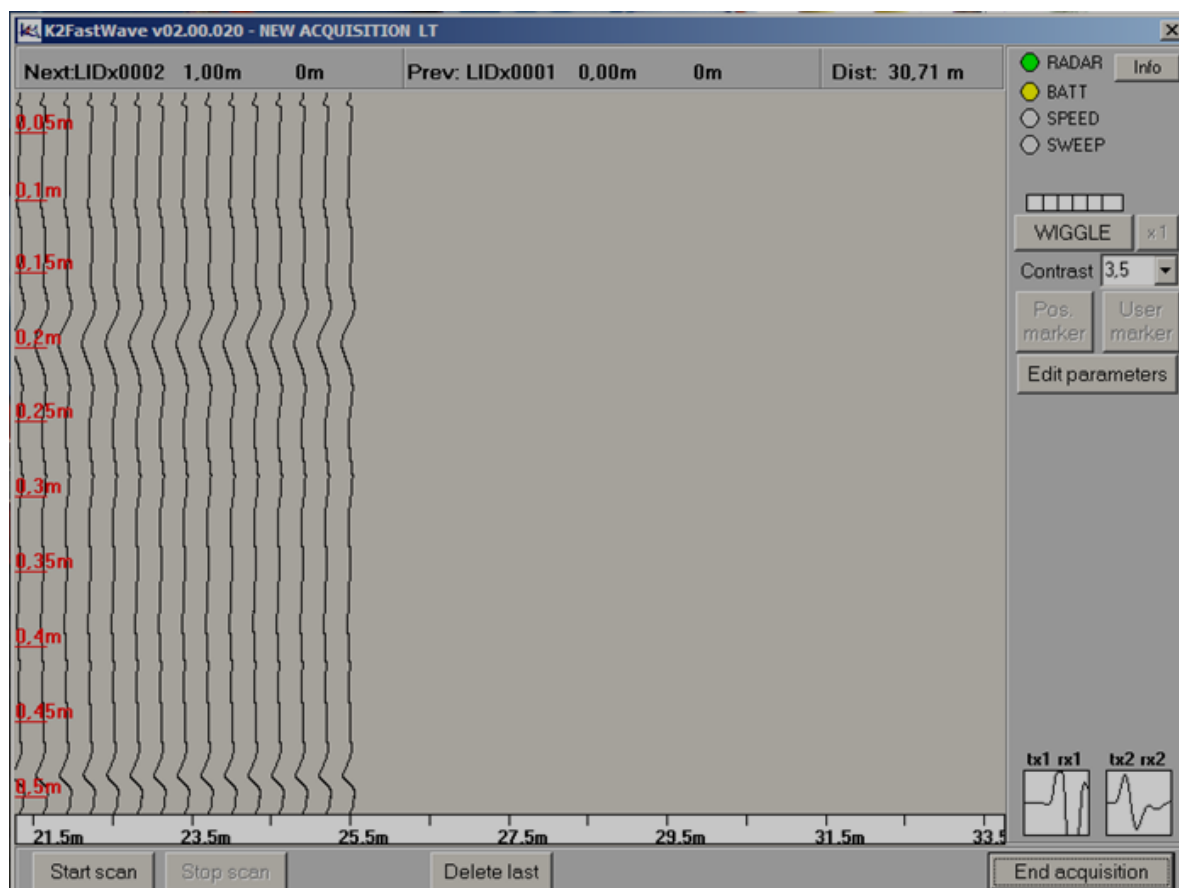
SYSTÉM	SIR 30
PODPORA ANTÉN	Kompatibilní se všemi GSSI analogovými anténami
POČET KANÁLŮ	Současný záznam dat z jedné až ze čtyř antén; u dvou propojených systémů až z osmi antén
DATOVÉ ÚLOŽIŠTĚ	Interní paměť: 900 GB
DRUHY ZOBRAZENÍ	Zobrazení měřeného profilu s barevnou škálou o 256 barvách nebo zobrazení ve formě jednotlivých stop
PRACOVNÍ ROZHRANÍ	externí laptop nebo desktop s připojeným externím monitorem a ovládacím rozhraním
FORMÁT DAT	RADAN® (.dzt)
INTERVAL STOP	Uživatelsky definovaný
VÝSTUPNÍ FORMÁT DAT	32-bit
1-4 KANÁLY @ 100 KHZ PRF	Počet vzorky   Maximální rychlost sběru (scanů/Sec) 256   326 / 512   178 / 1024   93 / 2048   48 / 4096   24 / 8192   12 / 16,384   8
1-4 KANÁLY @ 800 KHZ PRF	Počet vzorky   Maximální rychlost sběru (scanů/Sec) 256   1449 / 512   990 / 1024   606 / 2048   341 / 4096   182 / 8192   94 / 16,384   48
POČET VZORKŮ ZA SEKUNDU	256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 16,384
ČASOVÝ DOSAH	0-20,000 ns plný rozsah, uživatelsky definované zesílení signálu -42 to +126 dB. Počet definovaných bodů křivky
EXTERNÍ ROZHRANÍ	Tři rozdílné vstupy/kedy: anténa, hlavní ovládací panel, zařízení a příslušenství
AUTOMATICKÉ NASTAVENÍ SYSTÉMU	Druh zobrazení, způsob ukládání a konfigurace antén
JAZYKY	angličtina a čínština
PRACOVNÍ TEPLOTA	-10°C to 50°C venkovní teplota
NAPÁJENÍ	260W max při 95-250V 50/60Hz pro střídavé napětí nebo 30A pro 10 V až 28 V při stejnosměrném napětí
RYCHLOST PŘENOSU DAT	až 800 KHz
DOSTUPNÉ KONEKTORY	Vstup antén: 2 nebo 4; Odometr, záznamové zařízení; napájení, seriový port RS232 pro GPS, vstup pro
ROZMĚRY	45 x 33 x 13 cm
HMOTNOST	8.4 kg
RELATIVNÍ VLHKOST	< 95 %
SKLADOVACÍ TEPLOTA	-40°C to 60°C

Tabulka 5 - Parametry antén GSSI [88], [89]

MODEL ANTÉNY:	4105(NR)/42000	4108	50400
Centrální frekvence (MHz):	2000	1000	400
Délka pulzů (ns):	0,5	1	2,5
Rychlost vysílání pulzů (kHz):	300	300	250
Hloubka dosahu (m):	0 - 0,75 m	0 - 0,9 m	0 - 4 m
Váha (kg):	7,3 kg	7,3 kg	5 kg
Rozměry (cm):	21 x 55,6 x 49,5 cm	21 x 55,6 x 49,5 cm	30 x 30 x 17 cm

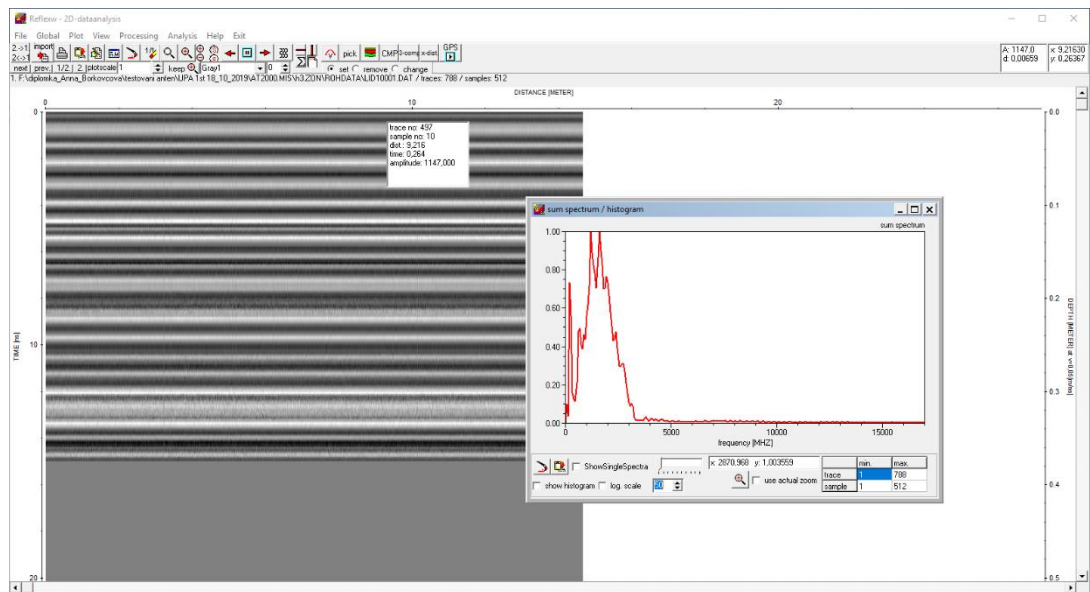
## 4.2. Software

Pro záznam naměřených dat byl použit program **K2 FAST WAVE**, který je určen speciálně pro řídicí jednotky IDS DAD FastWave, které umožňují připojení maximálně osmi antén v sériovém zapojení a zároveň podporují real-time zobrazení dvojice radargramů. Program uživateli umožňuje provést kalibraci a nastavení dílčích antén a zadání proměnných datového záznamu včetně počátečního určení rychlosti přenášení EM vlnění uvažovaným materiálem a zároveň lze k sestavě připojit další doplňková zařízení jako např. Global Navigation Satellite System (GNSS) nebo zařízení pro audiovizuální záznam. Pracovní rozhraní tohoto programu je znázorněno v obrázku 21:



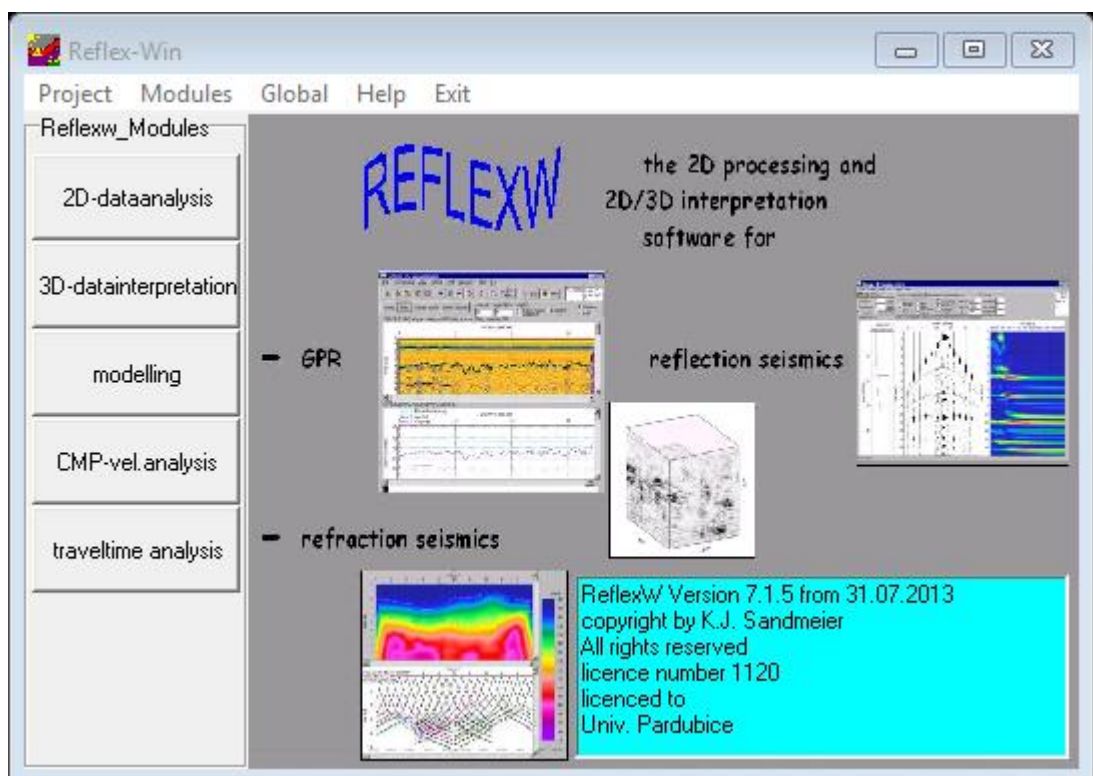
Obrázek 21 - Pracovní rozhraní K2 Fast Wave

Pro analýzu a vyhodnocení naměřených dat byl použit software **ReflexW**, jehož pracovní rozhraní je možno vidět v obrázku 22:



Obrázek 22 - Pracovní rozhraní použitého programu ReflexW

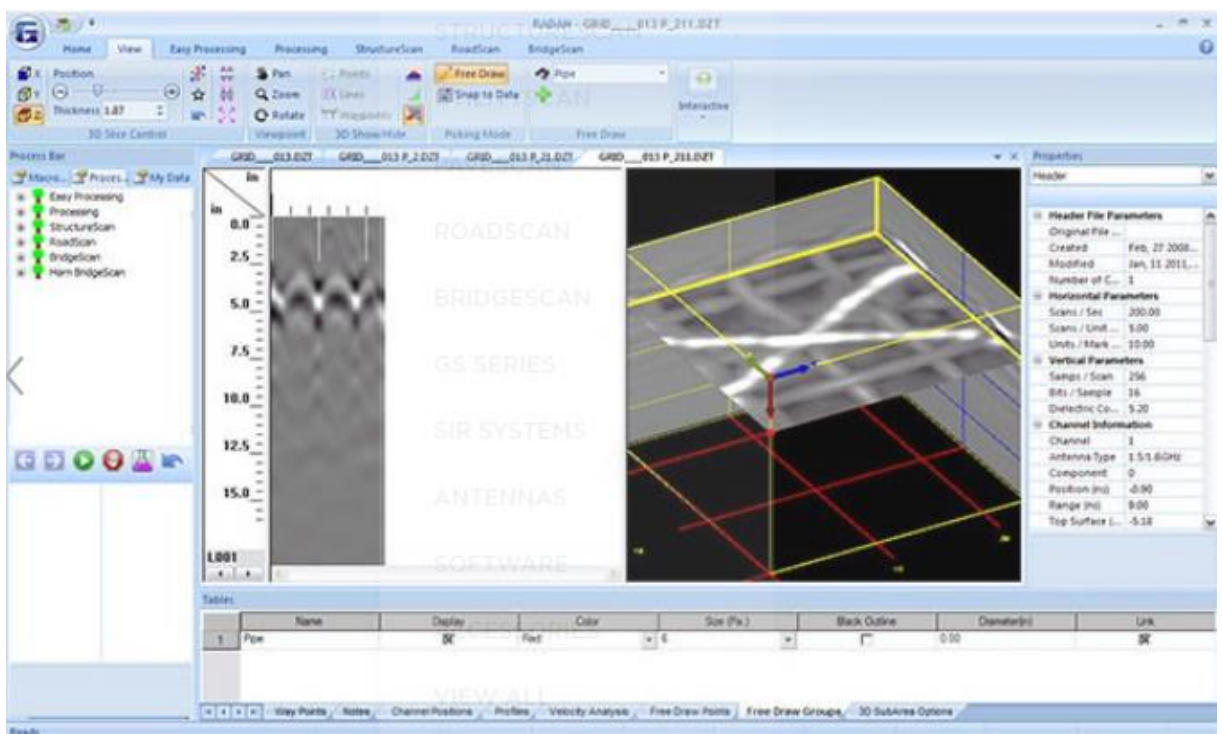
Tento program obsahuje několik základních modulů: 2 D – data analysis, 3 D – datainterpretation, modelling, CMP – velocity analysis, travelttime analysis, jak je vidět v následujícím obrázku 23.



Obrázek 23 - Zobrazení základních modulů programu ReflexW

Tento software dává možnost zpracování 2 D a 3 D dat nejen GPR technologií ale například i dalších nedestruktivních geofyzikálních metod. V rámci postprocesingu dat lze použít algoritmy pro zesilování signálu, potlačení šumu, frekvenční filtry, analýzy Common Mid-Point, Normal Move-Out a mnoho dalších. Dále nabízí pokročilé nástroje pro zpracování 3 D dat, zahrnující například spojování B-scanů, vodorovné řezy, inverzní tomografii, a simulace šíření signálu prostředím pomocí numerických metod.

Aparatura Správy železnic, s. o., pracuje se softwarem **RADAN 7**. Tento software, speciálně určený pro zařízení GSSI, nabízí možnost automatického zpracování dat, nástroje pro specifická měření, grafický 3D modul s pokročilým znázorněním, uživatelsky výhodné 3 D zobrazení dat, knihovnu pro vytváření vlastních algoritmů zpracování dat, integrace GNSS a možnost tvorby výstupu ve formátu AutoCAD. Program obsahuje 3D modul, BridgeScan modul, RoadScan modul a StructureScan modul. Rozhraní programu RADAN 7 je možno vidět v obrázku 24:



Obrázek 24 - Rozhraní programu RADAN 7 [90]

## 5. Relevantní normy používané v ČR a zahraničí

Georadar jako jeden z distribuovaných elektronických přístrojů na evropském trhu podléhá regulaci EU. Směrnice, pod níž GPR spadá, se nazývá 1999/5/EC R&TTE (*Radio and Telecommunications Terminal Equipment*) a splnění jejích ustanovení je základní podmínkou pro uvedení přístroje do prodeje. Nad rámec této směrnice je v některých zemích EU požadováno splnění národních standardů pro udělení odpovídající licence. Tyto standardy jsou v drtivé většině založeny na dokumentech Evropského institutu pro normalizaci v telekomunikacích (*European Telecommunications Standards Institute – ETSI*).

Zde je uveden seznam vybraných základních regulací týkajících se používání GPR:

1. Směrnice 73 / 23 / EEC – ochrana zdraví a bezpečnost uživatelů
2. Směrnice 89 / 336 / EHS – EM slučitelnost
3. ETSI EN 302 006-2 / EN 302 066-1 – využití frekvenčních pásem
4. ETSI EN 202 730 – regulace způsobu užívání

Podrobnější technické standardy pro aplikaci měření a následného postprocesingu GPR jsou v jednotlivých státech na světě podstatně rozdílné. V podstatě nejde ani snad o rozdíly v uvedených parametrech samotného užití přístrojů ale spíše v podrobnostech a účelu těchto regulací a norem. Zatímco v některých předpisech lze nalézt podrobné návody používání pro koncové uživatele, v dalších bývá často uveden jen popis technologie a oblasti jejího využití.

Průzkum GPR na železnicích v České republice se řídí zejména technickými předpisy, které jsou uvedeny v kapitole 3.

V rámci přípravy metodiky pro Správu železnic, s. o. jsem oslovila 52 národních správců železniční infrastruktury po celém světě, a to na základě stupně rozvoje železniční dopravní sítě v závislosti na vyspělosti hospodářství těchto států. Široká škála oslovovaných organizací zahrnovala ať už vyspělé země Evropy, jako například Švédsko, Švýcarsko, Francie, Španělsko, Itálie, Velká Británie, jednotlivé spolkové země Spolkové republiky Německo, Slovensko, Maďarsko, Polsko, Srbsko a mnoho dalších, nebo země ostatních kontinentů. Z kontinentu Amerika jsem oslovila například několik správců železnice působících napříč USA, nadále státy Blízkého a Středního východu a severní Afriky, jako například Turecko, Maroko, Izrael, dále pak další státy střední a východní Asie, jako Pákistán, Írán, Indie, Japonsko, Jižní Korea a Tchaj-wan, nebo nadále pak například Rusko, Austrálii nebo Ukrajinu.

Zpětnou vazbu jsem získala hned ze 14 států, jako například z: Itálie, Maďarska, Německa, Polska, Portugalska, Španělska, Slovenska, Velké Británie, Srbska, Švýcarska, Švédska, Tchajwanu, Turecka a Ukrajiny.

Podstatou dotazu těmto správcům bylo zjištění, zda a v jakém stavu je v jejich zemích vypracována legislativa, metodika či norma týkající se používání GPR pro diagnostiku stavu železniční infrastruktury, a jestli je těmito správci používána a vyžadována. Zároveň byl dotaz směřován i s prosbou o poskytnutí odkazů či názvů těchto norem či norem samotných. Od všech 14 správců, kteří odpověděli na mé dotazy, nikdo nemá žádnou normu pro měření georadarem na železnici jako ucelený předpis nebo metodiku. Z legislativní stránky věci všechny tyto organizace odkazovaly na výše zmíněné mezinárodní předpisy, které jsou však obecného charakteru a neobsahují podrobnější informace či návody pro měření v konkrétních aplikacích. Zároveň většina respondentů popsala způsob měření GPR na jejich státních železnicích jako zadání úkolu externí společnosti a samotné měření jako individuální zadání konkrétního měření. Proto je důležité si uvědomit fakt, že vzhledem k rozdílným požadavkům na jednotlivá měření v konkrétních situacích nemají tito správci nebo odpovídající organizace stabilní přehled postupů a parametrů při měření. A právě toto je možný důvod nízkého využití GPR při stanovování stavu železniční infrastruktury. Většina respondentů deklarovala zájem o vytvoření národní metodiky obdobného charakteru jako je v této diplomové práci a zároveň nabídli pomoc spojenou s vytvořením tohoto předpisu.

## 6. Testování GPR sestav

V této kapitole je popsán způsob, průběh a organizace testování použitých GPR antén Univerzity Pardubice a Správy železnic, s. o. Celkem bylo otestováno 7 antén, resp. frekvencí. Testování probíhalo opakovaně s cílem monitorování vývoje určovaných parametrů v čase (strojových hodin). Testy byly navrženy na základě dokumentu *GPR SYSTEM PERFORMANCE COMPLIANCE ACCORDING TO COST ACTION TU1208 GUIDELINES* (GPRSPC) [91]. Postupy a parametry testování uvedené v tomto dokumentu byly upraveny, resp. doplněny, na základě zkušeností získaných během přípravných testů. Předmětem testování byly především následující charakteristiky GPR antén:

- A. Poměr síly zaznamenaného signálu a šumu (Signal to Noise Ratio Test – SNR),
- B. Stabilita signálu (Signal Stability Test – SST)
- C. Linearita (Linearity Test – LIT)
- D. Dlouhodobá stability signálu (Long term Stability Test – LTST)

Kromě výše uvedeného byla nad rámec zmíněného dokumentu GPRSPC pozornost také zaměřena na určení tzv. *warm-up period*, tedy doby potřebné ke stabilizaci systému z důvodu zahřívání elektronických součástí během chodu a dále na frekvenční spektrum odraženého signálu.

Testování antén probíhalo v následujících cyklech:

- antény UPa: 10/2019 a 12/2020
- antény SŽ: 11/2018, a 07/2020

Doba každého testovacího cyklu se odvíjela především od požadavků na test LTST. Vzhledem k počtu testovaných antén (frekvencí) byla doba potřebná k provedení jednoho cyklu přibližně 17 hodin, celkem tedy šlo o cca 70 hodin měření. Popis použitých antén a GPR systémů celkově je uveden v kapitole 4. Testování probíhalo v laboratoři DS Výukového a výzkumného centra v dopravě (VVCD). Organizace experimentu je znázorněna v obrázcích 25 (GPR systém Správy železnic, s. o.) a 26 (GPR systém UPa). Obsluhu kontrolní jednotky Správy železnic, s. o. v průběhu testů zajišťovaly zaměstnanci Správy železnic, s. o.



Obrázek 25 - Fotografie ukázky měření GSSI systému Správy železnic, s. o.



Obrázek 26 - Fotografie ukázky měření IDS systému univerzity Pardubice

Obecné požadavky na konfiguraci jednotlivých testů a jejich opodstatnění dle GPRSPC [91] jsou uvedeny v příloze A (Testování parametrů GPR systémů) návrhu metodiky, částečně jsou uvedeny v textu níže.

### 6.1. Příprava měření.

Před vlastním testováním byly dle GPRSPC [91] vypočteny parametry pro jednotlivé použité frekvence. Jednalo se o hodnoty odsazení antén od referenční plochy (výšky  $h_1$ ,  $h_2$  a  $h_3$ ), minimální délku časového rámce (okna) záznamu dat (tzv. time window – TW), minimální rozměr referenční plochy a nastavení konstanty (auto-stacking factor – ASF) určující počet zaznamenaných stop za jednotku času (data acquisition rate). Zmíněné doporučené parametry jsou pro čtyři použité frekvence uvedeny v Tabulce 6:

Tabulka 6 - Základní testovací parametry

<b>Centrální frekvence antény f (MHz)</b>	<b>2000</b>	<b>1000</b>	<b>900</b>	<b>400</b>
vlnová délka $\lambda$ (m)	0,15	0,30	0,33	0,75
minimální délka strany referenční plochy (m)	1,17	1,84	1,99	3,85
minimální časové okno pro $12*\lambda/c$ (ns)	6,00	12,00	13,33	30,00
minimální časové okno pro $8*\lambda/c$ (ns)	4,00	8,00	8,89	20,00
$h_1: 2*\lambda$ (m)	0,300	0,600	0,667	1,500
$h_2: 3*\lambda$ (m)	0,450	0,900	1,000	2,250
$h_3: 2.5*\lambda$ (m)	0,375	0,750	0,833	1,875

Počet zaznamenaných stop za jednotku času není závislý na centrální frekvenci antény, ale je určen v závislosti na maximálním možném počtu datových bodů (vzorků) v čase. V systémech IDS se vycházelo z hodnoty maxima 42744 vzorků za jednu minutu. Hodnoty ASF byly tedy vypočítány jako podíl uvedeného maxima a nastaveného počtu vzorků na stopu (512, 1024 a 2048). Pro dvoufrekvenční anténu se poté hodnota ASF snížila dvojnásobně. Pro záznam dat systémů GSSI nebyla tato úprava možná, proto byly potřebné stopy vyfiltrovány ze zaznamenaných dat až ve fázi post-processingu.

Referenční plocha ve tvaru čtverce byla pokryta vyztuženou ALU fólií (viz. Obrázek 277), která byla položena ve třech překrývajících se pásech a poté vyrovnána (v GPRSPC [91] navržen ocelový plech). Takto upravená plocha umožňovala odraz signálu s minimálními ztrátami a bez nežádoucího rozptylu. Rozměr referenční plochy pokryté ALU fólií byl stanoven na základě požadavků pro nejnižší použitou frekvenci (největší vlnová délka) během testování. Jak u vybavení UPa, tak u použitého vybavení Správy železnic, s. o. se jednalo o frekvenci 400

MHz. Minimální délka strany čtvercové plochy dle GPRSPC [91] byl vypočtena na 3,85 m. Použitá plocha měla rozměry 4,00 x 4,00 metru.



Obrázek 27 - Fotografie referenční plochy při nastavování výšky GC antény

Pozice antén byla nastavena do požadovaných výšek dle GPRSPC [91] nad střed referenční plochy pomocí dvounosíkového mostového jeřábu instalovaného v hale sekce DS. Před měřením bylo nutné vždy ustálit pohyb antény zapříčiněný změnou její výšky pohybem jeřábu. Antény byly spojeny s kontrolními jednotkami datovými kabely tak, aby nebyla narušena trajektorie měřeného signálu daná tvarem vyzářovacího diagramu antén, rozměrem antén (vzdálenost vysílače a přijímače) a vzájemnou polohou antény a referenční plochy.

Nastavení pozice antény je znázorněno v obrázku 28:



Obrázek 28 - Nastavení pozice Air Coupled antény HN - 2000

Minimální délka časového okna datového záznamu byla nastavena vždy vyšší než hodnota nutná pro danou frekvenci dle požadavků pro jednotlivé testy, tedy na základě požadavku pro test LIT. Skutečně nastavené hodnoty pak byly podstatně zvýšeny z důvodu nutnosti identifikace tzv. direct coupling pro určení přesného umístění sledovaných vzorků v časovém okně. Reálné hodnoty délky časového okna (ns) byl nastaveny dle tabulky 7:

Tabulka 7 - Použité délky časového okna [ns]

Frekvence (MHz)	2000	1000	900	400
IDS (UPa)	15	x	40	60
GSSI (SŽ)	15	20	x	50

## 6.2. Průběh měření a jeho parametry.

Na základě praktických zkušeností z přípravných měření byly vždy provedeny všechny testy pro jednu konkrétní anténu, resp. centrální frekvenci. V případě dvoufrekvenční antény 400/900 MHz bylo nutné do harmonogramu měření započíst také časovou prodlevu mezi měřeními z důvodu možnosti opětovného měření tzv. *warm-up period* („vychladnutí systému“). Tento interval byl na základě předchozích měření stanoven s časovou rezervou na 30 resp. 40 minut.

Průběh testů jedné antény, resp. frekvence, byl rozdělen na 2 fáze na základě optimalizace doby měření, počtu změn polohy antén a počtu opakování spuštění GPR systémů. Základní parametry záznamu dat jsou uvedeny v tabulce 8:

Tabulka 8 - Základní parametry záznamu dat

TEST	odsazení antén	počet stop	frekvence stop (za 1 min)
SNR	h1, h2	min. 100	maximální
SST	h1	min. 100	maximální
LIT	h1, h2, h3	1	-
LTST	h1	min. 1600	10

V první fázi proběhl test LTST při umístění antény ve výšce h1. Délka tohoto testu, dle požadavků 120 minut (s výjimkou zkrácení testu pro antény Správy železnic, s. o. v cyklu 1 z časových důvodů), byla ještě prodloužena o tzv. *warm-up period*. Tato doba byla na základě předchozího testování antén IDS stanovena přibližně na 40 minut (déle než doporučená hodnota dle GPRSPC [91]). Pro systémy GSSI pak byla použita hodnota 30 resp. 40 minut. Záznam dat v této fázi byl zahájen vždy co nejdříve od spuštění systému. Časová prodleva pro nastavení potřebných parametrů sběru dat se pohybovala v rozmezí dvou až pěti minut. V průběhu této první fáze byly stopy zaznamenány (popř. filtrovány) v intervalu 10 stop / 1 minuta. Počet vzorků na stopu byl stanoven nejprve na 512, poté byl z důvodu zvýšení přesnosti testů zvýšen až na 2048. Pro test LTST bylo poté vybráno 1200 stop v požadovaném časovém odstupu s počáteční stopou zaznamenanou po uplynutí tzv. *warm-up period*. V druhé fázi byla zaznamenána data potřebná pro testy SNR, SST a LIT. Antény byly umístěny postupně do výšek h1, h2, h3.

Pro uvedené zbývající testy bylo nutné zaznamenat 1 (LIT), resp. 100 stop (SNR, SST) s maximálním možným počtem zaznamenaných stop za jednotku času (SST), resp. bez určení

intervalu (SNR). Proto byla měření pro každou výšku provedena vždy s maximální možnou frekvencí záznamu stop, než bylo dosaženo počtu 100 stop. Počet vzorků na stopu a délka časového okna byl shodný s měřením v první fázi.

### 6.3. Souhrn

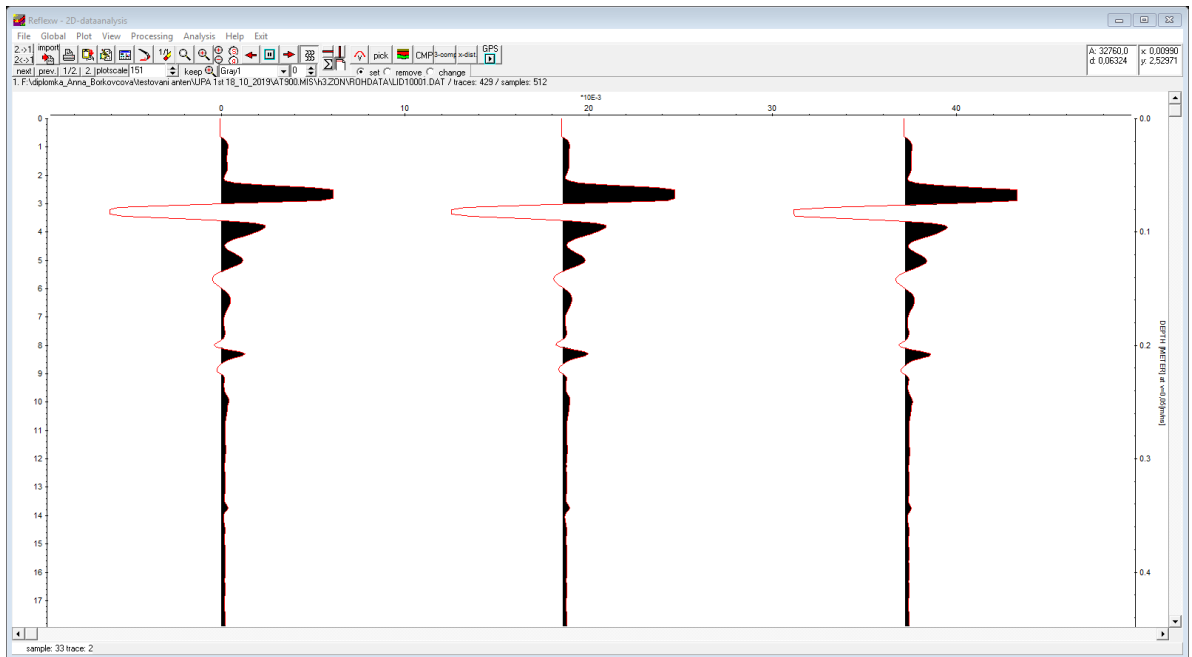
Na základě dokumentu GPRSCP bylo provedeno opakované testování dostupných GPR systémů různých výrobců (IDS a GSSI) a to ve 2 cyklech jak pro zařízení UPa, tak pro zařízení Správy železnic, s. o. Parametry testů navržené v GPRSCP byly na základě zkušeností z předchozích měření upraveny a zpřesněny. Byl také navržen optimální praktický postup pro uskutečnění těchto testů s cílem minimalizace časové náročnosti a množství potřebných dat. Testování bylo rozšířeno o další parametry (*warm-up* period, frekvenční spektrum a tvar stopy), které jsou dle názoru autorky práce důležité z hlediska sledování výkonu a stability GPR systémů. Celkem bylo otestováno 7 antén, resp. frekvencí. Celková doba testování byla cca 70 hodin. Zpracování dat z těchto testů je popsáno v následující kapitole.

## 7. Vyhodnocení určených parametrů GPR sestav

V této kapitole je popsáno vyhodnocení naměřených dat v průběhu testování použitých GPR antén Univerzity Pardubice a Správy železnic, s. o. Příprava a průběh měření je popsán v předchozí kapitole 6 této práce. Obecný postup vyhodnocení dat a vypočtené parametry odpovídají doporučením uvedených v dokumentu *GPR SYSTEM PERFORMANCE COMPLIANCE ACCORDING TO COST ACTION TU1208 GUIDELINES* (GPRSPC) [91], kde lze nalézt podrobnější popis a odůvodnění výběru testovaných parametrů. Na základě tohoto dokumentu je v českém jazyce zpracována příloha A návrhu metodiky – Testování parametrů GPR systémů (příloha I této DP). Výsledkem jsou hodnoty výše popsáných testů SNR, SST, LIT a LTST a jejich změna mezi jednotlivými cykly testování. V případě antén UPa měření probíhalo v říjnu 2019 a prosinci 2020, v případě antén Správy železnic, s. o. v listopadu 2018 a červenci 2020. Součástí vyhodnocení dat bylo také určení tzv. *warm-up* period a posouzení změn frekvenčního spektra zaznamenaného signálu pro jednotlivé antény/frekvence.

Vyhodnocení všech testů bylo provedeno pomocí programu ReflexW a vlastních výpočtových postupů v předem připravených formulářích MS Excel. Nejprve byla data importována do programu ReflexW, kde bylo pro testy SNR, SST a LIT vyfiltrováno požadovaných 100 stop měření, v případě testu LTST byly použity pouze stopy zaznamenané až po stabilizaci systému, vždy ale nejméně 1200 stop (požadavek na délku testu min. 120 minut a počet 10 stop za 1 minutu). Tyto stopy byly poté exportovány do textového souboru formátu ASCII-MATRIX (TRACE/COL), ze kterého byla data vložena do formulářů v MS Excel. Data byla ve formátu 2D matice, kdy číslo sloupce matice odpovídalo pořadí stopy v čase a číslo řádku odpovídalo pořadí vzorku na jednotlivé stopě. Matice měly tedy dle nastavení 512, resp. 1024, resp. 2048 řádků a 100, resp. 1200 sloupců dle druhu testu. Pro každou měřenou anténu/frekvenci byl vytvořen samostatný sešit se čtyřmi listy odpovídajícími čtyřem souborům dat, získaných při měřeních ve výšce h1, h2, h3 a měření pro LTST (opět ve výšce h1).

Pro každou takovou matici byla v MS Excel, pro každý vzorek, spočítána (dle velikosti TW) jeho poloha (čas) na ose twt (první vzorek s hodnotou twt = 0). Dále byla určena hodnota twt, číslo vzorku a hodnota amplitudy pro počáteční odraz – přímou vlnu a pro odraz od referenčního povrchu. Tyto hodnoty byly poté kontrolně porovnány se záznamem v programu ReflexW, kdy při zobrazení dat ve formě *Wigglemode* byla pro tyto účely využita funkce *Act sample information*, viz Obrázek 29.

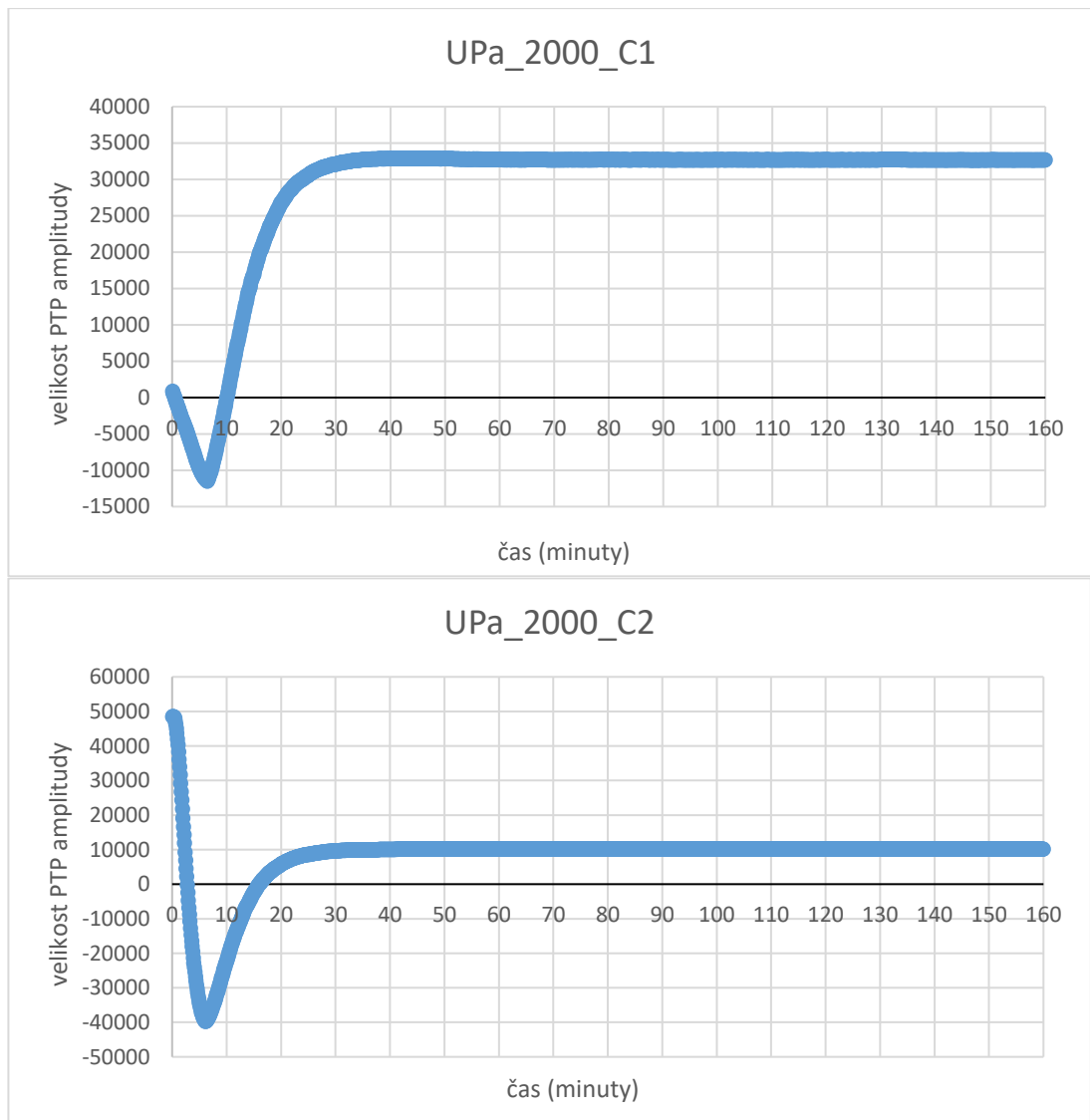


Obrázek 29 - Ukázka zobrazení dat ve formě Wigglemode programu ReflexW

Dále byla spočítána průměrná stopa měření – zprůměrované hodnoty odpovídajících si vzorků na všech zpracovaných stopách.

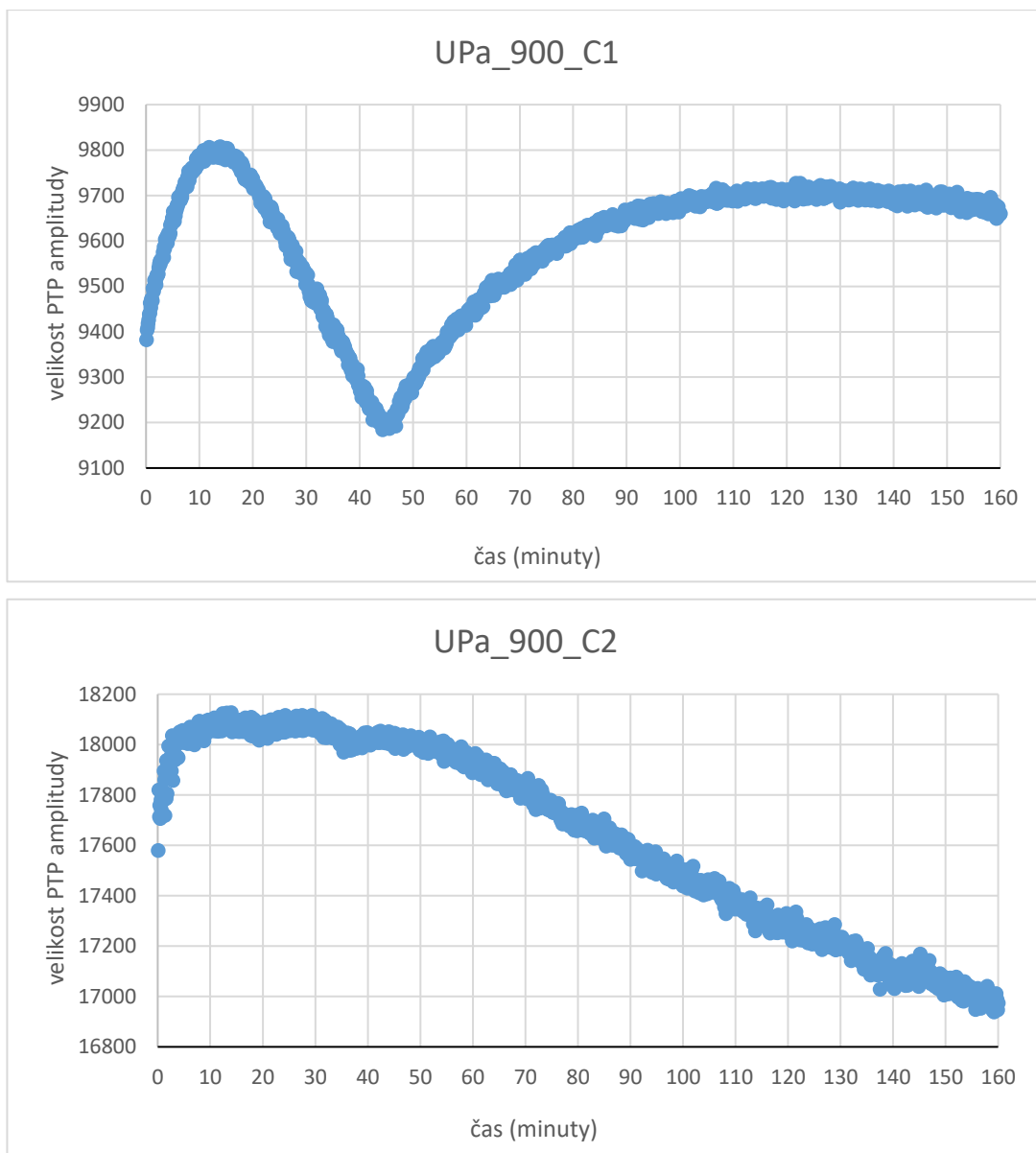
### 7.1. Warm-up period

V souvislosti s vyhodnocováním testu LTST byly také vytvořeny grafy znázorňující kolísání Peak-to-Peak (PTP) amplitudy referenčního odrazu po celou dobu testů, na jejichž základě byly stanoveny délky tzv. *warm-up* period, a tedy také určena počáteční stopa pro vyhodnocení parametru dlouhodobé stability. Grafy ukazující data zaznamenaná během testů LTST použita pro stanovení hodnot délky tzv. *warm-up* period pro každou z testovaných antén (pro oba cykly C1 a C2) jsou znázorněny v obr. 30 až obr. 36. Měřítka svislé osy (pro hodnotu amplitudy) jsou pro každý graf rozdílné z důvodu významně odlišných absolutních hodnot pro jednotlivé antény (v závislosti na průběhu kalibrace a konstrukci, resp. typu antén) a zároveň pro jednotlivá nastavení sběru dat. V případě zachování stejného rozsahu by nebylo možné zobrazit měnící se trend v čase a ilustrovat volbu tzv. *warm-up* period.



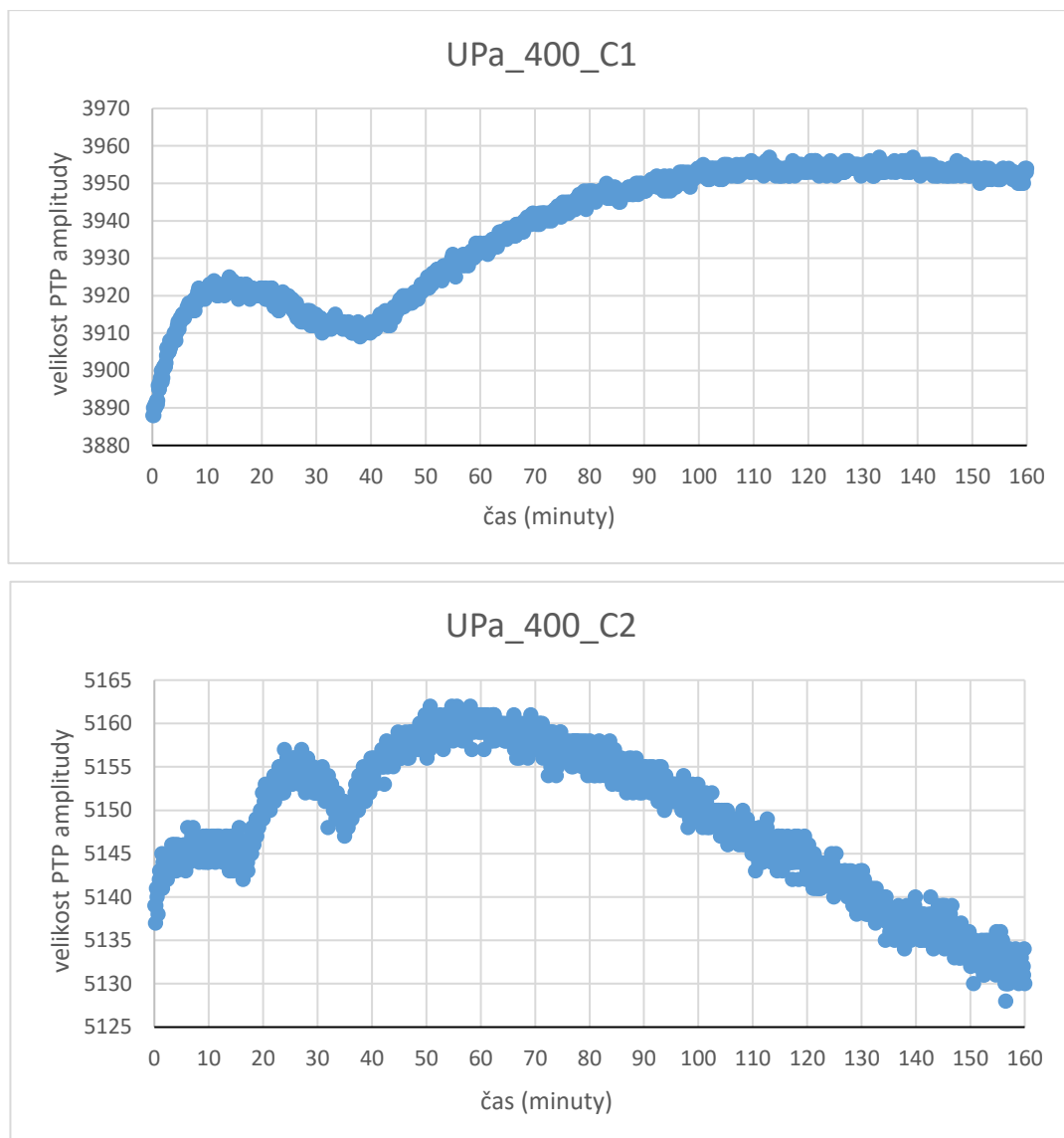
Obrázek 30 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu UPa 2000 (C1 nahoře, C2 dole)

Průběh datové řady pro anténu UPa\_2000 na obrázku 30 ukazuje téměř ideální stav. Po počátečním kolísání po spuštění systému dojde ke stabilizaci signálu (čas +30 až +40), který zůstává nadále stabilní po celou dobu testu. Ze všech dostupných antén je tato anténa z pohledu náročnosti nastavení zisku signálu nejvhodnější. Rozdíl v absolutních hodnotách je dán rozdílnou kalibrací a nejedná se o změnu parametrů antény – hodnota SNR testu se významně nemění. Hodnoty LTST splňují jak kritéria GPRSPC, tak ASTM; pro C1 je to 26 a pro C2 je hodnota 29. Rozdíl, resp. mírný časový posun křivky je dán mírně odlišným (cca 2 min) časovým odstupem mezi spuštěním systému a začátkem záznamu dat.



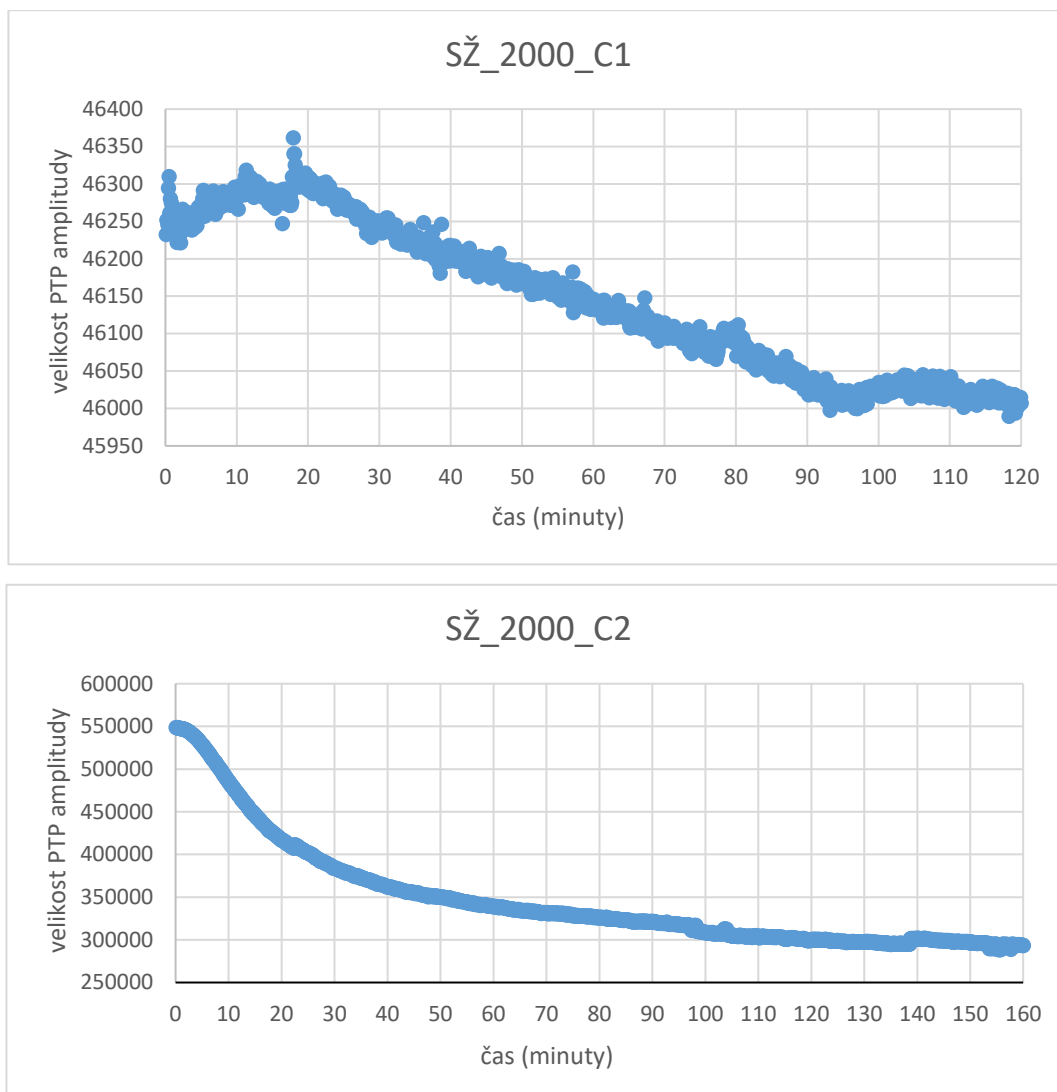
Obrázek 31 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu UPa 900 (C1 nahoře, C2 dole)

Anténa UPa\_900 (obrázek 31) vykazuje nejhorší výsledek testu LTST; pro C1 jde o hodnotu 4,70 a pro C2 je to 5,75. V cyklu C1 nedochází ke stabilizaci signálu ani po 40 minutách (výrobce doporučeno 30 minut). Lepší výsledky testu LTST by bylo možné dosáhnout až s počátkem hodnocení po cca 90. minutě. V případě cyklu C2 dochází od času +10 k neustálému, byť postupnému poklesu signálu. Tento trend by bylo možné kompenzovat (a nejedná se o vysoké absolutní rozdíly), nicméně rozdíl mezi výsledky testu LTST v C1 a C2 ukazuje spolu s výsledky SNR testů (popsáno níže) nespolehlivost dat získaných touto anténou/frekvencí.



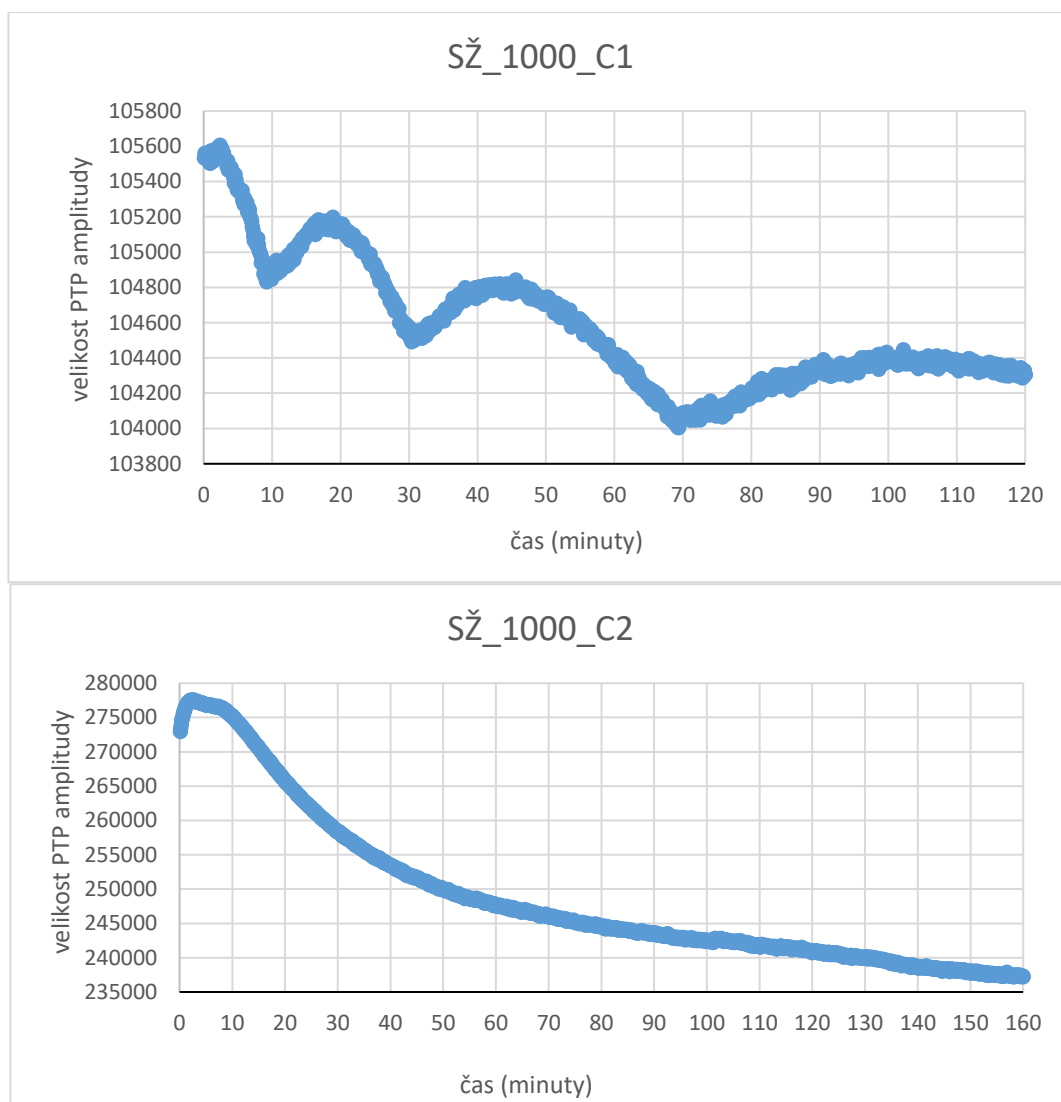
Obrázek 32 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu UPa 400 (C1 nahoře, C2 dole)

Anténa UPa\_400 (obrázek 32) vykazuje jak pro C1, tak pro C2 podobný vývoj jako v případě antény UPa\_900, avšak výsledky testu LTST pro C1 (1,08) a pro C2 (0,47) na rozdíl od UPa\_900 splňují požadavky GPRSPC. Podobný průběh grafů pro obě frekvence/antény lze zdůvodnit faktem, že obě antény jsou součástí jednoho anténního boxu. K ustálení kolísání dochází pro C1 přibližně v čase +40 a pro C2 přibližně v čase +60. Změny hodnot signálu jsou nicméně vzhledem k absolutním hodnotám velmi malé.



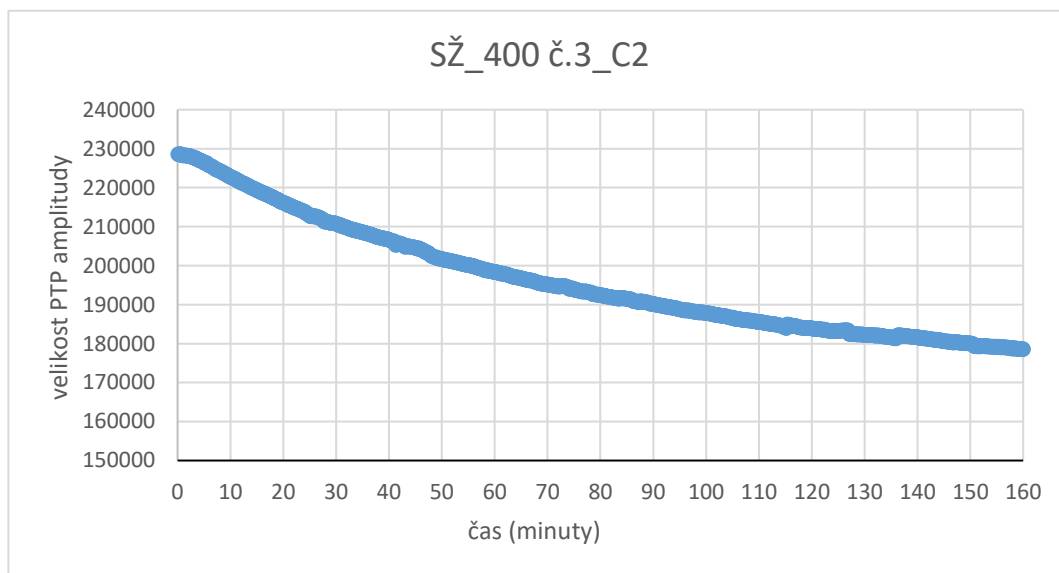
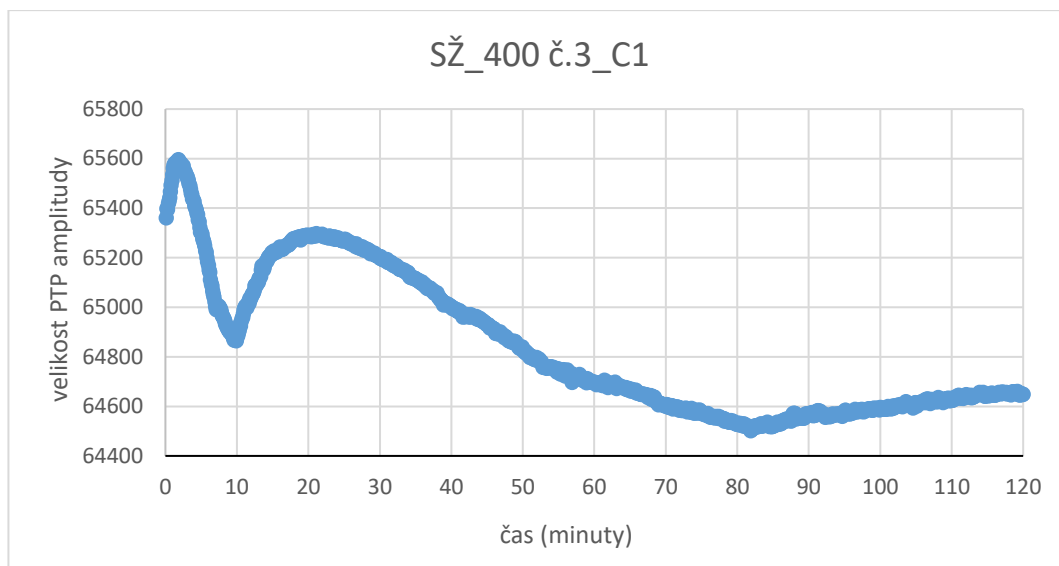
Obrázek 33 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu SŽ\_2000 (C1 nahoře, C2 dole)

V případě antény SŽ\_2000 (obrázek 33) došlo z pohledu LTST k výrazné změně mezi cykly C1 a C2. Ačkoli po počátečním kolísání v případě C1 (cca do 20. min.) je v obou cyklech patrný pokles signálu, v cyklu C2 se jedná o násobně vyšší absolutní rozdíl. Zatímco hodnota LTST pro C1 je 0,51, pro C2 je to 20,03, což je výrazně nejvyšší hodnota pro všechny testované antény (překračuje desetinásobně hodnotu doporučenou v GPRSPC). Pokles je nicméně přibližně konstantní (pro C1 od cca +20; pro C2 od cca +40) a lze jej tedy poměrně jednoduše kompenzovat jak pro nízké absolutní rozdíly v C1, tak pro vysoké absolutní rozdíly v C2. V případě C2 není mírné kolísání patrné vlivem zvoleného měřítka na svislé ose grafu. Rozdíl ve výsledcích testu LTST pro C1 a C2 lze vysvětlit pravděpodobně opotřebením/stárnutím vybavení z důvodu jeho používání (počet strojových hodin není znám).



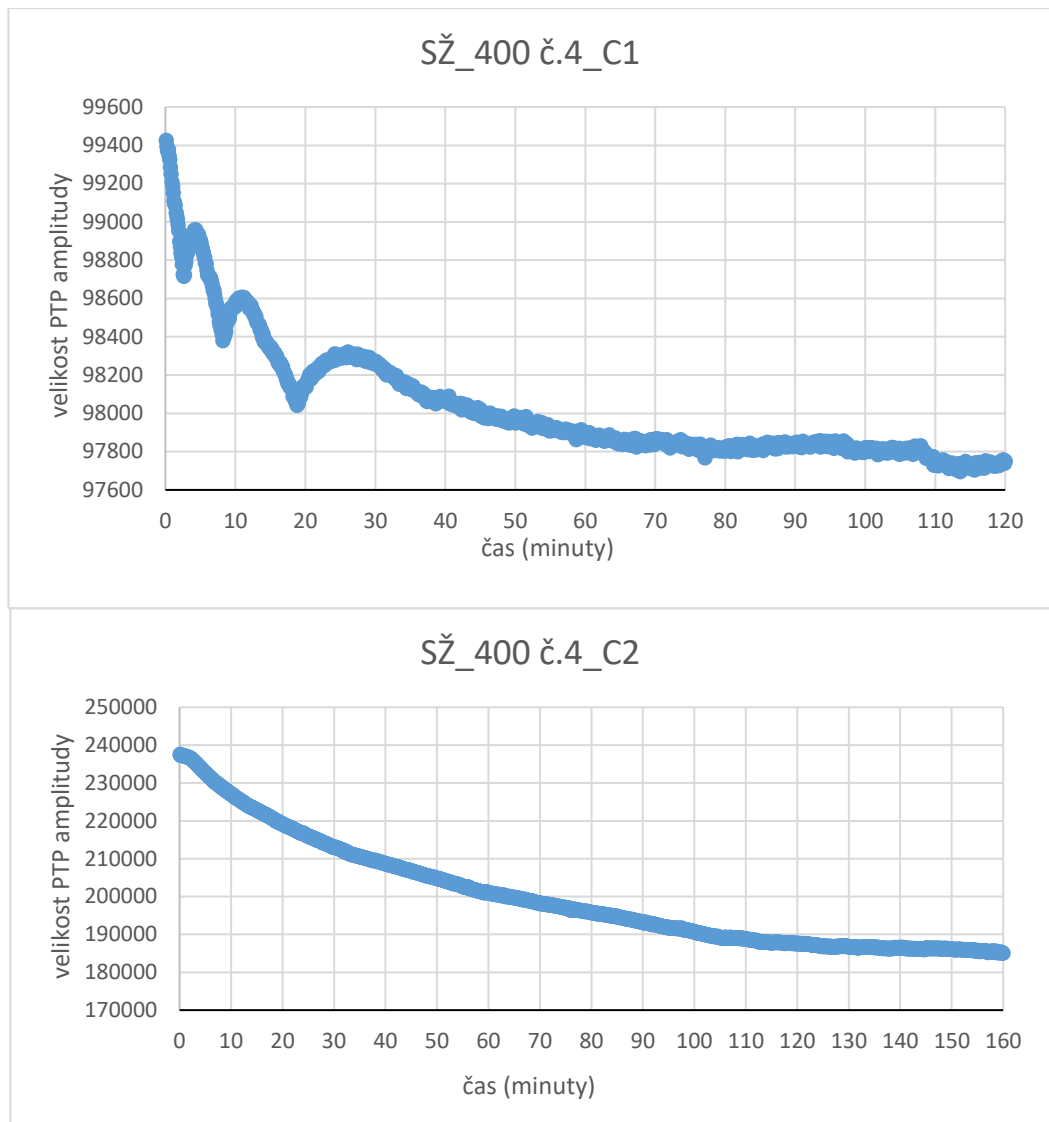
Obrázek 34 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu SŽ\_1000 (C1 nahoře, C2 dole)

V případě antény SŽ\_1000 (obrázek 34) jsou průběhy signálu v čase pro C1 a C2 odlišné. Došlo také ke zhoršení parametru LTST z 1,42 pro C1 na 6,37 pro C2 při doporučené limitní hodnotě GPRSPC rovné 2. V případě C1 by kolísání signálu bylo velmi náročné na kompenzaci (absolutní rozdíly jsou nicméně poměrně malé a neznamenal by výrazné znehodnocení dat a znesnadnění jejich interpretace); v případě C2, kdy od času cca +50 dochází přibližně ke konstantní změně v průběhu času, by byla možná poměrně snadná kompenzace změny. Rozdíl ve výsledcích testu LTST pro C1 a C2 lze vysvětlit pravděpodobně opotřebením/stárnutím vybavení z důvodu jeho používání (počet strojových hodin není znám) a také vlivem poměrně nízkých hodnot testů SNR.



Obrázek 35 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu SŽ\_400 č.3 (C1 nahoře, C2 dole)

V případě antény SŽ\_400 č. 3 (obrázek 35) dochází v C1 ke kolísání signálu cca do času +25, poté křivka klesá; od času +83 je pak patrný mírný nárůst. Kolísání nicméně není významné (malá absolutní změna) – hodnota LTST je 1,3. V cyklu C2 dochází k poklesu od počátku záznamu (+5). Pokles je poměrně stabilní (mírné kolísání na obr. 35 není patrné z důvodu velkého absolutního rozdílu, a tedy vlivem měřítka svislé osy). Hodnota LTST pro C2 je rovna 13,56. Rozdíl ve výsledcích testu LTST pro C1 a C2 lze vysvětlit pravděpodobně opotřebením/stárnutím vybavení z důvodu jeho používáním (počet strojových hodin není znám).



Obrázek 36 - Stanovení tzv. warm-up period pro anténu SŽ\_400 č.4 (C1 nahoře, C2 dole)

V případě antény SŽ\_400 č. 4 (obrázek 36) došlo mezi cykly k podobné změně jako u antény SŽ\_400 č. 3. Jedná se o stejný typ antény se stejnou centrální frekvencí. Rozdíl ve výsledcích testu LTST pro C1 a C2 lze vysvětlit opět pravděpodobně opotřebením/stárnutím vybavení z důvodu jeho používání (počet strojových hodin není znám) a je srovnatelný s anténou SŽ\_400 č. 3. pro C1 je hodnota LTST rovna 1,72 a pro C2 je to 11, 27. V případě C1 lze považovat signál vzhledem k malým absolutním rozdílům za stabilní v čase +25, v případě C2 je možno uvažovat o čase +5. Tyto hodnoty jsou tedy stejné jako pro anténu SŽ\_400 č. 3.

Délky *warm-up* period stanovených na základě výše uvedených grafů pro jednotlivé antény jsou uvedeny v tab. 9. Nutné je upozornit na fakt, že testy byly prováděny v laboratorních podmínkách. V případě vystavení GPR systému (antén) atmosférickým vlivům (změny teploty,

přímé světlo), se uvedené hodnoty mohou mírně lišit. Pro další měření by teoreticky měla být uvažována nejvyšší hodnota pro danou konkrétní anténu (nebo hodnota z posledního testování v případě výrazné změny). Toto ale z praktických důvodů není možné a výsledky tohoto testování tak lze spíše použít jako podklad pro nastavení funkce *gain*-zvyšování síly signálu při postprocesingu dat získaných dlouhodobým měřením a dále pro eliminaci největších kolísání signálu v počátečních měřeních (ať už vyloučením dat ze zvolené počáteční doby nebo nastavením funkce *gain* s vysokou proměnlivostí na ose x záznamu, tedy proměnlivosti v čase/pro jednotlivé stopy). Ukazatelem v tomto případě není pouze hodnota změny amplitudy, ale její změna v čase, resp. rychlost této změny ve zvolených časových intervalech.

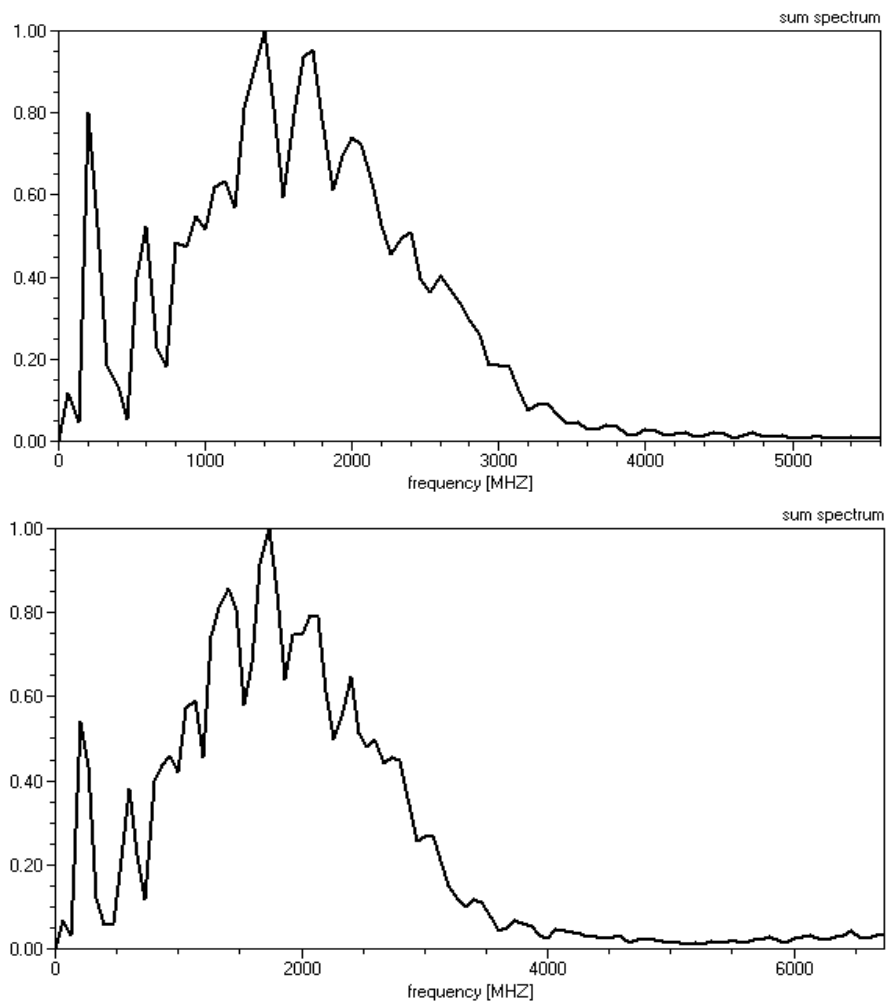
Tabulka 9 - Stanovená délka tzv. warm-up period

Označení antény	Stanovená délka (minuty)	
	C1	C2
<b>anténa UPa 2000</b>	+35	+35
<b>anténa UPa 900</b>	+90	+10
<b>anténa UPa 400</b>	+40	+60
<b>anténa SŽ 2000</b>	+20	+40
<b>anténa SŽ 1000</b>	+70	+50
<b>anténa SŽ 400 č. 3</b>	+25	+5
<b>anténa SŽ 400 č. 4</b>	+25	+5

## 7.2.Frekvenční spektra

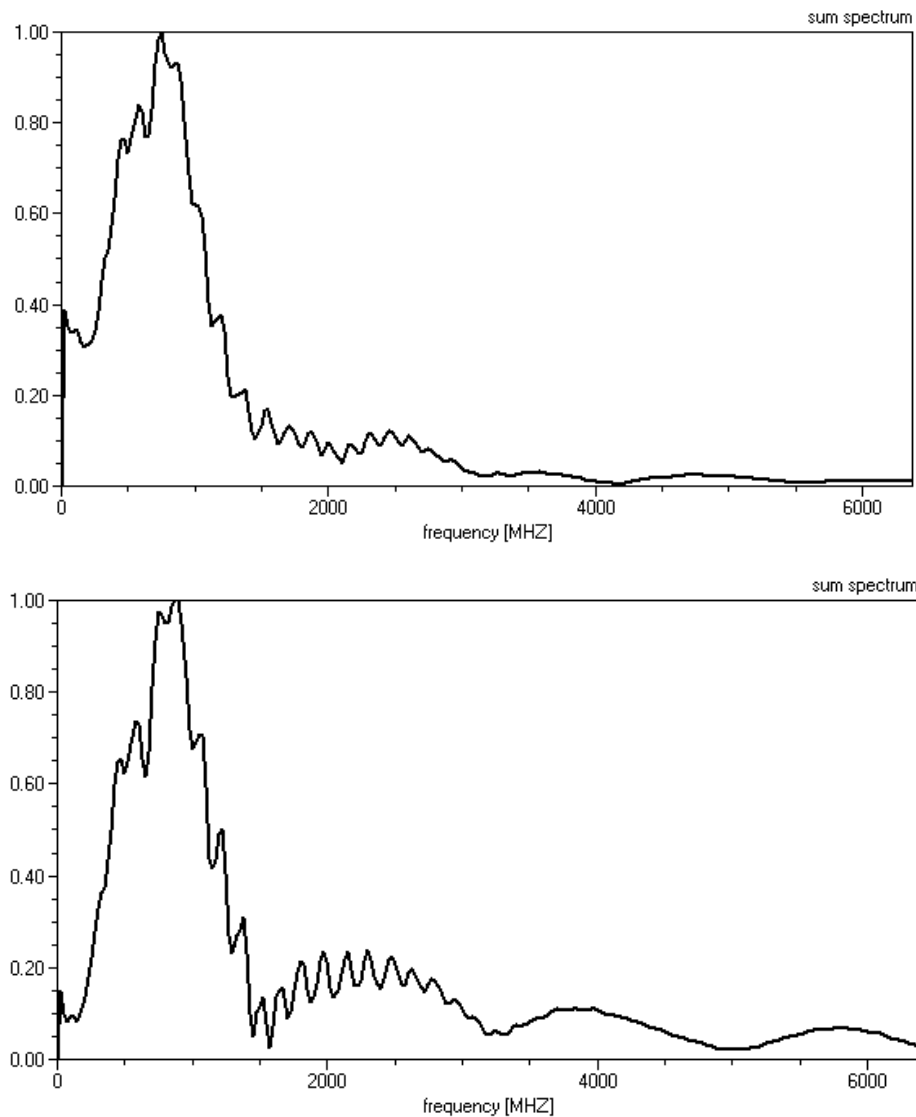
V dalším kroku bylo v programu ReflexW za použití nástroje *profile sum spectrum* získáno frekvenční spektrum zaznamenaného signálu pro jednotlivé antény/frekvence pro orientační posouzení změn antén mezi cykly měření. Porovnání frekvenčních spekter mezi oběma cykly testování pro jednotlivé antény bylo provedeno vyhodnocením histogramů s rozdělením v závislosti na frekvencích a zároveň vizuálním vyhodnocením grafů spektra. Tyto grafy jsou ve zjednodušené podobě znázorněny v obr. 37 až obr. 43. Frekvenční spektrum bylo zpracováno pro krátkodobé testy v poloze antén h1, h2, h3. Spektra z dlouhodobých testů nebyla hodnocena z důvodu možných krátkodobých externích rušení během testů (průchod osob v blízkosti antén, mobilní telefony, pohyb antény vlivem proudění vzduchu). Jelikož se spektra pro jednotlivé pozice významně neliší, jsou níže prezentovány výstupy pouze z měření v pozicích h2, tedy

pozic, kdy byly antény umístěny nejdále od referenční plochy a byla tedy nejvyšší pravděpodobnost zachycení vnějšího rušení z prostoru laboratoře DS.



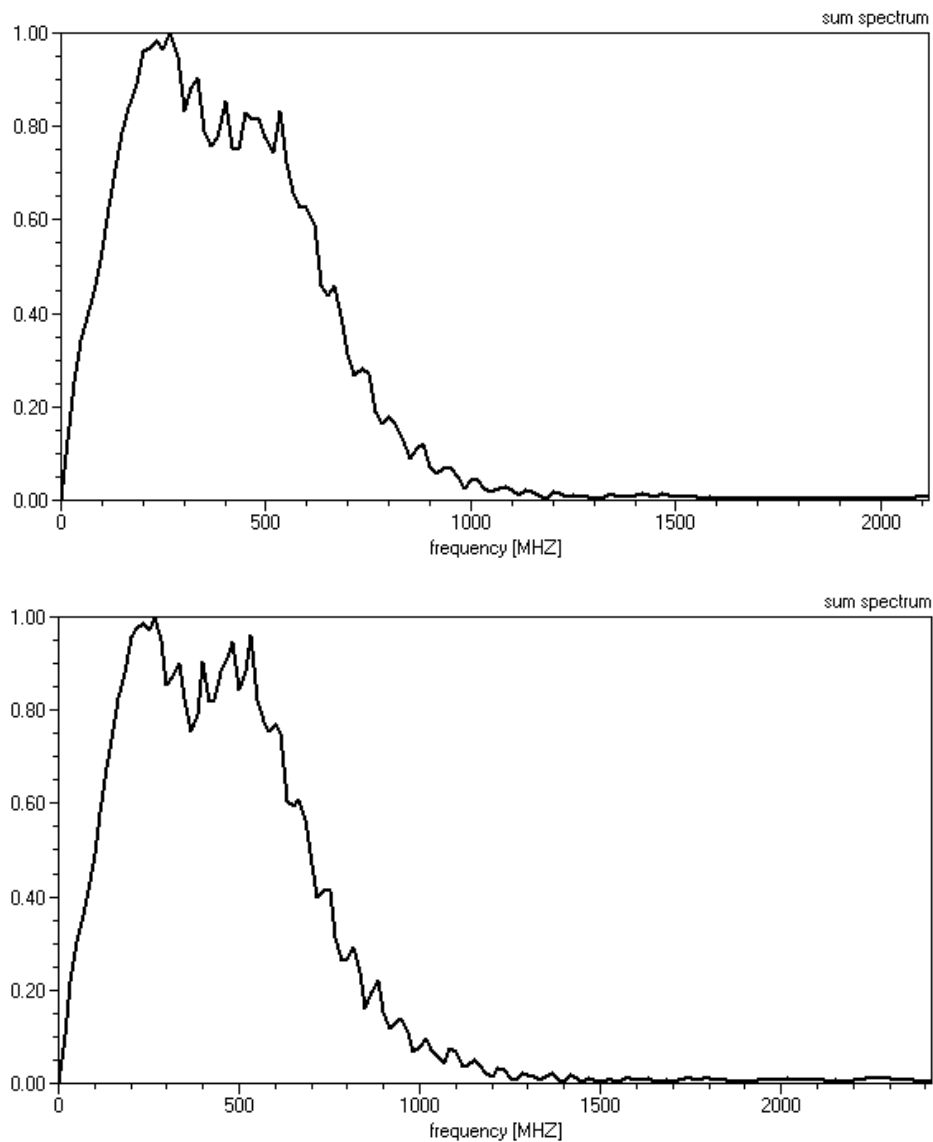
Obrázek 37 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu UPa 2000 (C1 nahoře, C2 dole)

Frekvenční spektrum pro anténu UPa\_2000 (obrázek 37) není pro cykly C1 a C2 výrazně odlišné. V obou cyklech byl zaznamenán poměrně silný signál v oblasti kolem 250 MHz. Jelikož byl tento jev pozorován i při předchozích měření mimo laboratoř, lze konstatovat, že se nejedná o signál způsobený vnějším zdrojem v prostředí laboratoře, ale o inherentní šum pro danou anténu. Jev nebyl pozorován na ostatních anténách UPa, tudíž lze vyloučit také vliv řídicí jednotky nebo datových kabelů. Na grafech není patrný tak výrazný útlum vyšších frekvencí (posun spektra směrem k nižším frekvencím) obvyklý při terénních měřeních. Toto je způsobeno konfigurací testu, kde na trajektorii signálu nedochází k útlumu materiály, resp. signál se šíří pouze vzduchem. Anténa vykazuje nejlepší výsledky testů SNR, uvedená anomálie tedy nemá významný negativní vliv na vyhodnocení naměřených dat.



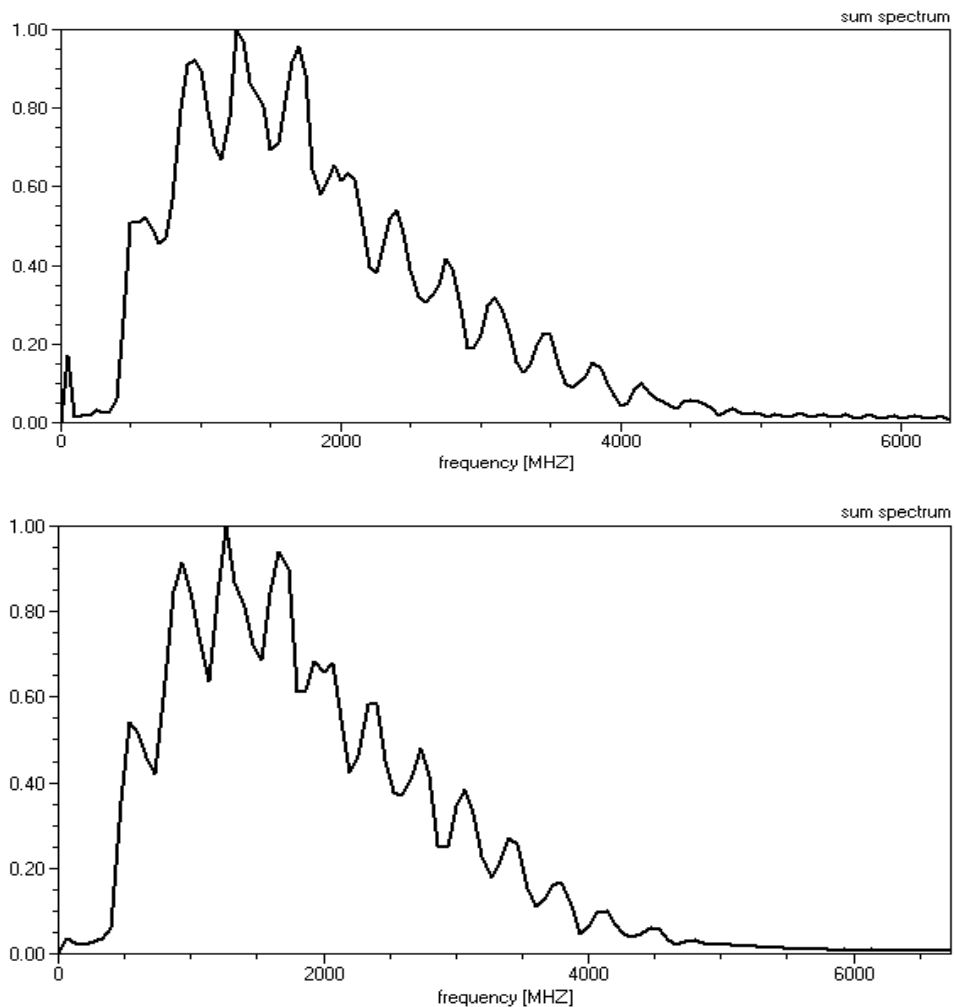
Obrázek 38 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu UPa 900 (C1 nahoře, C2 dole)

Frekvenční spektrum pro anténu UPa\_900 (obrázek 38) není pro cykly C1 a C2 v oblasti do cca 1500 MHz výrazně odlišné. Je zde ale detekován nežádoucí signál na velmi nízkých frekvencích, a především signál v oblasti od 1500 do 3000 MHz. U antény SŽ\_1000 nejsou tyto anomálie pozorovány, externí zdroj tedy může být vyloučen. Tento signál je tedy způsobený inherentním šumem dané antény a jedná se je dle mého názoru právě o jev vedoucí k nízkému poměru signálu způsobeného odrazem od referenční plochy a šumu, tedy k podlimitním hodnotám testů SNR dle doporučení GPRSPC. Jedná se tedy pravděpodobně o závadu/opotřebení komponentů testované antény.



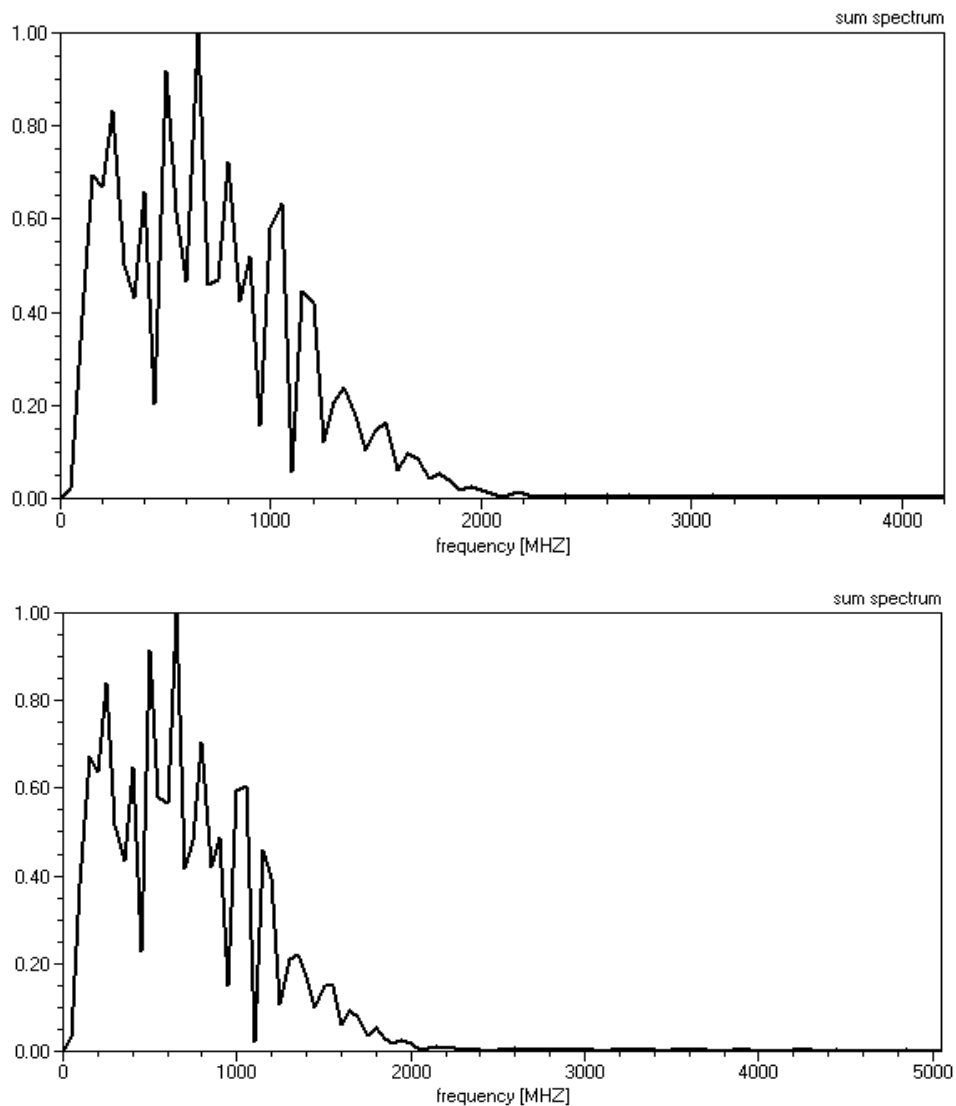
Obrázek 39 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu UPa 400 (C1 nahoře, C2 dole)

Frekvenční spektrum pro anténu UPa\_400 (obrázek 39) není pro cykly C1 a C2 významně rozdílné. Není zaznamenána žádná anomálie a anténa splňuje doporučené hodnoty pro SNR testy. Rozdělení spektra je velmi podobné systémům GSSI antény SŽ\_400 č. 3 a č. 4. Vzhledem ke konfiguraci testu není zaznamenán žádný nežádoucí odraz z okolí. Posun spektra zaznamenaného signálu směrem k nižším frekvencím je vzhledem k poměrně nízké centrální frekvenci a konfiguraci testů zanedbatelný.



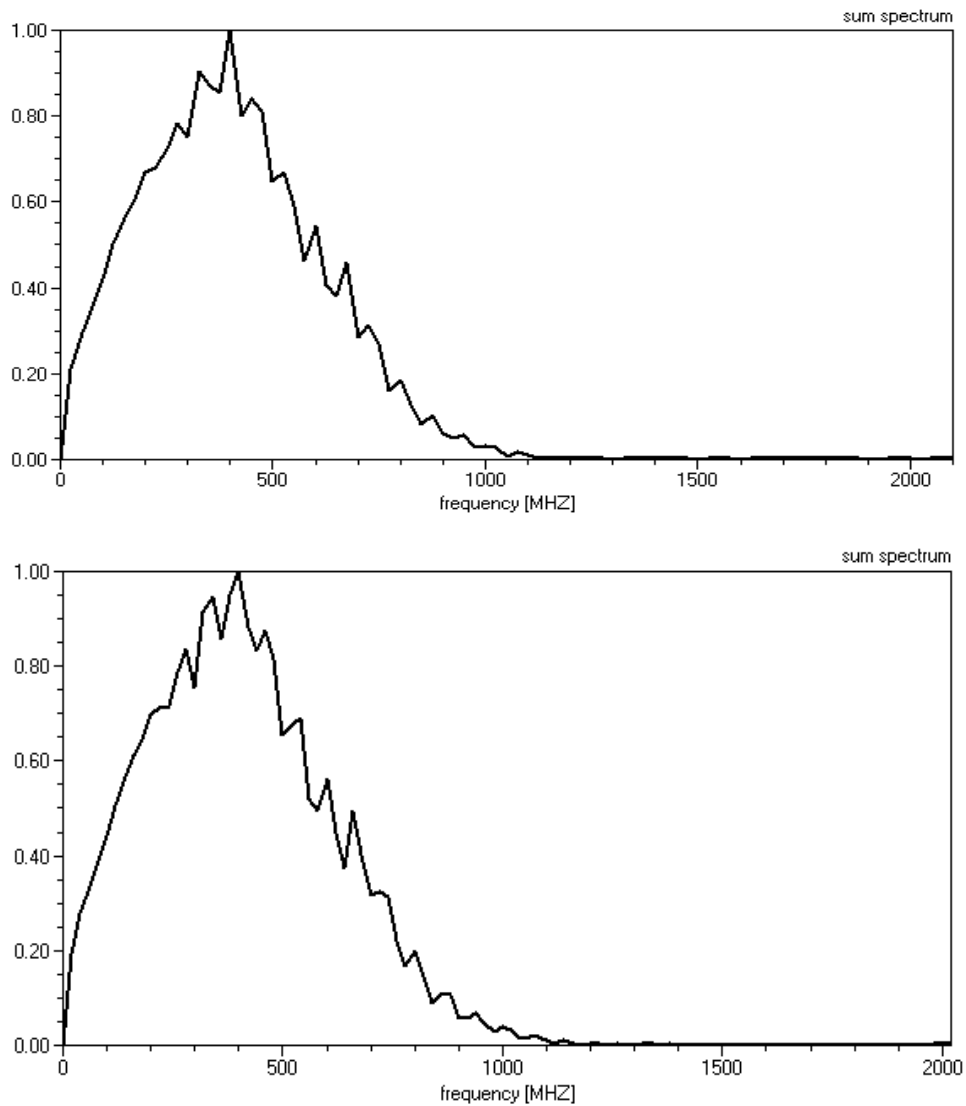
Obrázek 40 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu SŽ 2000 (C1 nahoře, C2 dole)

Frekvenční spektrum pro anténu SŽ\_2000 (obrázek 40) se pro cykly C1 a C2 výrazně neliší. Výsledky testů SNR jsou jako v případě obdobné antény IDS (UPa\_2000) velmi dobré. Malý rozdíl mezi testy C1 a C2 lze pozorovat v oblasti kolem 50 MHz. Tato anomálie je zaznamenána také v obou cyklech při testování antény UPa\_2000 a UPa\_900, ale ne v případě antény SŽ\_1000. V tomto případě lze toto pravděpodobně spojit se stochastickými signály z okolí, jimiž však nikterak nesnižují kvalitu měření a možnost vyhodnocení dat.



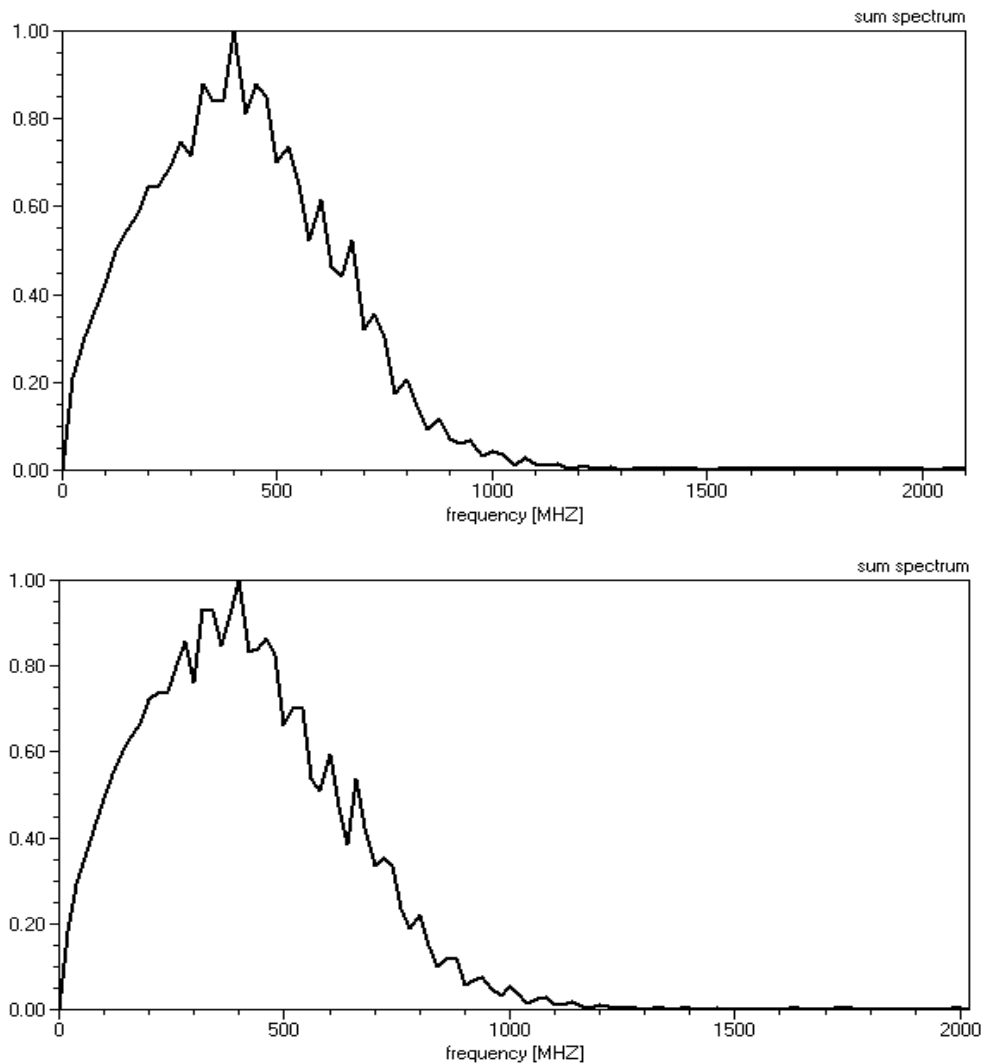
Obrázek 41 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu SŽ 1000 (C1 nahoře, C2 dole)

Frekvenční spektrum pro anténu SŽ\_1000 (obrázek 41) se pro cykly C1 a C2 výrazně neliší. Signál vykazuje významný posun k nižším frekvencím oproti deklarované centrální frekvenci 1000 MHz. Naproti tomu anténa UPa\_900 o podobné centrální frekvenci (900 MHz) tento posun nevykazuje. Tento rozdíl je dle autorky způsoben rozdílnou konstrukcí antén (Horn v případě SŽ\_1000 a bow-tie v případě UPa\_900). U zde hodnocené antény výsledky SNR testů nesplňují hodnoty doporučené dle GPRSPC, jednoznačný zdroj rušení však, na základě rozboru frekvenčního spektra a výsledků dalších testů, nebyl identifikován.



Obrázek 42 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu SŽ 400 č. 3 (C1 nahoře, C2 dole)

Frekvenční spektrum pro anténu SŽ\_400 č. 3 (obrázek 42) se pro cykly C1 a C2 nevykazuje významné změny. Nejsou zde pozorovány žádné anomálie. Výsledky testů splňují požadavky na výsledky SNR testů dle GPRSPC a jsou obdobné jako u antény SŽ\_400 č. 4. Tvary grafů se u těchto antén také shodují (stejný výrobce, konstrukce, centrální frekvence). Průběh je také podobný anténě UPa\_400.



Obrázek 43 - Frekvenční spektra obou cyklů pro anténu SŽ\_400 č. 4 (C1 nahoře, C2 dole)

Frekvenční spektrum pro anténu SŽ\_400 č. 4 (obrázek 43) se pro cykly C1 a C2 nevykazuje významné změny. Nejsou zde pozorovány žádné anomálie. Výsledky testů splňují požadavky na výsledky SNR testů dle GPRSPC a jsou obdobné jako u antény SŽ\_400 č. 3. Tvary grafů se u těchto antén také shodují (stejný výrobce, konstrukce, centrální frekvence). Průběh je také podobný anténě UPa\_400.

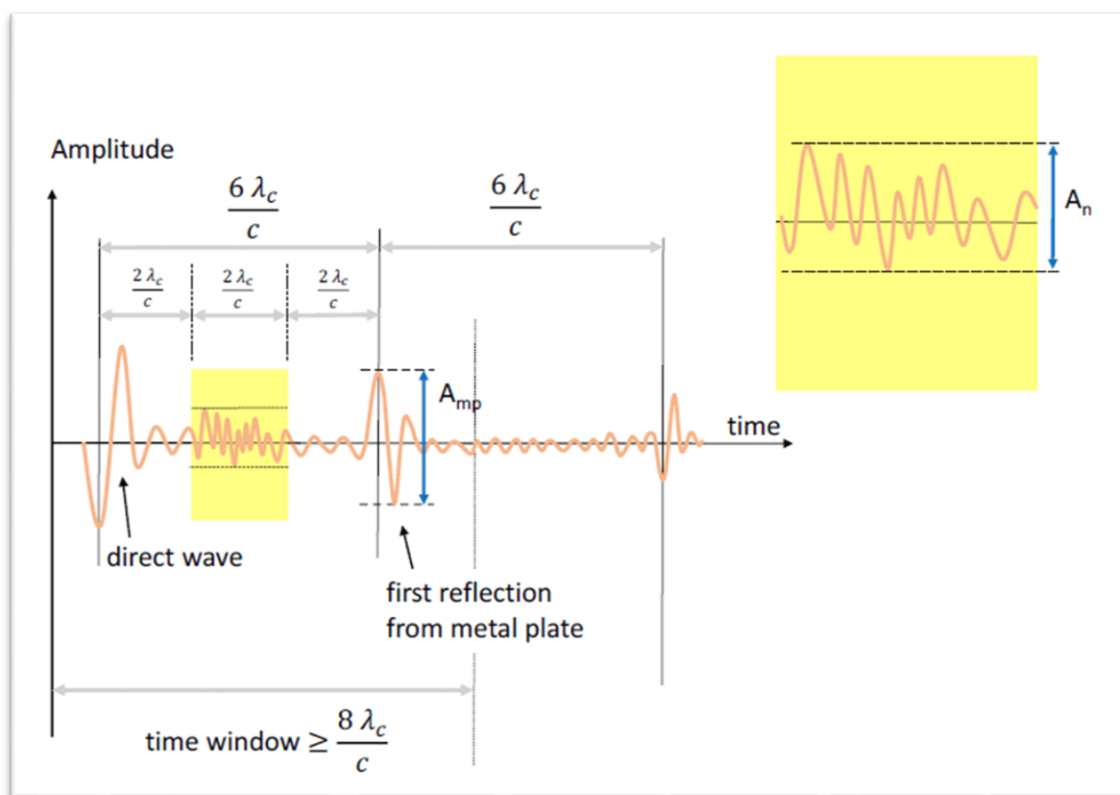
Na základě uvedeného lze konstatovat, že nedošlo k významné změně podmínek v místě testování, tzn., nebyl zaznamenán nový zdroj rušení nebo nežádoucích odrazů. Místo měření a konfigurace experimentu tedy po této stránce vyhovuje. Významnější změna ve spektru je pozorována především u antény UPa\_900, která souvisí pravděpodobně s inherentním šumem antény. Výsledky tohoto testování tak lze použít jako podklad pro nastavení frekvenčních filtrů při postprocesingu dat.

### 7.3. Doporučené testy

V této podkapitole jsou popsány kroky pro zpracování dat výpočet parametrů jednotlivých testů. Jedná se o testy SNR, SST, LIT a LTST. Všechny parametry byly vypočítány postupně vždy pro jednu určitou anténu v cyklu.

#### 1/ Signal to Noise Ratio Test – SNR

Z dat naměřených při umístění antény ve výšce  $h_1$  byla určena průměrná hodnota PTP amplitudy odrazu od referenčního povrchu  $A_{mp}$ . Z dat naměřených při umístění antény ve výšce  $h_2$  a byla určena hodnota průměrné PTP amplitudy šumu v relevantním úseku časového okna  $A_n$ , tedy rozdíl mezi maximální zápornou hodnotou a maximální kladnou hodnotou signálu v tomto časovém úseku. Relevantní časový úsek v TW má počátek v čase  $2\lambda_c/c$  po maximální absolutní amplitudě v záznamu (tedy po tzv. direct coupling) a délka tohoto úseku je opět  $2\lambda_c/c$ . Tento úsek byl stanoven pro matici dat v MS Excel na základě spočtených hodnot twt pro jednotlivé vzorky na stopách. Vyznačení hodnot  $A_{mp}$  a  $A_n$  na stopě měření s popisem je vidět v obrázku 44.



Obrázek 44 - Vyznačení hodnot  $A_{mp}$  a  $A_n$  na stopě měření s popisem – upraveno z [91]

Hodnoty Amp a An pro jednotlivé antény a cykly jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10 - Hodnoty Amp a An pro jednotlivé antény a cykly SNR

Označení antény	Amp C1	Amp C2	An C1	An C2
<b>UPa 2000</b>	32633	47146	1262	1600
<b>UPa 900</b>	9572	18190	9028	11343
<b>UPa 400</b>	3967	5159	352	406
<b>SŽ 2000</b>	30680	30603	1657	1711
<b>SŽ 1000</b>	47342	45420	7365	6706
<b>SŽ 400 č. 3</b>	17213	17257	1345	1361
<b>SŽ 400 č. 4</b>	18973	17843	1034	1355

Po výpočtu hodnot Amp a An byl výsledný parametr testu  $I_{SNR}$  určen jako podíl jejich absolutních hodnot dle následujícího vzorce:

$$I_{SNR} = \frac{\langle A_{mp} \rangle}{\langle A_n \rangle}$$

Hodnoty parametru  $I_{SNR}$  pro cykly C1 a C2 uvedeny v tabulce 11:

Tabulka 11 - Hodnoty  $I_{SNR}$  pro jednotlivé antény a cykly

Anténa	C1	C2	Anténa	C1	C2
<b>UPa 2000</b>	26	29	<b>SŽ 2000</b>	19	18
<b>UPa 900</b>	1	2	<b>SŽ 1000</b>	6	7
<b>UPa 400</b>	11	13	<b>SŽ 400 č. 3</b>	13	13
-	-	-	<b>SŽ 400 č. 4</b>	19	13

Uvedené hodnoty SNR testů ukazují poměr intenzity signálu od referenční plochy k nežádoucímu šumu (inherentní i externí). Většina testovaných antén splňuje limitní hodnoty doporučené v GPRSPC. Nejlepší výsledky vykazují antény typu horn o centrálních frekvencích 2000 MHz. Doporučených hodnot nedosahuje anténa SŽ\_1000 a to v obou cyklech testování. Anténa UPa\_900 pak vykazuje významně nedostatečné hodnoty pro SNR testy, a to v obou cyklech. U této antény lze usuzovat na pravděpodobně závadu/opotřebení komponentů testované antény. Limitní hodnota pro tento test uvedená GPRSPC je 10 a v ASTM je rovna 20. Vyšší hodnoty vypočtených parametrů ukazují na vyšší kvalitu získaných dat.

## 2/ Signal Stability Test – SST

V tomto testu byl výsledný parametr testu  $I_{Stability}$  určen dle následujícího vzorce:

$$I_{Stability} = \frac{(A_{MAX} - A_{min})}{A_{avg}}$$

kde  $A_{MAX}$  je hodnota maximální PTP amplitudy odrazu od referenčního povrchu,  $A_{min}$  její minimální hodnota, a  $A_{Avg}$  její průměrná hodnota ze souboru zaznamenaných stop. Tyto hodnoty byly určeny příslušnými vzorci v MS Excel na importovaných datech. Hodnoty  $A_{MAX}$ ,  $A_{min}$  a  $A_{avg}$  pro jednotlivé antény a cykly jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12 - Hodnoty  $A_{MAX}$ ,  $A_{min}$  a  $A_{avg}$  pro jednotlivé antény a cykly SST

Označení antény	$A_{MAX}$ C1	$A_{min}$ C1	$A_{avg}$ C1	$A_{MAX}$ C2	$A_{min}$ C2	$A_{avg}$ C2
<b>UPa 2000</b>	34271	30396	32659	48114	46441	47245
<b>UPa 900</b>	10812	8966	9911	19545	18563	19069
<b>UPa 400</b>	4095	3910	3991	5239	5146	5194
<b>SŽ 2000</b>	30745	30061	30882	30896	30465	30690
<b>SŽ 1000</b>	47212	47702	47417	45716	45331	45544
<b>SŽ 400 č. 3</b>	17287	17196	17245	17313	17196	17263
<b>SŽ 400 č. 4</b>	19051	18907	18990	17919	17791	17849

Hodnoty parametru  $I_{Stability}$  jsou pro cykly C1 a C2 uvedeny v tabulce 13:

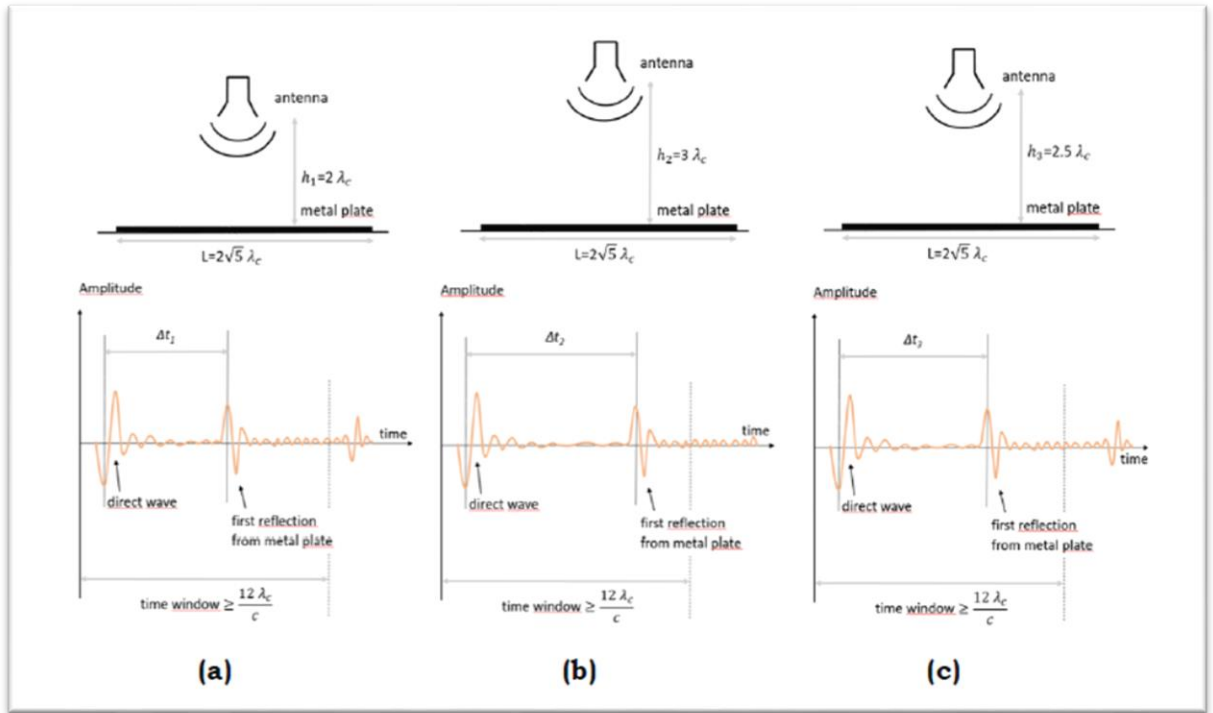
Tabulka 13 - Hodnoty  $I_{Stability}$  pro jednotlivé antény a cykly

Anténa	C1	C2	Anténa	C1	C2
<b>UPa 2000</b>	0,11	0,04	<b>SŽ 2000</b>	0,03	0,01
<b>UPa 900</b>	0,19	0,05	<b>SŽ 1000</b>	0,01	0,01
<b>UPa 400</b>	0,05	0,02	<b>SŽ 400 č. 3</b>	0,01	0,01
-	-	-	<b>SŽ 400 č. 4</b>	0,01	0,01

Limitní hodnoty dle GPRSPC testu SST splňují všechny antény v cyklu měření C2. V cyklu C1 je zaznamenaný signál krátkodobě mírně nestabilní pro anténu UPa\_2000 (0,11) a výrazně nestabilní pro anténu UPa\_900 (0,19). Limitní hodnota pro tento test uvedená GPRSPC je 0,08 a v ASTM je rovna 0,01. Vyšší hodnoty vypočtených parametrů v tomto testu ukazují na vyšší krátkodobou nestabilitu zaznamenaného signálu.

### 3/ Linearity Test – LIT

Pro každý soubor dat odpovídající výšce odsazení antény  $h_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) byl určen časový rozdíl  $\Delta t_i$  jako rozdíl twt hodnot záznamu maximální absolutní hodnoty amplitudy přímé vlny a maximální absolutní hodnoty amplitudy odrazu od referenčního povrchu. Nákres stop získaných během třech kroků měření s popisem je v obrázku 45.



Obrázek 45 - Nákres stop získaných během kroků měření 1(a), 2(b), 3(c) s popisem [91]

Poté byly spočítány absolutní rozdíly  $T_{21}$  a  $T_{31}$  dle následujícího vzorce:

$$T_{21} = |\Delta t_2 - \Delta t_1|; T_{31} = |\Delta t_3 - \Delta t_1|$$

Faktory rychlosti  $C_{21}$  a  $C_{31}$  byly spočteny v následujícím kroku jako:

$$C_{21} = \frac{(h_2 - h_1)}{T_{21}}$$

$$C_{31} = \frac{(h_3 - h_1)}{T_{31}}$$

Relativní variace měřené rychlosti byla nakonec určena následovně:

$$S_{V_{rel}} = \frac{2|C_{21} - C_{31}|}{C_{21} + C_{31}}$$

Uvedené výpočtové koeficienty LIT pro jednotlivé antény a cykly jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14 - Výpočtové koeficienty LIT pro jednotlivé antény a cykly

Označení antény	T <sub>21</sub>	T <sub>31</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>21</sub>	T <sub>21</sub>	T <sub>31</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>21</sub>
	C1	C1	C1	C1	C2	C2	C2	C2
<b>UPa 2000</b>	0,92	0,42	0,16	0,18	0,94	0,47	0,16	0,16
<b>UPa 900</b>	2,18	1,17	0,15	0,14	2,21	1,09	0,15	0,15
<b>UPa 400</b>	5,04	2,58	0,15	0,15	4,95	2,43	0,15	0,15
<b>SŽ 2000</b>	1,02	0,55	0,15	0,14	0,99	0,50	0,15	0,15
<b>SŽ 1000</b>	1,95	0,98	0,15	0,15	1,92	0,96	0,16	0,16
<b>SŽ 400 č. 3</b>	5,00	2,50	0,15	0,15	4,98	2,52	0,15	0,15
<b>SŽ 400 č. 4</b>	5,00	2,50	0,15	0,15	5,03	2,54	0,15	0,15

Hodnoty parametru  $S_{vrel}$  pro cykly C1 a C2 uvedeny v tabulce 15:

Tabulka 15 - Hodnoty  $S_{vrel}$  pro jednotlivé antény a cykly

Anténa	C1	C2	Anténa	C1	C2
<b>UPa 2000</b>	0,09	0,00	<b>SŽ 2000</b>	0,07	0,07
<b>UPa 900</b>	0,07	0,01	<b>SŽ 1000</b>	0,00	0,01
<b>UPa 400</b>	0,02	0,02	<b>SŽ 400 č. 3</b>	0,00	0,01
-	-	-	<b>SŽ 400 č. 4</b>	0,00	0,01

Limitní hodnota dle GPRSPC je pro tento test rovna 0,065 a pro ASTM rovna 0,02. Vyšší hodnota parametru tohoto testu znamená vyšší odchylku od lineárního nárůstu hodnoty twt k lineárnímu nárůstu hodnoty odsazení antény od referenční plochy, tedy ve výsledku nepřesné určení hloubky detekovaných anomálií. Doporučení GPRSPC tedy splňují všechny antény pro cyklus C2 s malou odchylkou antény SŽ\_2000. V případě C1 pak kromě totožné hodnoty antény SŽ\_2000 jsou hodnoty překročeny také u antén UPa\_2000 a UPa\_900. V tomto testu se nejvíce projeví nepřesné nastavení výšek antén h1, h2 a h3 během testování. Pro testování v této práci byly antény nastaveny ručním měřením s přesností do 2 mm. Antény byly vizuálně urovňány do vodorovné polohy.

#### 4/ Long term Stability Test – LTST

V tomto testu byl vypočten klouzavý průměr  $M_q$  podle následujícího vzorce (hodnota  $N$  je stanovena jako 10):

$$M_q = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} A_{q+j}$$

Výsledný ukazatel dlouhodobé stability byl pak určen jako maximum z hodnot  $Q_1$  a  $Q_2$  vypočtených následovně:

$$Q_1 = \frac{M_{MAX} - A_{1w}}{A_{1w}}$$

$$Q_2 = \frac{|M_{min} - A_{1w}|}{A_{1w}}$$

Kde  $M_{MAX}$  a  $M_{min}$  jsou maximální, resp. minimální hodnoty PTP amplitud klouzavého průměru a hodnota  $A_{1w}$  je hodnota PTP amplitudy první zaznamenané stopy.

Hodnoty  $Q_1$  a  $Q_2$  pro jednotlivé antény a cykly jsou uvedeny v tabulce 16. Finální výstupem tohoto testu je pak vyšší z těchto dvou hodnot. Tyto výstupní hodnoty testu jsou uvedeny jak v textu, který popisuje stanovení tzv. *warm-up period*, se kterou úzce souvisí, tak v závěrečné shrnující tabulce 18 této kapitoly uvádějící výsledné parametry všech testů pro všechny antény/frekvence v obou cyklech testování.

Tabulka 16 - Hodnoty  $Q_1$  a  $Q_2$  pro jednotlivé antény a cykly LTST

Označení antény	$Q_1$ C1	$Q_2$ C1	$Q_1$ C2	$Q_2$ C2
<b>UPa 2000</b>	0,04	0,66	1,31	0,04
<b>UPa 900</b>	4,70	0,95	0,14	5,75
<b>UPa 400</b>	1,08	0,04	0,10	0,47
<b>SŽ 2000</b>	0,19	0,51	0,01	20,03
<b>SŽ 1000</b>	0,04	1,42	0,08	6,37
<b>SŽ 400 č. 3</b>	0,34	1,30	0,11	13,56
<b>SŽ 400 č. 4</b>	0,11	1,72	0,09	11,27

Hodnoty parametru Qmax pro cykly C1 a C2 uvedeny v tabulce 17:

Tabulka 17 - Hodnoty Qmax pro jednotlivé antény a cykly

Anténa	C1	C2	Anténa	C1	C2
<b>UPa 2000</b>	0,66	1,31	<b>SŽ 2000</b>	0,51	20,03
<b>UPa 900</b>	4,70	5,75	<b>SŽ 1000</b>	1,42	6,37
<b>UPa 400</b>	1,08	0,47	<b>SŽ 400 č. 3</b>	1,30	13,56
-	-	-	<b>SŽ 400 č. 4</b>	1,72	11,27

Hodnoty testů LTST pro C1 a C2 byly částečně zhodnoceny v kapitole týkající se stanovení tzv. *warm-up period*, se kterou úzce souvisí. Z tabulky 17 je patrné, že anténa UPa\_900 dlouhodobě nesplňuje tento parametr a vzhledem k výsledkům testu dalších antén UPa se nejedná o vliv např. datových kabelů nebo napájecí jednotky použitých při testování – ostatní antény UPa splňují limity doporučené v GPRSPC v obou cyklech. Mezi testy v cyklu C1 a C2 však došlo k výraznému zhoršení parametru LTST u všech antén Správy železnic, s. o. Jedním z vysvětlení může být opotřebení/stárnutí antén v důsledku používání (počet strojových hodin není znám). Jelikož však došlo k významnému/násobnému nárůstu u všech antén GSSI, je zde také možnost opotřebení/poškození datového kabelu GSSI použitého při testování v cyklu měření C2 nebo ke změně v kontrolní jednotce SIR-30 samotné. Limitní hodnota pro tento test uvedená GPRSPC je 2 a v ASTM je rovna 3. Vyšší hodnoty vypočtených parametrů v tomto testu ukazují na vyšší dlouhodobou nestabilitu zaznamenaného signálu.

#### 7.4. Souhrn a doporučení

Výstupem testování každé antény/frekvence jsou číselné hodnoty reprezentující výsledky výše popsaných testů SNR, SST, LIT a LTST v každém z cyklů (C1, C2). Hodnoty jednotlivých ukazatelů pro dané testy jsou analyzovány výše v této kapitole (podkapitola 7.3), a jsou také spolu s maximálními/minimálními hodnotami doporučenými v GPRSPC uvedeny v následující tabulce 18. Pro ilustraci jsou zde uvedeny i prahové hodnoty ASTM, ze kterých GPRSPC vychází, ty však nelze pro posouzení výsledků použít přímo, neboť postupy a parametry testů dle ASTM se od těch uvedených v GPRSPC liší. Výsledky testů splňujících limity parametrů GPRSPC jsou v tabulce 18 označeny zeleně, výsledky mírně mimo limity jsou vyznačeny žlutě a výsledky významně nesplňující limity jsou označeny červeně. Zde je nutné znovu upozornit na fakt, že pro test SNR znamená vyšší hodnota lepší výsledek, u ostatních testů SST, LIT a LTST jsou naopak žádoucí nižší hodnoty ukazatelů.

Tabulka 18 - Hodnoty výsledných ukazatelů testů SNR, SST, LIT a LTST v obou cyklech

Označení antény	SNR C1	SST C1	LIT C1	LTST C1	SNR C2	SST C2	LIT C2	LTST C2
anténa UPa 2000	26	0,11	0,09	0,66	29	0,04	0,00	1,31
anténa UPa 900	1	0,19	0,07	4,70	2	0,05	0,01	5,75
anténa UPa 400	11	0,05	0,02	1,08	13	0,02	0,02	0,47
anténa SŽ 2000	19	0,03	0,07	0,51	18	0,01	0,07	20,03
anténa SŽ 1000	6	0,01	0,00	1,42	7	0,01	0,01	6,37
anténa SŽ 400 č. 3	13	0,01	0,00	1,3	13	0,01	0,00	13,56
anténa SŽ 400 č. 4	19	0,01	0,01	1,72	13	0,01	0,01	11,27
<b>GPRSPC threshold</b>	<b>10</b>	<b>0,08</b>	<b>0,065</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>0,08</b>	<b>0,065</b>	<b>2</b>
<b>ASTM threshold</b>	<b>20</b>	<b>0,01</b>	<b>0,020</b>	<b>3</b>	<b>20</b>	<b>0,01</b>	<b>0,020</b>	<b>3</b>

V souvislosti s vyhodnocováním testu LTST byly také vytvořeny grafy znázorňující kolísání Peak-to-Peak (PTP) amplitudy referenčního odrazu po celou dobu testů, na jejichž základě byly stanoveny délky tzv. *warm-up* period, a tedy také určena počáteční stopa pro vyhodnocení parametru dlouhodobé stability. Grafy ukazující data zaznamenaná během testů LTST, tabulka doporučených *warm-up* hodnot spolu s analýzou těchto hodnot je uvedena v podkapitole 7.1. Výsledky z této části testování lze použít jako podklad pro nastavení funkce *gain*-zvyšování síly signálu při postprocesingu dat získaných dlouhodobým měřením a dále pro eliminaci největších kolísání signálu v počátcích měření. V této části je také nutné blíže prozkoumat příčinu výrazné změny mezi cykly C1 a C2 u antén GSSI.

Dále byla vyhodnocena frekvenční spektra zaznamenaného signálu při krátkodobém měření v pozici antén h2. Tato spektra jsou znázorněna grafy a následně analyzována v podkapitole 7.2. Významnější změna ve spektru je pozorována především u antény UPa\_900, která souvisí pravděpodobně s inherentním šumem antény. Výsledky z této části testování lze použít jako podklad pro nastavení frekvenčních filtrů signálu při postprocesingu dat ke zvýšení parametrů SNR a zvýšení kontrastu zobrazení radargramů.

Časový interval mezi cykly testů C1 a C2 vybavení UPa je 14 měsíců a mezi testy C1 a C2 vybavení Správy železnic, s. o. je 20 měsíců. Délka těchto intervalů a míra využití (počet

strojových hodin a četnost používání) musí být při formování závěrů na základě vypočtených parametrů brány také v úvahu). V případě antén UPa se jedná o rovnoměrné využití všech antén, kdy počet hodin mezi C1 a C2 lze stanovit přibližně na 50. V případě antén Správy železnic, s. o. je předpoklad násobně vyššího využití, přesný počet hodin (nárůst v intervalu mezi C1 a C2 pro jednotlivé antény) není autorce znám.

Autorka si je vědoma faktu, že z hlediska statistického vyhodnocení nebo stanovení předpokládané budoucí změny testovaných parametrů a ukazatelů by bylo nutné provést minimálně jedno další testování se znalostí četnosti a doby použití jednotlivých antén a s kombinací více kontrolních jednotek a datových kabelů. I přesto lze z uvedených hodnot dvou cyklů získat relevantní a užitečné informace využitelné jak při nastavení parametrů sběru dat při měření v terénu, tak při post-processingu a vyhodnocování naměřených dat. Dále je v tomto konkrétním případě možné prohlásit, že na základě opakovaných testů antény UPa\_900 se tato anténa/frekvence jeví jako nadále nevhodná a nespolehlivá pro používání při diagnostice dopravních staveb.

Závěrem lze konstatovat, že anténa UPa/IDS HN-2000 je vhodná pro další použití i přes nesplnění doporučených hodnot v pro testy SST a LTST v cyklu C1. V případě antény/anténního boxu UPa/IDS TR DUAL-F 400/900 je vhodné její částečné použití s centrální frekvencí 400 MHz, V případě frekvence 900 MHz toto nepovažuji za vhodné vzhledem k možné následné chybné interpretaci naměřených dat. V případě antén Správy železnic, s. o. výrobce GSSI je další použití antén možné s přihlédnutím k vyšší míře šumu v případě antény označené v této práci jako SŽ\_1000 a především s ohledem na nevyhovující výsledky LTST testů u všech GSSI antén, které je nutné do budoucna v tomto ohledu podrobit detailnějšímu testování spolu s dalším použitým vybavením.

S ohledem na předchozí odstavec lze říci, že kromě významného zhoršení parametru LTST u antén GSSI nedošlo během doby mezi cykly testování k významnému zhoršení testovaných parametrů z pohledu koncového uživatele GPR.

Jak antény typu AC (konstrukce horn), tak antény GC (konstrukce bow – tie) mají srovnatelné parametry, ať už se jedná o antény IDS nebo GSSI.

## 8. Závěr

V této diplomové práci jsem navázala na problematiku, kterou jsem se zabývala v rámci své bakalářské práce, ve které jsem prováděla diagnostiku železničního svršku pomocí technologie GPR. Na základě získaných poznatků a zkušeností jsem si jako hlavní cíl své práce stanovila přípravu dokumentu, jenž by tvořil vhodný podklad pro oficiální závaznou metodiku používanou Správou železnic, s. o. v oblasti diagnostiky železničního tělesa pomocí georadaru, tedy návrhu metodického pokynu pro použití georadaru v diagnostice a průzkumu drážního tělesa.

Při tvorbě diplomové práce jsem využila znalosti a dovednosti získané právě při tvorbě mé bakalářské práce, a ještě více je prohloubila. Navázala jsem na předchozí spolupráci s organizací Správa železnic, s. o., ve které jsem mimo jiné provedla opakované testování a vyhodnocení parametrů GPR antén této organizace.

Vlastní text diplomové práce (který se skládá z teoretické i praktické části), informace a poznatky získané během tvorby tohoto díla, mi sloužili jako podklad pro vypracování uvedeného návrhu metodiky, který jsem vyhotovila jako přílohu I této práce.

V teoretické části práce jsem popsala princip fungování technologie GPR, související EM vlastnosti materiálů, sestavu GPR zařízení a metody sběru dat (kapitola 2). Dále jsme analyzovala možnosti použití GPR pro diagnostiku železniční infrastruktury (kapitola 3), popsala použité vybavení (kapitola 4) a provedla rešerši relevantních tuzemských i zahraničních předpisů a norem (kapitola 5). Zde musím konstatovat, že i přes oslovení mnoha zahraničních správců železnic, se mi nepodařilo dohledat žádné zahraniční normy nebo předpisy, které by byly obdobného charakteru a rozsahu jako navrhovaná metodika. V mnoha případech jsem se však u oslovených správců železniční infrastruktury v zahraničí a u zahraničních výzkumných institucí setkala se zájmem o moji činnost a s nabídkami pomoci při mé snaze vytvořit kvalitní podklad a metodiku pro měření GPR na železnici.

Vlastní návrh metodiky (příloha I této diplomové práce) jsem zpracovala především na základě předchozích obdobných dokumentů bývalé Správy železniční dopravní cesty a konzultací se zaměstnanci Centra telematiky a diagnostiky Správy železnic, s. o., pro kterou je tento dokument určen. Do návrhu metodiky jsem však také zahrнула část týkající se právě testování GPR systémů (příloha A návrhu metodiky) a dále část týkající se srovnávacího měření GPR

sestav (příloha B návrhu metodiky), pro kterou jsem se inspirovala v oblasti GPR diagnostiky pozemních komunikací.

Ačkoli návrh metodiky není kompletním finálním dokumentem připraveným pro vydání a praktické použití při diagnostice drážního tělesa pomocí GPR, stanovený cíl mé diplomové práce byl dle mého názoru naplněn.

## Literatura:

- [1] ANNAN, A. P. a J. L. DAVIS. Ground penetrating radar-coming of age at last. In: proceedings of Exploration [online]. 1997, s. 515–522 [vid. 2015-08-11]. Dostupné z: [http://dmec.ca/ex07dvd/Decennial%20Proceedings/Expl97/06\\_05\\_\\_\\_\\_.pdf](http://dmec.ca/ex07dvd/Decennial%20Proceedings/Expl97/06_05____.pdf)
- [2] <http://strabag-rail.com>. *Strabag-rail* [online]. 2019 [vid. 2019-03-24]. Dostupné z: [http://strabag-rail.com/databases/internet/\\_public/files.nsf/](http://strabag-rail.com/databases/internet/_public/files.nsf/)
- [3] LAHOUAR, Samer. *Development of data analysis algorithms for interpretation of ground penetrating radar data* [online]. B. m., 2003 [vid. 2014-04-05]. Virginia Polytechnic Institute and State University. Dostupné z: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-10242003-162114/>
- [4] LOULIZI, Amara. *Development of ground penetrating radar signal modeling and implementation for transportation infrastructure assessment* [online]. B. m., 2001 [vid. 2014-04-04]. Virginia Polytechnic Institute and State University. Dostupné z: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-02062001-220414/>
- [5] MATULA, RADEK. *Nedestruktivní diagnostika konstrukcí vozovek pozemních komunikací georadarem* [online]. Brno, 2013. Doctoral Thesis. University of Pardubice. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/54072>
- [6] WANG, Zhe Wendy. *Automatic Detection of Bridge Deck Condition from Ground Penetrating Radar Images*. IEEE transactions on automation science and engineering [online]. 2011, 8(3), 633–640. ISSN 1545-5955. Dostupné z: [doi:10.1109/TASE.2010.2092428](https://doi.org/10.1109/TASE.2010.2092428)
- [7] JOL, Harry M., *Ground penetrating radar: theory and applications*. 1. ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2009. ISBN 978-0-444-53348-7.
- [8] CASSIDY, Nigel J., *Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids*. In: Ground Penetrating Radar Theory and Applications [online]. B. m.: Elsevier, 2009 [vid. 2018-12-05], s. 41–72. ISBN 978-0-444-53348-7. Dostupné z: [doi:10.1016/B978-0-444-53348-7.00002-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00002-8)
- [9] BENEDETTO, Andrea and Lara PAJEWSKI, ed. *Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2015 [vid. 2018-12-11]. Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering. ISBN 978-3-319-04812-3. Dostupné z: [doi: 10.1007/978-3-319-04813-0](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0)
- [10] TAREFDER, Rafiqul A. a Mesbah U. AHMED. Ground Penetrating Radar for Measuring Thickness of an Unbound Layer of a Pavement. In: Tareq AHRAM a Waldemar KARWOWSKI, ed. *Advances in Human Factors, Software, and Systems Engineering* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2018 [vid. 2020-12-30], Advances in Intelligent Systems and Computing, s. 160–167. ISBN 978-3-319-60010-9. Dostupné z: [doi:10.1007/978-3-319-60011-6\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-60011-6_16)
- [11] NURUL Jihan Farhah Bostanudin. *Computational Methods for Processing Ground Penetrating Radar Data*. Portsmouth, 2013. University of Portsmouth.

- [12] ANNAN, A.P. *Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar*. In: *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* [online]. B.m.: Elsevier, 2009 [vid. 2018-12-05], s. 1–40. ISBN 978-0-444-53348-7. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-53348-7.00001-6
- [13] *UAV for Landmine Detection Using SDR-Based GPR Technology | IntechOpen* [online]. [vid. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/robots-operating-in-hazardous-environments/uav-for-landmine-detection-using-sdr-based-gpr-technology>
- [14] KIMBERLY, MARIE BELLI. *Ground penetrating radar bridge deck investigations using computational modeling*. Boston, Massachusetts, 2008. Northeastern University.
- [15] BAKER, Gregory S., Thomas E. JORDAN a Jennifer PARDY. An introduction to ground penetrating radar (GPR). In: *Special Paper 432: Stratigraphic Analyses Using GPR* [online]. B.m.: Geological Society of America, 2007 [vid. 2020-12-21], s. 1–18. ISBN 978-0-8137-2432-4. Dostupné z: doi:10.1130/2007.2432(01)
- [16] GROTE, K. *Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques*. *Journal of applied geophysics* [online]. 2003, 57(2). ISSN 0926-9851. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09269851/57/2>
- [17] NI, Sheng-Huoo. *Buried pipe detection by ground penetrating radar using the discrete wavelet transform*. *Computers and Geotechnics* [online]. 2010, 37(4), 440–448. ISSN 0266-352X. Dostupné z: doi:10.1016/j.compgeo.2010.01.003
- [18] DI PRINZIO, Monica. *Application of GPR to the monitoring of river embankments*. *Journal of applied geophysics* [online]. 2010, 71(2–3), 53–61. ISSN 0926-9851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2010.04.002
- [19] PLATI, Christina and Andreas LOIZOS. *Estimation of in-situ density and moisture content in HMA pavements based on GPR trace reflection amplitude using different frequencies*. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2013, 97, 3–10. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2013.04.007
- [20] GEHRIG, Michael D., Derek V. MORRIS a John T. BRYANT. *Ground Penetrating Radar for Concrete Evaluation Studies*. Technical Presentation Paper for Performance Foundation Association. 2004, 197–200.
- [21] DE BOLD, Robert Paul. *Non-destructive evaluation of railway tracked ballast* [online]. Edinburgh, 2011 [vid. 2014-04-05]. School of Engineering University of Edinburgh. Dostupné z: <http://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/5027>
- [22] DANIELS, David J. *Ground penetrating radar* [online]. B.m.: Iet, 2004 [vid. 2015-08-11]. Dostupné z: <http://books.google.com/books>
- [23] ANNAN, A P. *Ground Penetrating Radar Workshop Notes*. 2013, 197. Sensors & Software Inc.

- [24] KOPPENJAN, Steven K., Curt M. ALLEN, Duane GARDNER, Howard R. WONG, Hua LEE a Stephanie J. LOCKWOOD. Multi-frequency synthetic-aperture imaging with a lightweight ground penetrating radar system. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2000, **43**(2–4), 251–258. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/S0926-9851(99)00066-X
- [25] CONYERS, Lawrence B. *Ground-penetrating radar for archaeology*. Walnut Creek, CA: AltaMira Press, 2004. ISBN 0-7591-0772-6.
- [26] RIAL, Fernando, Henrique LORENZO, Manuel PEREIRA a Julia ARMESTO. Analysis of the Emitted Wavelet of High-Resolution Bowtie GPR Antennas. *Sensors* [online]. 2009, **9**(6), 4230–4246. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s90604230
- [27] UDUWAWALA, Disala. *A comprehensive study of resistor-loaded planar dipole antennas for ground penetrating radar applications*. Stockholm, 2006. Division of Electromagnetic Engineering, School of Electric Engineering, Royal Institute of Technology.
- [28] ARTAGAN, SALIH SERKAN a BORECKÝ, VLADISLAV. *Estimation Methods for Obtaining GPR Signal Velocity*. International Journal of Civil and Structural Engineering. 2016, 3(1), 59–63. ISSN 2372-3971.
- [29] SHEERS, Bart. *Ultra-Wideband Ground Penetrating Radar, with Application to the Detection of Anti-Personnel Landmines*, Doctoral Thesis, Université Catholique De Louvain, March 2001
- [30] ALTIN, Gozde a Arif DOLMA. Buried Objects Segmentation and Detection in GPR B Scan Images. 2019, 7.
- [31] Artagan, S. S., Bianchini Ciampoli, L., D’Amico, F. et al. Non-destructive Assessment and Health Monitoring of Railway Infrastructures. *Surv Geophys* 41, 447–483 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09544-w>
- [32] ARTAGAN, S. S., *Use of Ground Penetrating Radar in Condition Assessment of Railway Ballast*, Doctoral Thesis, University of Pardubice, 2018
- [33] Ernest T. Selig and John M. Waters. (1994). *Track Geotechnology and Substructure Management*. London: Thomas Telford Publications
- [34] KUMARA, Janaka J. a Kimitoshi HAYANO. Deformation characteristics of fresh and fouled ballasts subjected to tamping maintenance. *Soils and Foundations* [online]. 2016, **56**(4), 652–663. ISSN 00380806. Dostupné z: doi:10.1016/j.sandf.2016.07.006
- [35] ALEMU, Abateneh Yitayew. *Survey of Railway Ballast Selection and Aspects of Modelling Techniques*. nedatováno, 61.
- [36] SAARENKETO, Timo. *Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys*. Doctoral Thesis, Oulu, 2006. University of Oulu.

- [37] ROBERTS, Roger, Imad AL-QADI, Erol TUTUMLUER a Andreas KATHAGE. BALLAST FOULING ASSESSMENT USING 2 GHZ HORN ANTENNAS – GPR AND GROUND TRUTH COMPARISON FROM 245 KM OF TRACK. nedatováno, 17.
- [38] *Illuminating Above and Below: LiDAR and GPR Form a Dynamic Data-Collection Duo Informed Infrastructure* [online]. [vid. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://informedinfrastructure.com/17508/illuminating-above-and-below-lidar-and-gpr-form-a-dynamic-data-collection-duo/>
- [39] POKYNY PRO POUŽITÍ NEDESTRUKTIVNÍCH GEOFYZIKÁLNÍCH METOD V DIAGNOSTICE A PRŮZKUMU TĚLESA ŽELEZNIČNÍHO SPODKU. B. m.: Správa železniční dopravní cesty s. o., České dráhy a. s., 2006
- [40] *Diagnostické prostředky provozované CTD – CTD* [online]. [vid. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.tudc.cz/index.php/diagnosticke-prostredky/>
- [41] HUGENSCHMIDT, J. *Non-destructive-testing of traffic-infrastructure using GPR*, 2003. EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research
- [42] AL-QADI, Imad L., Wei XIE, Roger ROBERTS a Zhen LENG. *Data analysis techniques for GPR used for assessing railroad ballast in high radio-frequency environment*. Journal of Transportation Engineering. 2010, 136(4), 392–399.
- [43] OLHOEFT, Gary R., Samuel SMITH, J. P. HYSLIP a E. T. SELIG. *GPR in railroad investigations*. In: Ground Penetrating Radar, 2004. GPR 2004. Proceedings of the Tenth International Conference on [online]. B. m.: IEEE, 2004, s. 635–638 [vid. 2015-08-04]. Dostupné z: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1343547](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1343547)
- [44] HYSLIP, James P., Stanley S. SMITH, Gary R. OLHOEFT and Ernest T. SELIG. *Assessment of railway track substructure condition using ground penetrating radar*. In: 2003 Annual Conference of AREMA [online]. 2003 [vid. 2015-08-04]. Dostupné z: [https://www.arema.org/files/library/2003\\_Conference\\_Proceedings/0010.pdf](https://www.arema.org/files/library/2003_Conference_Proceedings/0010.pdf)
- [45] AL-QADI, Imad, Wei XIE a Roger ROBERTS. *Optimization of antenna configuration in multiple-frequency ground penetrating radar system for railroad substructure assessment*. NDT & E International [online]. 2010, 43(1), 20–28. ISSN 09638695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2009.08.006
- [46] GARY R. OLHOEFT and ERNEST T. SELIG. *Ground-penetrating radar evaluation of railway track substructure conditions*. In: [online]. 2002, s. 4758–6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.462264>
- [47] MANACORDA, Guido, Davide MORANDI, Antonio SARRI a Giuseppe STACCONI. *Customized GPR system for railroad track verification*. In: Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR2002) [online]. B. m.: International Society for Optics and Photonics, 2002, s. 719–723 [vid. 2016-04-19]. Dostupné: [http://proceedings.spiedigitallibrary.org/data/Conferences/SPIEP/32070/719\\_1.pdf](http://proceedings.spiedigitallibrary.org/data/Conferences/SPIEP/32070/719_1.pdf)

- [48] DONOHUE, S., K. GAVIN and A. TOLOOIYAN. *Geophysical and geotechnical assessment of a railway embankment failure*. Near Surface Geophysics [online]. 2011, 9(1767) [vid. 2015-10-20]. ISSN 18730604. Dostupné z: doi:10.3997/1873-0604.2010040
- [49] D.-B. ZHU, J.-N. GENG a M. HUANG. *Algorithm for suppressing sleeper interferences in railway subgrade GPR signals*. Journal of the China Railway Society [online]. 2013, 5(35), 75–79. Dostupné z: doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2013.05.012
- [50] LIAO LIJIAN, YANG XINAN a DU PANFENG. *Processing GPR Detection Data of Railway Subgrade*. China Railway Science. 2008, 03. ISSN 1001-4632.
- [51] CALDEIRA, L, A GOMES CORREIA, M PEREIRA, F FERNANDES a P LOURENÇO. *Assessment of layer thickness and uniformity in railway embankments with ground penetrating radar*. Advances in Transportation Geotechnics [online]. B. m.: CRC Press, 2008 [vid. 2015-10-20], s. 571–575. ISBN 978-0-415-47590-7. Dostupné z: <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9780203885949.pt8>
- [52] SUSSMANN, Theodore R., Ernest T. SELIG a James P. HYSLIP. *Railway track condition indicators from ground penetrating radar*. NDT & E International. 2003, 36(3), 157–167.
- [53] SAARENKETO, T., M. SILVAST a J. NOUKKA. *Using GPR on Railways to Identify Frost Susceptible Areas*. Proceedings of the international conference and exhibition railway engineering 2003, held london, uk, 30 april - 1 may 2003 - cdrom [online]. 2003 [vid. 2015-09-20]. Dostupné z: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=749415>
- [54] GUO, Zhenwei, Hefeng DONG a Jianping XIAO. *Detection of Permafrost Subgrade Using GPR: A Case Examination on Qinghai-Tibet Plateau*. Journal of Geoscience and Environment Protection [online]. 2015, 03(05), 35–47. ISSN 2327-4336, 2327-4344. Dostupné z: doi:10.4236/gep.2015.35005
- [55] NURMIKOLU, Antti. *Key aspects on the behaviour of the ballast and substructure of a modern railway track: research-based practical observations in Finland*. Journal of Zhejiang University SCIENCE A [online]. 2012, 13(11), 825–835. ISSN 1673-565X, 1862-1775. Dostupné z: doi:10.1631/jzus.A12ISGT1
- [56] DU, Li Zhi, Xiao Pei ZHANG, Jian Hui QIU a Wen Bo LIU. *Study on Ground Penetrating Radar in Detecting of Zero-Temperature Boundary under the Railway Bed*. Advanced Materials Research [online]. 2011, 255–260, 3975–3978. ISSN 1662-8985. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.3975
- [57] CHIARA, De. *Non-destructive tests for railway infrastructure stiffness evaluation (2011)* Proceedings of the 13th International Conference on Civil, Structural and Environmental. nedatováno, 1.
- [58] CLARK, M.R., R. GILLESPIE, T. KEMP, D. M. MCCANN a M.C. FORDE. *Electromagnetic properties of railway ballast*. NDT & E International [online]. 2001, 34(5), 305–311. ISSN 09638695. Dostupné z: doi:10.1016/S0963-8695(00)00006-2

- [59] HUGENSCHMIDT, J. *Railway track inspection using GPR*. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2000, 43(2–4), 147–155. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/S0926-9851(99)00054-3
- [60] JACK, R. a P. JACKSON. *Imaging attributes of railway track formation and ballast using ground probing radar*. *NDT & E International*. 1999, 32(8), 457–462.
- [61] FONTUL, Simona, Eduardo FORTUNATO, Francesca DE CHIARA, Rui BURRINHA a Marco BALDEIRAS. *Railways Track Characterization Using Ground Penetrating Radar*. *Procedia Engineering* [online]. 2016, 143, 1193–1200. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2016.06.120
- [62] SOLLA, Mercedes a Simona FONTUL. NON-DESTRUCTIVE TESTS FOR RAILWAY EVALUATION: DETECTION OF FOULING AND JOINT INTERPRETATION OF GPR DATA AND TRACK GEOMETRIC PARAMETERS. *Ground Penetrating Radar*. 2018, 1(1), 29.
- [63] BIANCHINI CIAMPOLI, Luca, Alessandro CALVI a Fabrizio D'AMICO. *Railway Ballast Monitoring by GPR: A Test Site Investigation* [online]. preprint. B. m.: ENGINEERING. 2019 [vid. 2020-12-21]. Dostupné z: doi:10.20944/preprints201909.0237.v1
- [64] BARRETT, Brian E., Hugo DAY, Jon GASCOYNE a Asger ERIKSEN. Understanding the capabilities of GPR for the measurement of ballast fouling conditions. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2019, 169, 183–198. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2019.07.005
- [65] MATURANA, Raúl Mínguez, Begoña Duclos BAUTISTA, Álvaro Andrés AGUACIL, Miguel Rodríguez PLAZA a Senén Sandoval CASTAÑO. *Preventive Maintenance of Railway Infrastructures using GPR–Ground Penetrating Radar* [online]. nedatováno [vid. 2015-08-04]. Dostupné z: [http://www.railway-research.org/IMG/pdf/g7\\_minguez\\_maturana\\_raul.pdf](http://www.railway-research.org/IMG/pdf/g7_minguez_maturana_raul.pdf)
- [66] KHAKIEV, Zelimkhan, Vladimir SHAPOVALOV, Alexander KRUGLIKOV and Victor YAVNA. *GPR determination of physical parameters of railway structural layers*. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2014, 106, 139–145. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2014.04.017
- [67] KHAKIEV, Zelimkhan, Vladimir SHAPOVALOV, Alexander KRUGLIKOV, Andrey MOROZOV a Victor YAVNA. *Investigation of long term moisture changes in trackbeds using GPR*. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2014, 110, 1–4. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2014.08.014
- [68] NARAYANAN, Ram M. *Railroad track modulus estimation using ground penetrating radar measurements*. *NDT & E international : independent nondestructive testing and evaluation* [online]. 2004, 37(2), 141–151. ISSN 0963-8695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2003.05.003

- [69] DELL'ACQUA, Gianluca a Fred WEGMAN, ed. *Transport Infrastructure and Systems*; proceedings of the Aiiit International Congress on Transport Infrastructure and Systems (Tis 2017), Rome, Italy, 10-12 April 2017 [online]. CRC Press/Balkema P. O. Box 11320, 2301 EH Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema, 2017 [vid. 2018-12-20]. ISBN 978-1-138-03009-1. Dostupné z: doi:10.1201/9781315281896
- [70] VORSTER, D J a P J GRÄBE. The use of ground- penetrating radar to develop a track substructure characterisation model. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*. 2013, **55**(3), 11.
- [71] ROBERTS, Roger, John RUDY a Salem GSSI. *Railroad ballast fouling detection using ground penetrating radar*. A new approach based on scattering from voids. ECNDT 2006–Th. 4.5 [online]. 2006, 1 [vid. 2015-10-26]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.159.4471&rep=rep1&type=pdf>
- [72] BIANCHINI CIAMPOLI, L. et al., *Efficient practices in railway ballast maintenance and quality assessment using GPR*, 2017, DOI:10.1201/9781315281896-56
- [73] MARECOS, Vânia, Mercedes SOLLA, Simona FONTUL a Vitor ANTUNES. *Assessing the pavement subgrade by combining different non-destructive methods*. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 135, 76–85. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.01.003
- [74] SILVAST, M., *NDT Techniques in Railway Structure Analysis*, 2006, Proceedings of the 7th World Congress on Railway Research, Montreal, Canada
- [75] SIMI, Alessandro, Guido MANACORDA, Mario MINIATI, Stefania BRACCIALI and Andrea BUONACCORSI. *Underground asset mapping with dual-frequency dual-polarized GPR massive array*. In: 2010 13th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2010): Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar [online]. Lecce: IEEE, 2010, s. 1–5 [vid. 2019-02-22]. ISBN 978-1-4244-4604-9. Dostupné z: doi:10.1109/ICGPR.2010.5550236
- [76] SANTOS-ASSUNÇÃO, S.; PEDRET RODÉS, J.; PÉREZ-GRACIA, V. *Ground Penetrating Radar Railways Inspection*. In Proceedings of the 75th EAGE Conference & Exhibition Incorporating SPE EUROPEC 2013, London, UK, 10–13 June 2013.
- [77] FONTUL, Simona, André PAIXÃO, Mercedes SOLLA a Lara PAJEWSKI. *Railway Track Condition Assessment at Network Level by Frequency Domain Analysis of GPR Data*. *Remote Sensing* [online]. 2018, 10(4), 559. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs10040559
- [78] SHIHAB, S., O. ZAHRAN a W. AL-NUAIMY. *Time-frequency characteristics of ground penetrating radar reflections from railway ballast and plant*. In: [online]. B.m.: IEEE, 2002, s. 8 [vid. 2016-06-10]. ISBN 978-0-7803-7618-2. Dostupné z: doi:10.1109/HFPSC.2002.1088424

- [79] SHAO, Wenbin, Abdesselam BOUZERDOUM, Son Lam PHUNG, Lijun SU, Buddhima INDRARATNA a Cholachat RUJIKIATKAMJORN. *Automatic Classification of Ground-Penetrating-Radar Signals for Railway-Ballast Assessment*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing [online]. 2011, 49(10), 3961–3972. ISSN 0196-2892. Dostupné z: doi:10.1109/TGRS.2011.2128328
- [80] MANACORDA, Guido, Davide MORANDI, Antonio SARRI a Giuseppe STACCONI. Customized GPR system for railroad track verification. In: Steven KOPPENJAN a Hua LEE, ed. *Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR2002)* [online]. 2002, s. 719–723 [vid. 2020-12-30]. Dostupné z: doi:10.1117/12.462265
- [81] BRANCADORO, M. G., L. Bianchini CIAMPOLI, C. FERRANTE, A. BENEDETTO, F. TOSTI and A. M. ALANI. *An Investigation into the railway ballast grading using GPR and image analysis*. In: *Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 2017 9th International Workshop on*. B. m.: IEEE, 2017, s. 1–4.
- [82] BIANCHINI CIAMPOLI, Luca, Fabio TOSTI, Maria Giulia BRANCADORO, Fabrizio D'AMICO, Amir M. ALANI and Andrea BENEDETTO. *A spectral analysis of ground-penetrating radar data for the assessment of the railway ballast geometric properties*. *NDT & E International* [online]. 2017, 90, 39–47. ISSN 09638695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2017.05.005
- [83] ZHANG, Q., J. GASCOYNE a A. ERIKSEN. *Characterisation of ballast materials in trackbed using ground penetrating radar: Part 1*. In: *Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011), 5th IET Conference on* [online]. B.m.: IET, 2011, s. 1–8 [vid. 2017-01-09]. Dostupné z: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6191861](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6191861)
- [84] CLARK, Max, Michael GORDON a Mike C. FORDE. *Issues over high-speed non-invasive monitoring of railway trackbed*. *NDT & E International* [online]. 2004, 37(2), 131–139. ISSN 09638695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2003.05.002
- [85] CARPENTER, D, P. J. JACKSON and A JAY. *Enhancement of the GPR method of railway trackbed investigation by the installation of radar detectable geosynthetics*. *NDT & E International* [online]. 2004, 37(2), 95–103. ISSN 09638695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2003.06.003
- [86] LI, Dingqing, David READ, Hugh THOMPSON, Ted SUSSMANN, Russell MCDANIEL, Norfolk Southern RAILWAY a V. A. ROANOKE. *Evaluation of Ground Penetrating Radar Technologies for Assessing Track Substructure Conditions* [online]. nedatováno [vid. 2015-08-04]. Dostupné z: [https://www.arena.org/files/library/2010\\_conference\\_proceedings/evaluation\\_of\\_ground\\_penetrating\\_radar\\_technologies\\_for\\_assessing\\_track\\_substructure\\_conditions.pdf](https://www.arena.org/files/library/2010_conference_proceedings/evaluation_of_ground_penetrating_radar_technologies_for_assessing_track_substructure_conditions.pdf)
- [87] *Ground Penetrating Radar Data Acquisition Unit/ SIR 30 / GSSI* [online]. [vid. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.geophysical.com/products/sir-30>
- [88] *Street - Copyright © 2011-2017 Geophysical Survey Systems, pdf* [online]. [vid. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.geophysical.com/wp-content/uploads/2017/10/GSSI-SIR-30-Manual.pdf>

- [89] *Ground Penetrating Radar Antennas / GSSI* [online]. [vid. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.geophysical.com/antennas>
- [90] *RADAN / GPR Software by GSSI / Underground Mapping Software* [online]. [vid. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.geophysical.com/software>
- [91] PAJEWSKI, Lara, Milan VRTUNSKI, Eljko BUGARINOVI, Aleksandar RISTI, Miro GOVEDARICA, Colette GRÉGOIRE, Carl Van GEEM, Xavier DEROBERT, Vladislav BORECKY, Salih Serkan ARTAGAN, Simona FONTUL, Vânia MARECOS a Sébastien LAMBOT. *GPR System Performance Compliance According To Cost Action TU 1208 Guidelines*. *Ground Penetrating Radar*. 2018, 1(2), 35.

Příloha I – Návrh metodiky Správy železnic, s. o.

Příloha II – Naměřená data a jejich zpracování (CD)