

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Analýza možností GPR pro detekci konstrukčních
vrstev netuhých vozovek PK

Bc. Veronika Malinská

Diplomová práce
2016

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Veronika Malinská**
Osobní číslo: **D15468**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní stavitelství**
Název tématu: **Analýza možností využití GPR pro detekci konstrukčních vrstev netuhých vozovek pozemních komunikací**
Zadávací katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

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

Na základě rešerše literatury a vlastních zkušeností z měření a zpracování GPR dat vypracujte analýzu možností využití GPR pro detekci konstrukčních vrstev netuhých vozovek PK. Zhodnoťte současné metody, jejich nedostatky a omezení, a formulujte vlastní doporučení a závěry. Dále uveďte základní principy fungování této technologie. Popište Vámi používané zařízení a programové vybavení. V praktické části proveďte sérii experimentálních měření na netuhých vozovkách Pk. Proveďte vyhodnocení získaných dat.

Hlavní části DP:

1. Úvod
2. Teorie GPR obecně
3. Rešerše literatury se zaměřením na využívání georadaru pro detekci konstrukčních vrstev netuhých vozovek
4. Popis použitého HW a SW
5. Vlastní měření pomocí GPR sestavy KDS
6. Zpracování naměřených dat, tvorba výstupů
7. Vlastní analýza dané problematiky na základě studia literatury a vlastních zkušeností
8. Doporučení a závěr

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- Timo SAARENKETO - Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys
- Filip Eichler - Experimentální ověřování vlastností silničních materiálů
- David J.Daniels - Ground Penetrating Radar
- Radek Matula - Nedestruktivní diagnostika konstrukcí vozovek pozemních komunikací georadarem
- Andreas Loizos - Accuracy of pavement thicknesses estimation using different Ground Penetrating Radar analysis approaches
- Fauchard- GPR performances for thickness calibration on road test sites
- Johannes Hugenschmidt - Ground Penetrating Radar for road engineering
- Timo SAARENKETO - Road evaluation with ground penetrating radar
- Waheed Uddin - An overview of GPR applications for evaluation of pavement thickness and cracking
- Carl A. Lennfren, Joergen Bergstrom a Benny M. Ersson - Using ground penetrating radar for assesing highway pavement thickness
- I.L. Al-Quadi - Measuring layer thicknesses with GPR - Theory to practice

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladislav Borecký

Katedra dopravního stavitelství

Datum zadání diplomové práce: **30. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **20. ledna 2017**



Ing. Michaela Ledvínová, Ph.D.
proděkanka pověřená řízením fakulty

L.S.



doc. Ing. Vladimír Doležel, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. listopadu 2016

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

V Pardubicích dne 12.05.2017

Bc. Veronika Malinská

Poděkování:

Ráda bych touto cestou poděkovala svému vedoucímu diplomové práce Ing. Vladimíru Boreckému za neocenitelnou pomoc, odborné vedení a cenné rady v průběhu vypracování této diplomové práce.

ANOTACE

Diplomová práce je zaměřena na analýzu možností využití georadaru pro detekci konstrukčních vrstev netuhých vozovek na pozemních komunikacích. V teoretické části jsou popsány základní vlastnosti, metody práce a nastavení GPR. V praktické části se práce věnuje sérii experimentálních měření na laboratorních vzorcích, testovacím úseku a v neposlední řadě měření na vybraném úseku silnice II/322 Dašice. Součástí diplomové práce je vyhodnocení jednotlivých měření v laboratoři VVCD, stanovení rychlosti šíření a relativní permitivity na materiálech v IBC kontejnerech. Praktická část je ukončena měřeními v in-situ, vyhodnocením získaných dat a následné porovnání s převzatými daty od Správy a údržby silnic Pardubického kraje. Na základě rešerše z literatury a vlastních zkušeností z měření byla vypracována analýza možností využití GPR pro detekci konstrukčních vrstev netuhých vozovek pozemních komunikací.

KLÍČOVÁ SLOVA

georadar, netuhá vozovka, nedestruktivní metoda, pozemní komunikace, rychlost šíření elektromagnetického signálu, relativní permitivita prostředí.

TITLE

Analysis of the possibility of using GPR to detect structural layers of flexible pavements on roads

ANNOTATION

The diploma thesis is focused on the analysis of the possibilities of georadar utilization for detection of structural layers of flexible pavements on roads. The work focuses on the basic features. In the practical part, the thesis deals with a series of experimental measurements on laboratory samples, the test section on a selected section of road. The aim of the practical part is to evaluate individual measurements in the VVCD laboratory, to determine the rate of propagation velocity and relative permittivity of materials in IBC containers. Practical part is completed by in-situ measurement, evaluation of acquired data and subsequent comparison with taken over data. Based on a literature search and own measurement experience, the analysis of the possibilities of using GPR for the detection of structural layers of flexible pavements was developed.

KEYWORDS

ground penetrating radar, flexible pavements, non-destructive method, roads, velocity of radar signal, relative dielectric permittivity.

OBSAH

Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
Seznam vzorců	13
ÚVOD	16
1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY GEORADARU	18
1.1 Historie GPR	18
1.2 Aplikace GPR	19
2. TEORIE GPR OBECNĚ	21
2.1 Základní teorie EM vln	21
2.2 Princip fungování GPR	24
2.3 Sestava georadaru	25
2.4 Anténní systémy	26
2.5 Sběr dat	28
2.5.1 Metody určení rychlostí GPR signálu	29
2.6 Zpracování dat	32
2.7 Interpretace GPR dat	33
2.8 Výstupy GPR dat	33
3. VYUŽITÍ GEORADARU PRO DETEKCI KONSTRUKČNÍCH VRSTEV NETUHÝCH VOZOVEK POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ	34
3.1 Úvod	34
3.2 Využití GPR v zahraničí	36
3.3 Využití GPR v České republice	42
4. POPIS DOSTUPNÉHO SW A HW	45
4.1 GPR software	45
4.2 Hardware GPR	48
4.2.1 Použité antény společnosti IDS	50
5. POUŽITÉ ALGORITMY A ZPRACOVÁNÍ DAT	51
6. VLASTNÍ MĚŘENÍ POMOCÍ GPR SESTAVY KDS A TVORBA VÝSTUPŮ	54
6.1 Laboratorní měření	54
6.1.1 Vzorek P1	55
6.1.2 Vzorek P2	55
6.1.3 Vzorek P3	56

6.1.4	Vzorek Š1.....	56
6.1.5	Vzorek Š2.....	57
6.1.6	Vzorek Š3.....	57
6.2	Betonová podlaha	59
6.3	TESTOVACÍ ÚSEK	60
6.3.1	Testovací úsek 1	61
6.3.2	Testovací úsek 2	63
6.4	MĚŘENÍ NA VYBRANÉ POZEMNÍ KOMUKACI	68
6.4.1	Porovnání převzatých dat s aktuálními daty na silnici II/322 – Dašice	72
7.	VLASTNÍ ANALÝZA DANÉ PROBLEMATIKY NA ZÁKLADĚ STUDIA LITERATURY A VLASTNÍCH ZKUŠENOSTÍ.....	76
8.	ZÁVĚR.....	79
9.	POUŽITÁ LITERATURA	81
10.	PŘÍLOHY	85

Seznam obrázků

Obr. 1 - 1: RoadScan 30 a 2: BridScan od firmy GSII	20
Obr. 2 - Geometrie šíření vln podpovrchovou vrstvou.....	23
Obr. 3 - Základním principem GPR při použití air - coupled antény	24
Obr. 4 - Schéma systému GPR	25
Obr. 5 - Systém GPR silničních průzkumů	26
Obr. 6 - Různé GPR systémy a konfigurace antény použité v silničních průzkumech	27
Obr. 7 - Princip metody přímé vlny.....	30
Obr. 8 - Schéma metody CMP.....	30
Obr. 9 - Trans illumination	31
Obr. 10 - Přehled GPR zpracování dat	32
Obr. 11 - Reakce spektra – měřené ve 4 bodech.....	37
Obr. 12 - Zkušební úsek pro vyhodnocení nejistoty 1GHz antény	39
Obr. 13 - Vozovková zkušební sekce pro sběr dat.....	41
Obr. 14 - Průzkum GPR na přístrojové části vozovky.....	42
Obr. 15 - Zobrazení softwaru Road Doctor.....	46
Obr. 16 - Program na zpracování dat Reflexw od firmy Sandmeier Software	47
Obr. 17 - Program K2 FW pro sběr a zpracování dat.....	47
Obr. 18 - Konfigurace RIS Hi - Pave	49
Obr. 19 - Zkušební vozík s air – coupled anténou s frekvencí 2GHz	54
Obr. 20 - Vzorek P1	55
Obr. 21 - Vzorek P2	55
Obr. 22 - Vzorek P3	56
Obr. 23 - Vzorek Š1	56
Obr. 24 - Vzorek Š2	57
Obr. 25 - Vzorek Š3.....	58
Obr. 26 - Rychlosti šíření zjištěná pomocí položky hyperbola v programu Reflexw	59
Obr. 27 - Plánek měřených testovacích úseků.....	60
Obr. 28 - Radargram z měření rychlosti šíření EM signálu na betonové podlaze anténou 2 GHz	61
Obr. 29 - Radagram s vyznačenými vrstvami.....	62
Obr. 30 - Data zpracována 900MHz anténou.....	63
Obr. 31 - Data zpracována 400MHz anténou.....	64

Obr. 32 - Data zpracována 2GHz anténou.....	65
Obr. 33 - Radargram z měření testovacího úseku 2- anténa s frekvencí 2GHz.....	65
Obr. 34 - Radargram z měření z testovacího úseku 2 – anténa s frekvencí 900MHz se zpracovanými daty.....	66
Obr. 35 - GPR v in situ.....	67
Obr. 36 - Mapa měřeného úseku.....	68
Obr. 37 - Data naměřená 2GHz anténou a zobrazení radargramu s krytovými a stmelenými vrstvami.....	69
Obr. 38 - Data naměřená 900MHz anténou.....	70
Obr. 39 - Data naměřená 2 GHz anténou – směr ke křižovatce ulic Křičenského a Žižkova.....	71
Obr. 40 - Data naměřená 900MHz anténou - směr ke křižovatce ulic Křičenského a Žižkova.....	71
Obr. 41 - Porovnání stmelených vrstev z aktuálních dat a převzatých dat – první měřicí profil.....	72
Obr. 42 - Porovnání stmelených vrstev z aktuálních dat a převzatých dat – druhý měřicí profil.....	73
Obr. 43 - Porovnání celkové konstrukční tloušťky vozovky – v prvním měřicím profilu.....	73
Obr. 44 - Porovnání celkové konstrukční tloušťky vozovky – v druhém měřicím profilu.....	74

Seznam tabulek

Tab. 1 - Dosah antén s různou frekvencí.....	27
Tab. 2 - Typické dielektrické hodnoty podloží a základových půd používaných v GPR.....	31
Tab. 3 - Využití GPR správci komunikací v České republice.....	44
Tab. 4 - Seznam jednotlivých výrobců.....	45
Tab. 5 – Výpis hardware.....	48
Tab. 6 - Vlastnosti zkoušených materiálů.....	54
Tab. 7 - Relativní permitivita a rychlost šíření jednotlivých vzorků.....	58
Tab. 8 - Srovnání amplitud odraženého signálu.....	61
Tab. 9 - Konstrukce testovacího úseku.....	62

Seznam vzorců

(1) - Rychlost průniku EM vln.....	21
(2) - Relativní permitivita.....	21
(3) - Elektrická vodivost.....	22
(4) - Vlnová délka.....	22
(5) - Tloušťka vrstvy vozovky.....	29
(6) - Relativní permitivita - pro metodu RCM.....	61

Seznam zkratek

AC - Asphalt Concrete

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

CB kryt – cementobetonový kryt

CMP - common midpoint (metoda společného reflexního bodu)

COM - common offset method

EM – elektromagnetický (electromagnetic)

ERDC - Army Engineer Research and Development Center

GB - Granular Base

FHWA – Federal Highway Administration

FOM - fixed offset method

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

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

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

GPS - Global Positioning System

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

JTSK - jednotná trigonometrická síť katastrální

LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chausse'es

MISW - Multiple Impact Surface Wave

NTUA - National Technical University of Athens

QA – quality assurance

QC – quality control

PCC - portland cement concrete

PK - pozemní komunikace

PPP - Public Private Partnership

RCM - Reflection Coefficient Method

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

RDSV - Road Doctor Survey Vehicle

ReflexW – německý software pro vyhodnocení a interpretaci GPR dat

SAL – Stress Absorbing Layer

SPR - surface-penetrating radar

TP - technické podmínky Ministerstva dopravy

TTI - Texas Transportation Institute

USA – United States of America

VOM - variable offset methods

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

WARR – wide angle reflection and refraction

WGS 84 - World Geodetic System 1984

ÚVOD

Georadar je geofyzikální metoda sloužící k vykreslení podpovrchových struktur. V posledních letech je tato metoda využívána jako levná, rychlá a spolehlivá, ale přesto není GPR dostatečně využíván. Stanovení konstrukčních tloušťek pomocí metody GPR je často doprovázeno rázovým zařízením - deflektometrem. Na základě těchto měření je možné určit možná rizika v podobě poruch na pozemních komunikacích (PK).

Diplomová práce popisuje základní problematiku a principy fungování georadaru pro detekci konstrukčních vrstev netuhých vozovek PK. Práce je rozdělena do sedmi hlavních kapitol. V úvodní kapitole je uvedena základní problematika metody GPR a stručné seznámení s historií vývoje georadarových systémů. V druhé kapitole je popsána obecná teorie GPR – od základních fyzikálních vlastností spojených s technologií a rovnic pro stanovení klíčových vlastností materiálů pro šíření a útlum elektromagnetických vln. V této kapitole je také popsána sestava GPR a metody pro určení rychlosti GPR signálu. V třetí kapitole je provedena rešerše zahraniční i české literatury se zaměřením na využití GPR na netuhých vozovkách. V následující čtvrté kapitole je popsán software Reflexw využitý v této diplomové práci ke zpracování dat, ale i ostatní softwary potřebné pro sběr a zpracování dat. Součástí této kapitoly je také popis použitého hardware RIS Hi-Pave, který byl využit k této práci. V kapitole pět jsou uvedeny jednotlivé kroky pro zpracování dat, a to především funkce correct max. phase a move starttime a funkce subtracting average, která je vhodná pro detekci inženýrských sítí. Kapitola šest, těžiště této práce, zahrnuje experimentální měření s jednotkou GPR přímo v laboratoři na vybraných vzorcích, ale především na vybraném úseku PK. V této kapitole byly získány zkušenosti a použity poznatky z předchozích kapitol, a to především z kapitoly 2 a 5. V poslední kapitole je na základě výše uvedeného vypracovaná vlastní analýza dané problematiky.

Cílem této diplomové práce není jen teoretické řešení, ale především prozkoumání technologie GPR a možnost aplikovat tuto metodu pro detekci konstrukčních vrstev netuhých vozovek. V praktické části diplomové práce bude provedena série experimentálních měření, dojde ke stanovení rychlosti šíření v různých materiálech a stanovení jejich relativní permitivity. Hlavním úkolem této diplomové práce je stanovení konstrukčních vrstev na vybraném úseku pozemní komunikace. Měření bude provedeno za pomoci georadarové sestavy, a to konkrétně přístrojem

RIS Hi-Pave. Na základě rešerše z literatury a vlastních zkušeností z měření byla vypracována analýza možností využití GPR pro detekci konstrukčních vrstev netuhých vozovek pozemních komunikací.

1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY GEORADARU

GEORADAR - Ground Penetrating Radar (GPR), ‘ground - probing radar’, ‘sub-surface radar’ nebo surface-penetrating radar ‘(SPR)’ je považován za nejperspektivnější podpovrchovou snímací techniku. [1] Patří relativně do nových geofyzikálních technik a zároveň mezi rychle se rozvíjející oblasti. Tato metoda zaznamenala obrovský pokrok před 20 lety v přechodu z analogové podoby do digitální. Vývoj GPR zachází do širokého spektra vědeckých a technických aplikací. Georadarová metoda zahrnuje celou řadu oblastí, které se zabývají průzkumem před zahájením stavební činnosti, vyhledávání inženýrských sítí, slouží ke kontrole a průzkumu podzemních a podvodních objektů. [2] GPR je diagnostické nedestruktivní a neinvazivní zařízení. Jedná se o elektromagnetickou techniku, která je určena pro měření jak v blízkosti povrchu, tak i v několika desítkách metrů. [4]

Mezi nejdůležitější výhody georadaru patří: nedestruktivní metoda průzkumu, digitální záznam georadarových dat ve 2D a 3D – vygenerování libovolných řezů podloží, mobilita. V oblasti pozemních komunikací umožňuje georadar provádět měření konstrukce vozovky bez nutnosti narušení konstrukce nebo provádění výkopových prací. Konkrétně slouží ke stanovení polohy kluzných trnů a kotev v CB krytu vozovek, ke stanovení konstrukčních vrstev vozovky, slouží pro monitorování poruch pozemních komunikací, detekci dutin a kaveren např. v podloží, k detekci nadměrného obsahu vody v konstrukčních vrstvách vozovek a ke stanovení hloubky trhlin v krytu vozovky.

1.1 Historie GPR

Praktické využití elektromagnetických signálů pro určení pozemních předmětů je připisováno Hiilmeyerovi v roce 1904, ale první popis jejich využití se objevil o šest let dříve v Německu (Leimbacha a Löwy). [3]

Historie použití georadaru v oblasti dopravní infrastruktury sahá až do roku 1970. Podle Moreyho (1998) byl radar testován v tunelech a později také pro průzkum mostovek organizací Federal Highway Administration (FHWA) v U.S.A. [17] V roce 1977 Morey a Kovacs využili radar k detekci vlhkosti ve stavebních materiálech, Cantor a Kneeter (1978) pro kontrolu mostovek a Erhard (1978) pro detekci dutin pod betonovými deskami. [2]

Na vývoji prvního vozidla se podílela organizace FHWA v roce 1985. V 80. letech byl zahájen průzkum také v Kanadě a ve Skandinávii, kde byly provedeny první testy s ground-coupled anténou. GPR byl také využíván v Dánsku, ale přestože výsledky byly slibné, tato metoda nebyla dále rozvíjena. [17]

Ve Finsku se naopak tato metoda uplatnila v roce 1986 (Saarenketo, 1992), kde se stala běžným nástrojem pro plánování údržby a oprav vozovek. Poté byla metoda využita pro kontrolu kvality vozovky (Saarenketo & Roimela, 1998). [17] Na začátku 90. let byla většina aplikací v Severní Americe zaměřena na měření tloušťky vozovky (Maser, 1994), odhalování dutin a zjišťování oblastí poruch v mostovkách (Alongi, 1992). Tyto výzkumy byly prováděny především vysokofrekvenčními air-coupled anténami. [17] V druhé polovině 90. let byl GPR systém využíván kromě výše uvedeného i na měření hloubky ocelových hmoždinek, detekci objektů v podloží, posouzení stavu izolace v oblasti mostních podpěr. [2]

Podle Hoobse (1993) byly první testy stavebního inženýrství s GPR ve Velké Británii provedeny v roce 1984. Zde byl výzkum GPR orientován především na betonové konstrukce, testování vozovek a železniční průzkumy. Ve Francii byl kladen důraz na testování vozovek (Daniels, 1996). V Nizozemsku byl GPR hlavní aplikací na silnicích pro měření tloušťky vrstvy vozovky. [17]

V posledních letech byl vývoj GPR zaměřen na různé typy aplikací na silnicích s nízkou intenzitou dopravy, jak na zpevněném, tak na nezpevněném povrchu. V roce 2004 Tiehallinto zveřejnil první specifikace o hardwaru GPR pro využití na diagnostiku pozemních komunikací. Také byl zahájen výzkum možností využití GPR výsledků automatizovanou silniční a stavební technikou (Heikkila, 2004). [17]

1.2 Aplikace GPR

Georadar je možné využít v různých profesních oborech. Mezi hlavní obory patří: geologické mapování, průzkumy před zahájením stavebních činností, průzkum dna a nánosů pod vodními plochami, soudní vyšetřování (lokalizace obětí, skryté zbraně), ekologie, zjišťování hladiny podzemních vod, zjištění mocnosti sněhu a ledu, zlomů a prasklin v ledovcích, lesnictví, vojenství, ke skenování mostů, v archeologii, v těžebním průmyslu, aj.

Diagnostika dlouhých úseků pomocí GPR je cenově dostupná a poskytuje uživatelům účinný nástroj pro rychlé stanovení tloušťky vrstvy vozovky. GPR je schopen zaznamenávat velké množství dat. Data mohou být získávána při takových rychlostech, kdy nedochází k omezení provozu, což eliminuje potřebu uzavěry jízdního pruhu a poskytuje vyšší bezpečnost pracovního prostředí. [9]

Aplikace GPR je využívána pro určení průběhu a hloubky trhlin. Podle hloubky trhliny se volí anténní systémy, obvykle s centrální vysílací frekvencí 900MHz a vyšší. Pro zjištění tlouštěk konstrukčních vrstev se doporučuje měření provádět kombinací anténních systémů s různou centrální vysílací frekvencí. Pro detekci vlhkosti v konstrukčních vrstvách se volí anténní systémy s vyšší vysílací frekvencí a s hloubkovým dosahem do dané konstrukční vrstvy. Pro diagnostiku vozovky mostních objektů se aplikuje systém rovnoběžných profilů vedených ve směru osy komunikace.



Obr. 1 – 1: RoadScan 30 a 2: BridScan od firmy GSII

Zdroj: [10]

2. TEORIE GPR OBECNĚ

2.1 Základní teorie EM vln

GPR vysílá elektromagnetické signály ve formě vln. Chování těchto impulzů je popsáno Maxwellovými rovnicemi. [7] Permittivita (ϵ), elektrická vodivost (σ) a magnetická prostupnost (μ) jsou klíčové vlastnosti materiálu, které řídí šíření a útlum elektromagnetických vln. Ve volném prostoru jsou magnetická citlivost a permittivita nezávislé na frekvenci. V dokonalém dielektrickém prostředí nejsou žádné ztráty šíření EM vln, a proto neexistuje žádný útlum, který se vyskytuje v reálném dielektrickém prostředí. K útlumu EM signálu dochází při průchodu různými materiály. To je způsobeno vodivými materiály, vlhkostí, díky odrazům, ohybům, lomům signálu. Jestliže je materiál vysoce vodivý, je útlum signálu vysoký a dosah signálu je nízký (do 1m) a v případě málo vodivého materiálu je útlum signálu nízký a dosah vysoký (10 – 100 m). Útlum EM je závislý na použité frekvenci antény při diagnostice.

Rychlost průniku elektromagnetických vln prostředím je dána vztahem:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} ; [\text{m/s}] \quad (1)$$

kde: v - rychlost šíření elektromagnetického signálu prostředím (m/ s),

c - rychlost EM vlnění ve vakuu ($2,997 \cdot 10^8$ m/s),

ϵ_r - relativní permittivita prostředí

Relativní permittivita ϵ_r (dielektrická konstanta) se nejčastěji využívá pro zjištění vlastností silničních stavebních materiálů. Jedná se o poměr permittivity látky k permittivitě vakua. Relativní permittivita je dána vztahem:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} ; [\text{F/m}] \quad (2)$$

kde: ϵ_r - relativní permittivita materiálu (dielektrická konstanta),

ϵ - permittivita materiálu,

ϵ_0 - permittivita vakua, fyzikální konstanta, jejíž hodnota je $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

Vodivost (σ) elektrická vodivost popisuje schopnost materiálu vést část elektromagnetické vlny. (Turner a Siggins, 1994). [17] Signál je schopen proniknout velkým množstvím materiálu o nízké vodivosti (suchý písek, led, suchý beton), ale pokud je materiál vodivý (vlhký beton) je EM poměrně rychle absorbován.

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

Magnetická propustnost (μ) – zvýšená magnetická propustnost tlumí elektromagnetické vlny a činí GPR neefektivní. Nicméně, většina půd a inženýrských materiálů neobsahují významné množství magnetických látek, jako je oxid železa. Účinek magnetické propustnosti na elektromagnetickou energii je proto zanedbatelný ($\mu = 1$). Je dána jednotkou H/m (henry na metr) [17]

Provozní frekvence GPR (ω) - elektromagnetické vlny jsou charakterizovány frekvencí. Nízké frekvence generují dlouhé vlny, zatímco vysoké frekvence generují kratší vlny. **Vlnová délka λ** , což je délka opakujícího se úseku vlny, je nepřímo úměrná frekvenci f , která vyjadřuje počet opakování za sekundu:

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

kde: λ - je vlnová délka (m)

v - je rychlost šířících se elektromagnetických vln ve volném prostoru ($\approx 3 \times 10^8$ m/s)

f - frekvence (1/s)

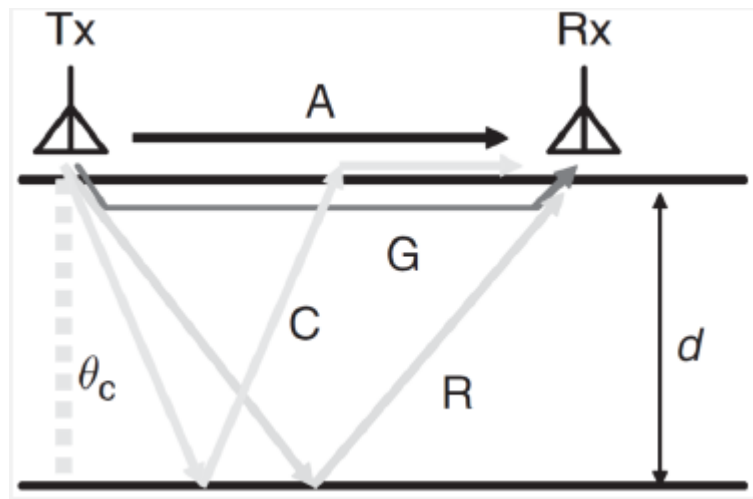
EM vlnění je záření charakterizované periodicky měnícím se elektrickým a magnetickým polem, které se ve vakuu šíří rychlostí světla. Jeho typy jsou např. viditelné světlo, rentgenové záření či radiové vlny. Elektrická a magnetická složka vlnění jsou na sebe navzájem kolmé a zároveň jsou kolmé ke směru šíření vlny.

Šíření elektromagnetických vln v podloží probíhá horizontálním a vertikálním směrem. Většina odražené energie přichází z elipsovité oblasti pod radarem známé jako první Fresnelova zóna, jejich poloměr je dán radarovou vlnovou délkou, rychlostí a hloubkou odrazné plochy.

Základními jevy, ke kterým dochází při průchodu signálu prostředím, jsou odraz (reflexe) a lom (refrakce), které se řídí známými fyzikálními zákony, jako je zákon odrazu a zákon lomu.

Lom (refrakce) na rozhraní dvou prostředí o jiných elektrických vlastnostech se řídí tzv. Snellovým zákonem. V případě, že vlnění přechází z prostředí hustšího do řidšího, dochází k lomu od kolmice (normály k rozhraní). S rostoucím úhlem dopadu se zvětšuje i úhel lomu a při určitém, tzv. kritickém úhlu dopadu je úhel lomu roven pravému úhlu. Kritický úhel je největší úhel, při kterém ještě nastává lom signálu. Při větším úhlu dopadu lom světla nenastává a signál se jen odráží. K lomu může dojít po strmém nebo vertikálním povrchu, což vede k prodloužení doby radarových vln, zkreslení hloubky, umístění, velikosti a geometrie objektu (Cassidy, 2009).

Kvůli těmto dvou změnám směru šíření signálu dorazí do přijímače několik vln za různě dlouhou dobu (viz obrázek 2).



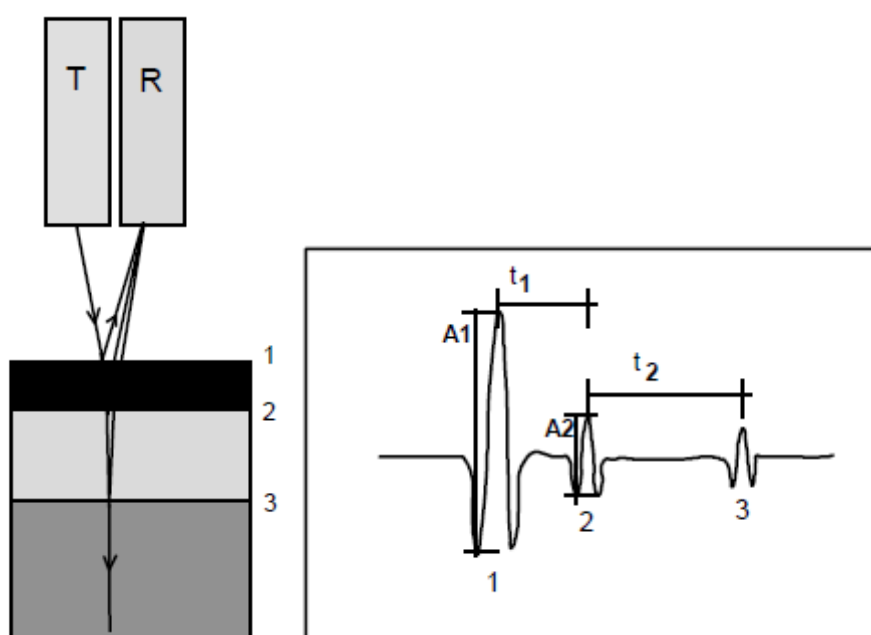
Obr. 2 - Geometrie šíření vln podpovrchovou vrstvou do hloubky d mezi vysílací anténou Tx a přijímací anténou Rx. Písmenem A je označena přímá nadpovrchová vlna, C představuje lomenou vlnu kritického úhlu θ_c , G značí přímou podpovrchovou vlnu a R odraženou vlnu.

Zdroj: [17]

Bláha (1999) shrnul šíření vln tak, že čím je prostředí elektricky vodivější (např. vyšším obsahem vody) a frekvence signálu vyšší, tím je tlumení v zemi intenzivnější a v důsledku toho je dosaženo menšího hloubkového průzkumu. [18] Takahashi, Igel, Preetz a Kuroda (2012) uvádějí, že GPR metody obvykle měří odraz nebo rozptyl elektromagnetického signálu. Daniels (2000) popisuje, jak tyto elektromagnetické vlny cestují při určité rychlosti.

2.2 Princip fungování GPR

Princip georadarové metody spočívá v opakovaném vysílání vysokofrekvenčního elektromagnetického impulsu v rozsahu 1 až 5000MHz vysílací anténou do zkoumaného prostředí. [11] Časová prodleva mezi vysílaným a přijatým vlněním se pohybuje v řádech nanosekund. Část vlnění je rozptýlena, další část absorbují jednotlivé vrstvy zkoumaného materiálu, část impulsů se odrazí od rozhraní nebo objektů a vrací se zpět k zemskému povrchu, kde jsou zachyceny přijímačem. Nejdůležitější údaje jsou čas průchodu signálu konkrétní vrstvou, amplitudy signálů odpovídající jednotlivým odrazům a jejich vzájemný poměr. [12]. Obrázek 3 představuje základní princip GPR s air-coupled anténou (Horn).



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

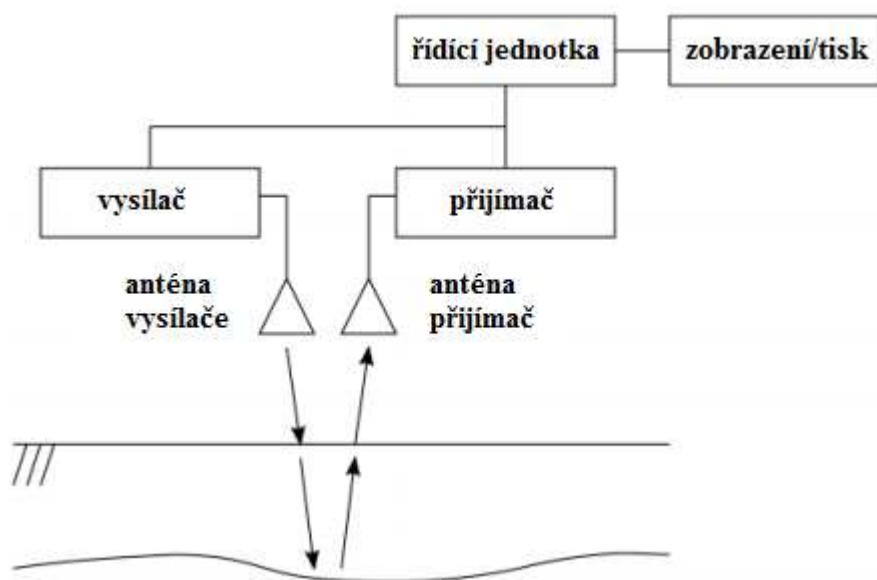
Obr. 3 – Základním principem GPR při použití air-coupled antény

Zdroj: [2]

Dosah a rozlišení GPR závisí na volbě využitě frekvence. Obecně nízké frekvence (200 – 600MHz) jsou používány pro hluboké sondování > 50 m a vysoké frekvence (nad 600MHz) se používají pro mělké sondování < 50 m. [12]

2.3 Sestava georadaru

Georadar se skládá z řídicí jednotky, která může být jednobanální nebo vícekanalová, notebooku, koaxiálních kabelů, anténního systému a zařízení, které slouží pro měření ujeté vzdálenosti (odometr). Notebook slouží k ovládnání řídicí jednotky a k zadání parametrů sběru dat pomocí softwaru a k jejich uložení. Řídicí jednotka vykonává vlastní sběr dat přes připojený anténní systém. Aparatura umožňuje připojení systému pro určování polohy - Global Navigation Satellite System (GNSS) se záznamem dat v zeměpisném souřadném systému (WGS 84 - World Geodetic System 1984, JTSK - jednotná trigonometrická síť katastrální). [11]



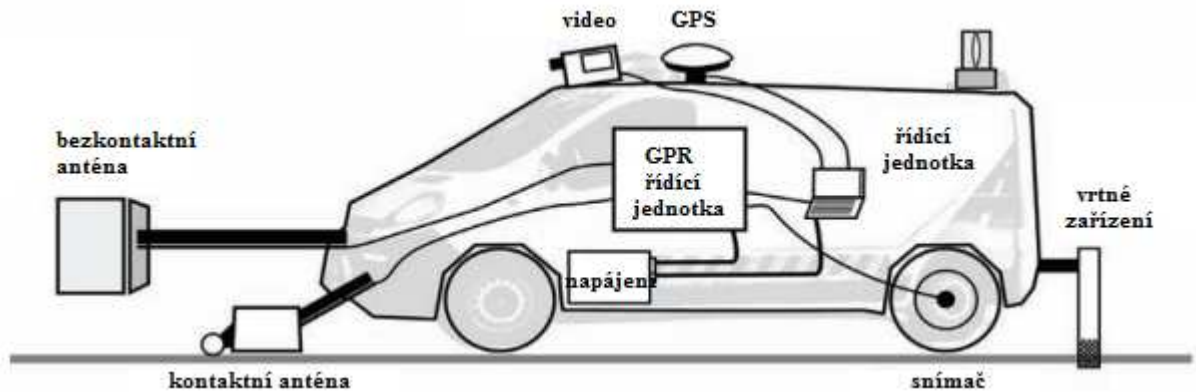
Obr 4. Schéma systému GPR

Zdroj: [4]

Existuje mnoho různých příslušenství, které mohou být použity v dopravní infrastruktuře. Dva nejpoužívanější systémy, které se používají je digitální video a GPS. Další doplňkový systém je vrtací zařízení, které umožňuje odběr referenčních vzorků.

Video je užitečné zejména u rekonstrukce vozovek, kde je důležité správně diagnostikovat příčinu závady. Pomocí termokamery lze odhalit vznikající poruchy ve vozovce a na okolních betonových objektech. Termokamery jsou využity společně při kontrole kvality vozovky. Dalším téměř povinným systémem v průzkumech dopravní infrastruktury je Global Positioning System (GPS). GPR systém je také možné doplnit do Falling Weight Deflectometer (FWD). [2] Deflektometr je rázové zařízení, které tlumeným rázem zatěžuje konstrukční vrstvy vozovky a podloží. Měří hodnoty zatížení

a vyvolané průhyby v jednotlivých bodech. Na obrázku 5. je znázorněn systém GPR pro silniční průzkumy.



Obr. 5 - Systém GPR silničních průzkumů

Zdroj: [2]

2.4 Anténní systémy

Anténní systémy se liší centrální vysílací frekvencí, která je obvykle od 1,0MHz do cca 5,0GHz. Podle dané problematiky, kterou řešíme, se volí daný anténní systém. Pro georadarové měření na pozemních komunikacích se převážně používají anténní systémy s centrální vysílací frekvencí od 400MHz do 2,0GHz. Anténní systémy lze rozdělit na ground-coupled a air-coupled. [2]

Za účelem získání detailní informace o měřeném úseku silnice v celé jeho délce je anténa tažena po vozovce, případně je uchycena na nebo za měřicí vozidlo a elektromagnetický impuls se vysílá do konstrukce vozovky v pravidelných časových či délkových intervalech. [6]

Podle účelu měření se volí vhodná anténa. Anténa s nízkou frekvencí má dosah v řádu metrů až desítek metrů, ale zachytí pouze objekty větších rozměrů. Anténa s vyšší frekvencí je schopná detekovat menší objekty, ovšem na úkor nižšího dosahu. Lze také použít vícekanálové systémy, které umožňují sběr dat pomocí mnoha antén a tím provádět měření několika profilů současně, což umožňuje 3D získávání dat.

Obrázek 6. představuje různé GPR anténní systémy používané při dopravních průzkumech. Foto (A) prezentuje vícekanálový radar 3-D z Norska, (B) znázorňuje 100MHz GSSI ground-coupled anténu a 1,0GHz impulsní radarové antény použité v Texas Transportation Institute (TTI) a (C) představuje radarový systém kanadského silničního

provozu, který má Horn anténní systém a ground-coupled anténní soustavy (Davis et al. 1994) a snímek (D) představuje air-coupled Horn anténní systém. [2]



Obr. 6 - Různé GPR systémy a konfigurace antény použité v silničních průzkumech.

Zdroj: [2]

V následující tabulce je uveden sortiment jednoho z největších dodavatelů firmy GSSI.

Tab. 1 – Dosah antén s různou frekvencí

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

Zdroj: [10]

Antény ground-coupled pracují s centrální frekvencí od 80MHz do 1,5GHz a antény air-coupled obecně pracují v rozsahu od 500MHz do 2,5GHz, z nichž nejčastější centrální frekvencí je 1,0GHz.

Antény se rozdělují: na *monostatické* a *bistatické* antény. Monostatická anténa má vysílač a přijímač a tvoří jeden funkční celek. Naopak bistatická anténa využívá jen vysílač nebo přijímač.

2.5 Sběr dat

Georadarové průzkumy konstrukcí jsou procesy, kde je doporučena spolupráce zákazníka a dodavatele měření GPR. V běžných silničních průzkumech je prováděn jeden měřicí podélný profil u dvoupruhové silnice (vnější stopa vozidla). Při sběru dat, je možné využít oba anténní systémy air-coupled a ground-coupled, a to v řadě nebo vedle sebe.

Sběr dat může být ovlivněn výskytem vody na povrchu pozemní komunikace anebo v konstrukci vozovky. Při využití ground-coupled anténního systému je potřeba, aby zkoumaný povrch byl suchý a bez viditelně vlhkých míst, teplota povrchu by měla být větší než 0°C.

Za účelem sběru kvalitních údajů, má být rychlost měřícího vozidla nebo pomocného vozíku při sběru dat co nejnižší, ale zároveň je potřeba brát zřetel na provoz. Proto se volí taková rychlost, aby nedocházelo k omezení provozu. Výsledky testů provedených Texas Transportation Institute při různých rychlostech až do 70 km/h ukázaly, že rychlost nemá významný vliv na amplitudu odrazu (Scullion, 1992). Přesnost průzkumu ovlivňuje i drsnost povrchu, Davis (1994) naznačuje, že drsnost povrchu snižuje amplitudu odraženého signálu. Spagnolini (1997) pojednává o rozptylu elektromagnetických vln na drsném povrchu, ale dospěl k závěru, že tento jev může být uvažován při zpracování dat. [2]

Sběr dat je možné provést v jednom bodě, kde se měří pouze jedna stopa signálu, tento záznam se nazývá A-Scan. V profilu s opakujícími po sobě jdoucími měřeními s konkrétním přesunováním antény podél měřeného profilu se tento záznam nazývá B-scan. V tomto případě se vysílač a přijímač současně pohybují podél měřeného profilu s vzájemným odstupem. B-Scan je ve skutečnosti vertikální řez konstrukcí. Každý řádek představuje jeden vzorek na sloupci, který představuje jednotlivou stopu. Hodnota prvku matice je amplituda napětí pro danou stopu a vzorek.

V poslední době je možné měření provádět na velkých plochách, a to buď opakovaným měřením s konstantní roztečí, nebo pomocí anténních soustav. Takové 3D měření se pak nazývá C - Scan, a umožňuje snadnější interpretaci dat a identifikaci cílů.

Při měření podélných úseků na silnicích je hustota vzorkování obvykle deset stop na metr pro oba anténní systémy, běžné prohlídky pro ing. projekty a sítě do hloubky 0,5 m. Dosah signálu závisí na zkoumaném předmětu, ale obvykle je v rozmezí 10 - 20ns pro air-coupled anténu, 12ns pro konstrukční vrstvy vozovky. S frekvencí 400 až 600MHz ground-coupled systémem se používá doba měření 60 nebo 80ns. Pro antény s nižší frekvencí by měl být časový úsek definován podle hloubky průzkumu. [3]

Při silničních průzkumech dochází k mnoha poruchám, proto je důležité mít při shromažďování dat přesnou polohu GPR dat. Správné polohování lze provést:

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

2.5.1 Metody určení rychlostí GPR signálu

Pro určení rychlosti šíření elektromagnetického vlnění existují dvě skupiny metod, které využívají buď odražené vlny anebo přímé vlny.

Metody využívající odražené vlny využívají energii odraženou od objektu nebo známého rozhraní. V tomto případě je třeba provést více měření pro různé hloubky objektů a rozhraní. Jakmile známe rychlost signálu, je možné vypočítat hloubku objektu nebo rozhraní:

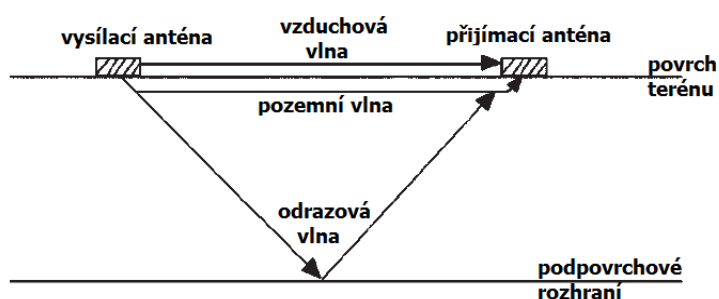
$$h = \frac{v * t}{2}; [m] \quad (5)$$

kde: h - tloušťka vrstvy vozovky (m),
 v - rychlost šíření EM signálu prostředím (m/s),
 Δt - čas průchodu signálu vrstvou – tam a zpět (s).

Mezi metody odražené vlny patří metoda profilování nebo pevná odchylková metoda (FOM - fixed offset method) a také metoda (COM - common offset method).

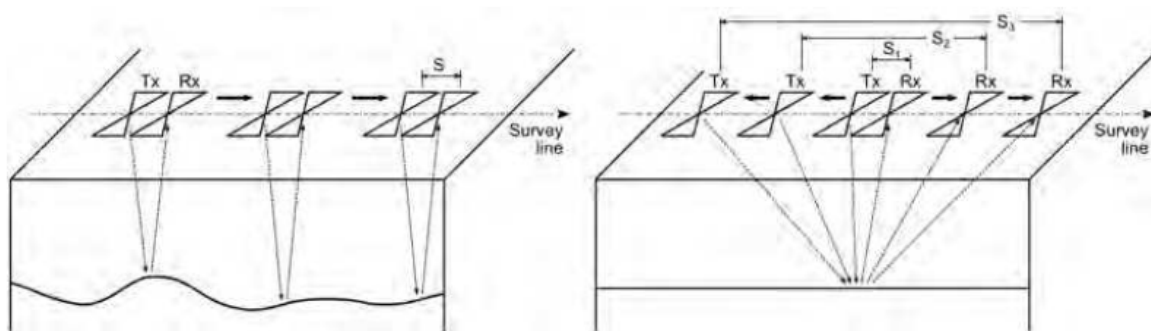
Dalším typem metody odražených vln je metoda koeficientu odrazu – RCM (Reflection Coefficient Method). Tato metoda používá srovnání amplitud odraženého signálu na rozhraní vzduchu / povrchové vrstvy s amplitudou na reflektoru vzdušného rozhraní. Tímto způsobem můžeme zjistit rychlost signálu. Tato metoda je použitelná pouze pro air-coupled antény.

Metody využívající přímé vlny (obrázek 7) pracují s vlnou, která cestuje z vysílače přímo přes materiál do přijímače.



Obr. 7 – Princip metody přímé vlny

Mezi tyto metody patří metoda **CMP** – metoda společného reflexního bodu. Při této metodě je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem proměnná. [1] Vzdalováním přijímače a vysílače z jednoho bodu dostaneme dostatečné množství časových odečtů příchodu odražené vlny k výpočtu rychlosti šíření elektromagnetického vlnění v prostředí. [11] Metoda **WARR** je obdobou této metody. Je založena na principu pevně fixovaného vysílače a přijímací anténa se pohybuje od vysílače. Schéma konfigurace metody CMP je znázorněno na obrázku 8.

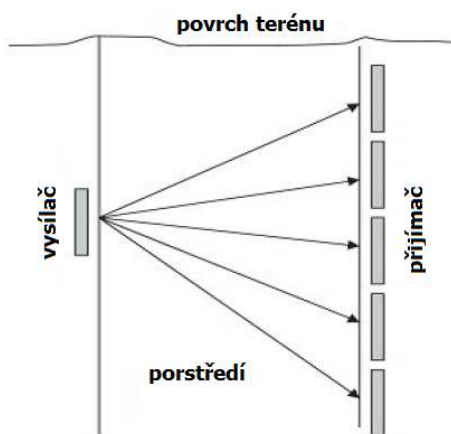


Obr. 8 – Schéma metody CMP

Zdroj: [1]

Ve většině případů jsou metody CMP a WARR používány k určení rychlosti v okolí povrchových vrstev. Všechny tyto metody, vzhledem ke své povaze, jsou známe jako - VOM - variable offset methods.

Další metoda se nazývá Trans illumination (princip je znázorněn na obrázku 9), kde vysílač a přijímač antény jsou umístěny směrem k sobě na opačných stranách zemního tělesa mezi dvěma výkopy. Nevýhodou výše uvedených metod je, že není možné stanovit přesnou cestu signálu GPR.



Obr. 9 - Trans illumination

Dalšími způsoby, jak určit rychlosti EM vlnění, jsou:

- použitím tabulární hodnoty - pro vybrané materiály jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2 - Typické dielektrické hodnoty podloží a základových půd používaných v GPR

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

Zdroj: [11]

- **kalibračním měřením** – kdy se vypočte rychlost šíření elektromagnetického vlnění na základě skutečně zjištěných hloubek (tlouštěk) např. z vývrtnu a času příchodu odraženého impulsu od jednoznačně identifikovaného rozhraní či objektu dle vývrtnu. [11]
- **rychlostní analýzou naměřených dat** – pomocí korelace vypočtených difrakčních hyperbol o známých parametrech pořízených radarovým záznamem. [11]

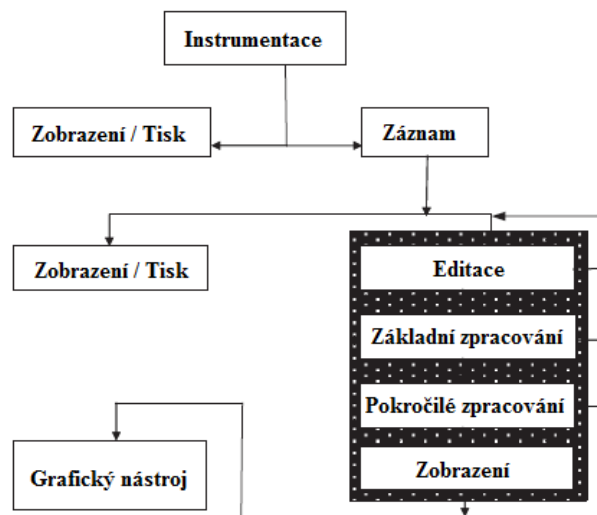
2.6 Zpracování dat

Jol a Bristow (2003) stručně řeší používané postupy pro zpracování dat. Neal (2004) dále popisuje správné zpracování dat. [16]

Zpracování dat GPR lze rozdělit do čtyř fází:

- a) předzpracování, zpracování dat
- b) interpretace
- c) vizualizace
- d) tvorba výstupů

Typický průběh zpracování GPR dat je znázorněn na obrázku 10. Zpracování dat se zaměřuje na oblasti: editace dat, základní zpracování, pokročilé zpracování a interpretace.



Obr. 10 - Přehled GPR zpracování dat

Zdroj: [17]

Podrobný popis postprocessingu je popsán v kapitole 6.

2.7 Interpretace GPR dat

Součástí georadarového zpracování je interpretace GPR dat. Pro správnou interpretaci je nutná dobrá znalost zkoumaného prostředí, cílů výzkumu a okolních vlivů. [2] Profily by měly být interpretovány hned po dokončení měření, z důvodu případného přeměření. Mnoho principů je odvozeno z postupů určených pro reflexní seismiku. Výsledkem georadarového měření na jednotlivých profilech jsou radargramy. Je nutná kontrola terénu, která se provádí po georadarovém měření, a to formou vrtů, výkopů nebo se provede porovnání s jinými geofyzikálními metodami. [17] Nejeftivnější je, když tyto kontroly proběhnou ihned po sběru dat GPR.

2.8 Výstupy GPR dat

Primárním výstupem GPR měření je časový řez, který se přepočítává na hloubkový řez, zde je přímo vyznačena interpretace jednotlivých rozhraní a objektů. Výsledný záznam se zakreslí přímo do nich nebo se přikládá interpretovaný hloubkový řez se zakreslenými interpretovanými jevy. Záznamy lze uložit do textových souborů, které lze pak dále prezentovat ve formě tabulek a v dalších grafických formátech. Konkrétní výsledky dat naměřených v rámci této diplomové práce jsou uvedeny v kapitole 6.

3. VYUŽITÍ GEORADARU PRO DETEKCI KONSTRUKČNÍCH VRSTEV NETUHÝCH VOZOVEK POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

3.1 Úvod

Existuje několik zavedených metod pro posouzení výkonnosti pozemních komunikací a pro odhadnutí požadované tloušťky asfaltové vrstvy. Tyto metody využívají také údaje o tloušťkách konstrukčních vrstev, které byly v minulosti běžně stanoveny z těžby jádrových vývrtů. [18]

Znalost tlouštěk konstrukčních vrstev je důležitá jak při návrhu nových vozovek, tak při jejich rekonstrukci. Využívají se i jako vstup pro jiné nedestruktivní metody, jako je například deflektometr (FWD). [19]

GPR je využíván pro určení konstrukční tloušťky a pro stanovení změn ve struktuře vozovky. Metoda GPR umožňuje stanovit konstrukční tloušťku zaznamenáním časových rozdílů mezi odraženými impulsy z různých vrstev a dielektrických vlastností zkoumané vrstvy. Mnoho operátorů se zabývalo úspěchem GPR při určování konstrukčních tlouštěk vozovky. Podle několika studií je možné odhadnout tloušťky vrstev vozovky přímo z nasbíraných dat GPR. Současné výzkumy se zaměřují na přesnější určení tloušťky vozovky. Byla provedena např. studie na Národní technické univerzitě v Aténách (NTUA - National Technical University of Athens) třemi různými analýzami, kde byla asfaltovým vrstvám přiřazena relativní permitivita materiálů. A to přímým odhadem z dat GPR, za použití údajů z jádrových vývrtů a na základě měření v laboratoři. Z této studie vyplynulo, že kalibrace jádrových vývrtů poskytuje minimální chyby pro stanovení tloušťky asfaltové vrstvy (AC - Asphalt Concrete), v porovnání s referenčními tloušťkami naměřených na pomocných AC jádrových vývrtech. Přesnost tohoto postupu závisí zejména na množství získaných jádrových vývrtů. Tato studie potvrdila vhodnost využít GPR pro stanovení konstrukční tloušťky vozovky z naměřených údajů GPR. Metoda je nejen dostatečná, ale také účinným postupem pro stanovení tloušťky vozovky. [19]

Důležitým faktorem pro kvalitu nově vybudovaných asfaltových vozovek je kromě tloušťky konstrukčních vrstev i jejich hustota. Na základě těchto skutečností byla také

na Národní technické univerzitě v Aténách provedena studie ve spolupráci s Ministerstvem dopravy v Minnesotě. Účelem studie bylo pochopit výhody jádrových vývrtů na celkovou přesnost měření tloušťky vozovky a hustoty. Studie byla provedena na zkušebním poli MnRoad s různými typy konstrukčních vrstev. Testovaná část byla o délce 70 m a skládala se z různých tloušťek asfaltového koberce a šterku. Přesnost zjištění tloušťek se zvyšovala s počtem jádrových vývrtů a také díky přesné lokalizaci pomocí GPS. [19]

Snaha zjistit dostatečné mechanické a geometrické vlastnosti PK, spolu s požadavkem na nepoškození vozovky, vyústilo ve vyvinutí nové metody. Konkrétně se jedná o integrovaný postup pro nedestruktivní měření pomocí GPR a FWD. Pomocí této nově vyvinuté metody byla provedena studie v Itálii na zpevněném i nezpevněném povrchu. Metoda je založena na empirické korelaci mezi tloušťkou vrstev a místními hodnotami modulu pružnosti. [19]

V letech 2006 až 2009 byla provedena studie v Chorvatsku, kde byl proveden průzkum GPR. Následně došlo k porovnání výsledků konvenčními metodami pro stanovení tloušťky a tj. provedením jádrových vývrtů a porovnáním s údaji získaných geodetickými metodami v průběhu výstavby. Měření bylo provedeno na zcela nových i stávajících komunikacích různého stáří (na dálnici A6 Rijeka-Zagreb v říjnu 2006, na dálnici A11 Zagreb-Sisak v září 2009 v délce 790 m, silnice D2 Ludbreg-Koprivnica v listopadu 2006). Při měření došlo k odchylkám, které byly způsobeny chybným určením příčného řezu, špatným staničením během průzkumu anebo v důsledku lidského faktoru. Ze zkušeností získaných měření v Chorvatska vyplývá, že jádrové vývrty dávají "bodová data", která velmi často obsahují pouze asfaltové vrstvy. To je, ale např. pro rekonstrukci vozovky nedostačující. [20]

Při diagnostice vozovek se využívají antény s různými frekvencemi. Např. v Polsku v roce 2008 byla provedena studie Generálním ředitelstvím státních silnic a dálnic. Měřilo se na třech silničních úsecích s vysokou intenzitou dopravy. Studie byla provedena pomocí vysokofrekvenční air-coupled antény (2,2GHz) a údaje byly shromažďovány s vysokou hustotou (50 skenů/m). Pro ověření dat byla také využita anténa s nižší centrální frekvencí. Testy byly provedeny jak na nové asfaltové vozovce, tak i na starší, kde se objevovalo značné poškození vozovky. Výsledky naměřené v terénu byly zároveň ověřeny v laboratoři. Ze studie naměřených dat vyplynulo, že antény s nižší frekvencí umožňují detekovat do větších hloubek, zatímco antény s vyšší frekvence umožní zaznamenat především podpovrchové vrstvy do menší hloubky (cca 0,5 m pro frekvenci 2GHz) [21]

Diagnostika trhlin byla provedena v oblasti L'Aquila (Itálie), kde byla vozovka hodnocena pomocí kvantitativní analýzy GPR (útlum signálu GPR vs. hloubky). Výsledky z poškozených a nepoškozených částí vozovky byly porovnány, za účelem určit změny signálu GPR. Vlivem příčných a rozvětvených trhlin došlo ke ztrátě únosnosti vozovky. Na základě analýzy lze vysledovat příčiny poškození vozovky vs. hloubka řezu a provozní náklady. [22]

Jedním z problémů při testování konstrukcí vozovky je špatná detekce odrazů signálu. Tímto se zabývala studie na úseku Virginia Smart Road, který se nachází v jihozápadní Virginii. Ve studii bylo prokázáno, že v závislosti na tloušťce a počtu vrstev tvořících vozovku se mají využít různé typy antén pro lokalizaci odrazu rozhraní v signálu GPR. V případě, že jsou vrstvy konstrukce vozovky tlusté, je vhodné využít optimální detektor algoritmů pro výpočet prahových hodnot signálu (při rozhodnutí použití známého nebo neznámého signálu, vložené do Gaussova šumu rozptylu). V případě, že je více tenkých vrstev měl by být použit práh detektoru pro vyhledání shodných vzorců signálu. Experimentální výsledky na terénních datech s využitím obou detektorů ukázaly slibné výsledky. Při porovnání výsledků tloušťek vrstev vozovky získaných z GPR a tloušťky vozovky zjištění z jádrových vývrtů, se objevila chyba 2,5 %. Tato chyba může vzrůst, pokud by se v rámci analýzy objevily jen silné signály, a to až na 10,2 %. [23]

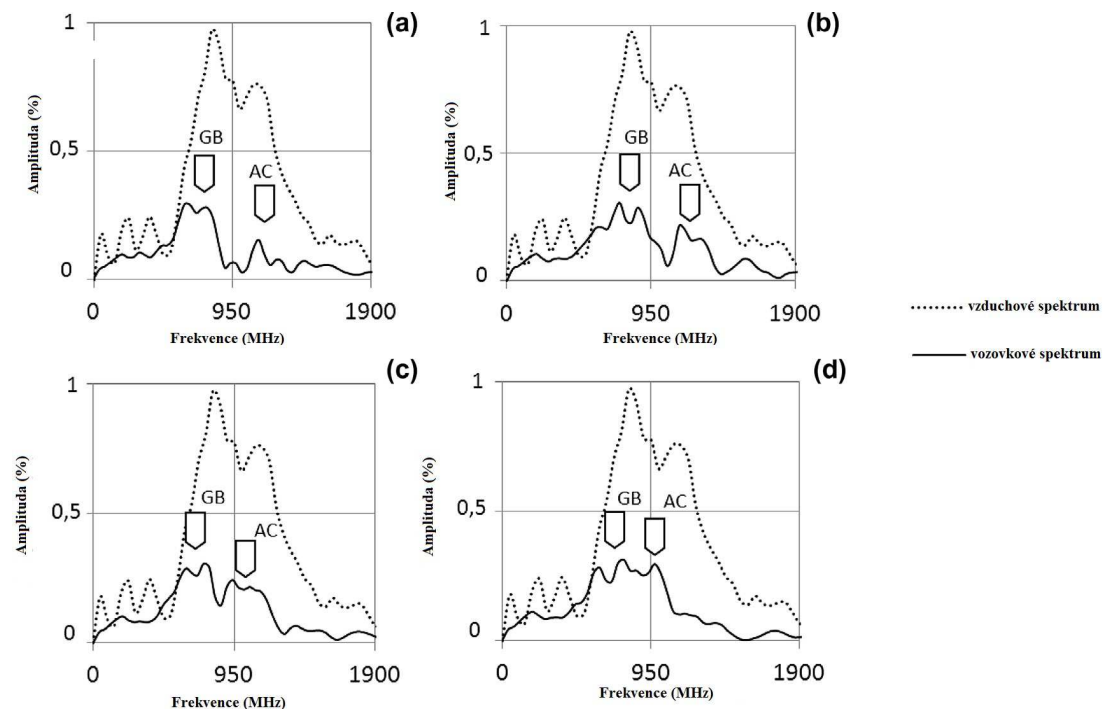
V říjnu 2010 byla provedena studie na poli IL-72 v Hoffman Estates and Barrington v Illinois, která se zabývala problematikou detekování tenkých konstrukčních vrstev o různých tloušťkách. Vypočítané tloušťky byly srovnány s naměřenými daty. Průměrná chyba na všech typech vozovky byla stanovena na 4,2%, což je méně než 1,5 mm. Z této studie vyplynulo, že rozptyl GPR signálu může být použit k přesnému určení konstrukčních tloušťek vozovky. [24]

3.2 Využití GPR v zahraničí

Výzkumný tým ERDC (Army Engineer Research and Development Center) z USA provedl vyhodnocení jedenácti nedestruktivních technologií (včetně osmi GPR zařízení a tří technologií na šíření vln). Studie byla provedena na asfaltových vrstvách (AC - Asphalt Concrete) a na portlandské směsi betonu (PCC - portland cement concrete) s různými tloušťkami vrstev ve Vicksburgu. Ultrazvukové zobrazení je nejlepší na vozovkách s PCC, protože má nízkou odchylku a není nutná kalibrace. Pro AC je nejlepší využít Horn anténu,

kde jsou malé chyby měřených tloušťek (<1,00cm). Výsledky z testovaných přístrojů vedly k závěru, že jsou zapotřebí zvláštní zařízení pro AC a PCC vozovky. Právě v této studii byl GPR stanoven jako dobře fungující zařízení pro asfaltové vozovky, naopak toto zařízení má potíž proniknout v PCC vozovkách, a to z důvodu vyskytující se výztuže. [25]

Frekvenční spektra zaznamenaného signálu jsou při posuzování kvality vozovky spojeny se změnou tloušťky vrstev vozovky. Dochází k útlumu signálu vyšších frekvencí. V případě větších tloušťek vrstev se celková frekvence snižuje. Toto bylo potvrzeno ve studii provedené na úseku o délce 2,5 km v oblasti Barcelony. Studií byl vytvořen algoritmus na základě frekvenčního posunu signálu. Změny maximální amplitudy na povrchu vozovky umožňují zpřesnění identifikace jejich konstrukčních vrstev. [26]



Obr. 11 - Reakce spektra – měřené ve 4 bodech. Frekvence, které odpovídají asfaltové vrstvě (AC) a nestmelené vrstvě (GB - Granular Base) jsou označeny šipkami.

Zdroj: [26]

V Novém Mexiku byla provedena studie na začlenění posunutí vysílače nebo přijímače na části vozovky v Milepost na mezistátní silnici I-40. Průzkum byl proveden anténami s různými frekvencemi. Studie ukazuje, že v případě využití posunutí vysílače a přijímače nebo bez využití, jsou výsledky těchto dvou systému velmi odlišné. Je pozorováno, že AC vrstva s využitím vysokofrekvenční antény (2GHz) a posunem vysílače a přijímače byla **278mm** a bez využití posunu **321mm**. Srovnání výsledků ukazuje rozdíl

tloušťek o 3,7%. Z výsledku studie vyplývá, že přesnost tloušťky se zvyšuje vždy, když dojde k posunu vysílače a přijímače. Z tohoto důvodu se doporučuje použít posun vysílače a přijímače při zjišťování tloušťky vrstvy vozovky. [27]

Projekt Public Private Partnership (PPP) obsahoval průzkum pro posouzení nových a stávajících vozovek. Studie byla provedena na dálnici délky 30km. Cílem bylo analyzovat GPR data za účelem rozpoznat strukturu vozovky a odhadnout tloušťku vozovky po celé délce PK. Chyby tloušťky z GPR byly v rozmezí **0,1% - 8,6%**, tyto hodnoty byly považovány za přijatelné pro stávající vozovku. Z této studie vyplynulo, že GPR mohou být efektivně využívány pro vyšetřování stavu vozovky a pro optimální odhad tloušťky pro zesílení vozovky. [28]

Pro měření asfaltových vrstev nově zpevněných vozovek, pro kontrolu jakosti a zabezpečení jakosti v rámci projektu byl proveden průzkum v roce 2014 na úseku dálnice R2 Žiar nad Hronom na Slovensku v délce 5,2km. Zkoušky GPR byly doplněny o 2D laserový skener a 3D akcelometr. Účelem tohoto průzkumu bylo zjistit tloušťky vrstev při budování nové silnice a následně je porovnat s projektovanými vrstvami v projektové dokumentaci. Sběr dat byl prováděn v obou směrech a ve všech pruzích silničního úseku (4 pruhy, 2 směry). Data byla sbírána pomocí vozidla Road Doctor Survey Vehicle (RDSV), zpracována a interpretována v softwaru RoadDoctor Pro®. V této studii také došlo ke statistickému vyhodnocení, kde výsledky ukázaly, že celková tloušťka vozovky měřené vrstvy (aktuální stav) odpovídá celkové tloušťce v projektu. [34] V případě nových vozovek bylo dokázáno, že GPR je vhodným nástrojem pro silniční mapování, a to zejména u nových vozovek se pohybuje na přijatelné úrovni pro praktické aplikace.[29]

Při měření tloušťky vozovky dochází k nejistotám měření, proto byla snaha vyvinout metodiku pro výpočet nejistoty v GPR systémech, aby bylo možné přesně určit, zda systém GPR je nebo není možné využít pro měření vozovek. Tímto se zabývala studie, která analyzovala účinnost 1GHz antény pro stanovení tloušťky vozovky. Pro zajištění nejvyšší stability signálu GPR při sběru dat byl využit dynamický (jedna nebo dvě antény se pohybují po povrchu podél určitého směru při zachování konstantní vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem) i statický režim. Cílem bylo zajistit nejvyšší stabilitu signálu GPR. Kromě toho, pro hlubší analýzu nejistoty, byly zvažovány různé proměnné, které ovlivňují chápání a výklad signálu GPR. Byly uvažovány tři úseky, kontrolní jádrové vývrty udávaly znalost tloušťky vozovky. V těchto kontrolních bodech byla umožněna

kalibrace rychlosti šíření radarové vlny na různých typech asfaltů. Na obrázku 11 je znázorněn zkušební úsek se čtverci 3x3 m. [30]



Obr. 12 – Zkušební úsek pro vyhodnocení nejistoty 1GHz antény

Zdroj: [30]

V experimentální oblasti byly studovány čtyři různé typy vozovek, kde byly hodnoty nejistoty přibližně v rozmezí od 1,8 do 2,8cm. Neexistuje žádný patrný trend mezi druhem asfaltu a korekčními hodnotami nebo nejistotami. Při hodnocení nejistoty je potřeba vzít v úvahu rozdílné výsledky získané různými operátory, rozdíly v závislosti na vlnové délce a typu vozovky. Výsledky ve studii ukazují, jak je korekce velmi výrazně ovlivněna kalibrační nebo nekalibrační dat GPR. Kalibrované výsledky jsou blíže ke skutečnému údaji. Oprava a rozšířená nejistota byly hodnoceny pro různé typy povrchů, kde není žádná závislost s tloušťkou nebo typem vrstvy. [30]

Četné experimenty profilu GPR byly provedeny na silničním testovacím poli Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), kde byly vyhotoveny různé konstrukce. Vzhledem k tomu, že testovaná místa byla velmi dobře přizpůsobena pro vyšetřování GPR, bylo možné pro měření využít vícenásobnou konfiguraci bistatické ground-coupled antény. Studie testovala sedm různých silničních staveb systémem GSSI a dvěma air-coupled anténami 2GHz. Hodnoty relativní permitivity z počátečního měření ukazují, že elektromagnetické vlastnosti nejsou nebo jsou jen málo závislé na typu kameniva a pojiva, nebo na hustotě. V této studii byla využita metoda CMP, díky které nebylo nutné provádět jádrové vývrty a poté provést testy na několika různých dopravních stavbách. [31]

V jedné ze studií provedených v USA se tloušťky konstrukčních vrstev zjišťovaly jak pro cementobetonové vozovky, tak pro asfaltové vozovky. Byly využity nedestruktivní metody pro srovnávací měření - georadarová metoda (GPR), metoda impact echo, metoda ultrazvukové tomografie a metoda MISW (Multiple Impact Surface Wave). Relativní chyby při stanovení tloušťky výše uvedenými metodami se pohybovaly od **6 % do 83 %**. [32]

Lahouar a kol., uvádí, že při odhadování tloušťky asfaltové vrstvy vozovky pomocí GPR v rozmezí od 280 do 350 mm pro starší vozovky (Interstate 81) je průměrná chyba **6,8%**. Zatímco pro nové vozovky (Virginia inteligentní Road) s asfaltovými vrstvami v tloušťce od 100 do 200 mm byla hlášená chyba **3,8%**. [33]

V jiné studii, Maser uváděl přesnost měření 77,5% u asfaltových vrstev o tloušťce v rozmezí 51 až 500mm. A 71,2 % pro nestmelené podkladní vrstvy o tloušťce v rozmezí od 150 do 330mm. [34]

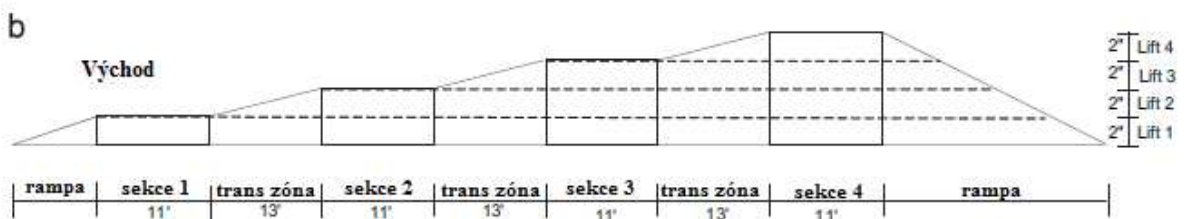
Loizos a Plati označují průměrnou chybu mezi 5% a 10%, v závislosti na odhadu relativní permitivity materiálu. [19]

Al-Qadi a kol., prováděl průzkumy GPR na zkušebním úseku vozovky trati 288 v Richmondu ve Virginii, aby zhodnotili výkon GPR jako nástroj pro zabezpečení jakosti (QA - quality assurance) a kontroly kvality (QC - quality control) pro nově vybudované vozovky [35].

Další studie testovala GPR na nestmelených podkladních vrstvách a na třech různých asfaltových vrstvách. Měření byla prováděna přibližně pět hodin. Po srovnání tloušťky zjištěné z měření GPR s tloušťkami z polních jader, byly odhaleny průměrné chyby 2,9%. Byl učiněn závěr, že metoda GPR je velmi přesná. [36]

Je třeba poznamenat, že ve většině z výše uvedených studií byla použita metoda odrazivosti povrchu s jednou air-coupled anténou pro výpočet relativní permitivity materiálu při měření tloušťky vozovky. K překonání tohoto omezení je vyvíjena rozšířená metoda CMP (XCPM), která využívá dvě air-coupled antény systému GPR, které slouží ke zlepšení přesnosti odhadu relativní permitivity materiálu. Byly sestaveny rovnice a algoritmy pro výpočet relativní permitivity materiálů vozovky. K ověření schopnosti způsobu XCPM pro odhad relativní permitivity a tloušťky vrstev vozovky, byla realizována studie

na speciálně navrženém úseku s různými tloušťkami. Jak je znázorněno na obrázku 13. Bylo zjištěno, že metoda XCMP dává menší chyby tlouštěk, než metoda povrchového odrazu pro tlusté vozovky. [36]



Obr. 13 – Vozovková zkušební sekce pro sběr dat: (a) vzhled po dokončení stavby;
(B) podélný řez.

Zdroj: [36]

Kromě dílčích zlepšení a zavedením algoritmu se mohou vyvíjet i nové systémy. Byl vyvinut nový detekční systém GPR montovaný na vozidlo k detekci tloušťky a kvality asfaltových vozovek. Systém se skládá ze dvou GPR air-coupled antén a čtyř ground-coupled antén, GPS a dvou kamer. Cílem této studie bylo detekovat povrchové vady asfaltové vrstvy a odhadnout tloušťky vrstev vozovky. Čtyři 300MHz ground-coupled antény byly použity pro detekci vad v konstrukci vozovky a podloží vrstvy. GPS byla použita pro lokalizaci dat GPR. Výhodou tohoto měření bylo zahrnutí hlubokých a mělkých struktur vozovek pomocí širokého pásma frekvencí od 300MHz do 2GHz. Pomocí GPS bylo možné hledat a překontrolovat případné vady. Předpokládané chyby povrchové vrstvy byly menší než 3%. Výsledky ukázaly, že takto navržený systém GPR je uspokojivý pro detekci asfaltového koberce. [37]



Obr. 14 – Průzkum GPR na přístrojové části vozovky: a) 2- 2,2GHz ground-coupled anténa, b) ground-coupled antény (400 – 900MHz), c) Bumper jump test

Zdroj: [37]

3.3 Využití GPR v České republice

V České republice stanovení tloušťky vrstev vozovky pomocí systému GPR není zatím hojně využíváno. Bylo provedeno několik studií s využitím GPR pro měření asfaltových vrstev vozovek ke zkoumání příčin závažných deformací, o kterých nebylo známo, co je způsobilo a jaký bude jejich vývoj v čase. V rámci návrhu průzkumných technik, schopných rychle a efektivně odhalit příčiny porušení byla pro průzkum zařazena metoda GPR, která velmi rychle přispěla k jejich objasnění.

Měření a vyhodnocení tlouštěk asfaltových vrstev vozovky bylo provedeno např. ve všech pruzích dálnice D47 v úseku 146,6 – 163,8 km v blízkosti města Ostravy v říjnu 2012. Měřené profily byly provedeny ve středu jízdního pruhu a ve stopách vozidel. Výsledkem měření je tabulka naměřených tlouštěk zprůměrovaných po 100m. Výsledky měření mohou sloužit jako podklad pro výběr míst, u kterých je doporučeno provést odběr jádrových vývrtů. Jedná se zejména o místa se zjištěnou minimální tloušťkou asfaltových vrstev, místa s výskytem nehomogenit ve vrstvách a místa pro provedení

kalibračních vývrtů. Měření bylo vybráno za účelem zvolit vhodné místa pro připravované srovnávací měření georadarů používaných v ČR. [38]

Další průzkum, kde byl využit systém GPR byl proveden na Vysočině v území Simtany na velmi úzké a frekventované silnici. Došlo zde k výskytu poruch zejména v oblasti krajnic (výtluky, lokální propady). Zkoumané oblasti se nachází západně od obce Simtany a jsou součástí silnice I/19. Podle průzkumu byla škoda na PK způsobena v souvislosti s účinky dešťové vody. Zvolená metoda průzkumu byla vhodná pro zjištění složení a stavu horninového prostředí a podkladních vrstev. Byl to jediný možný způsob bez nutnosti provedení opatření na pozemních komunikacích. [39]

Součástí rázových zkoušek únosnosti provedených na vozovkách s asfaltovým krytem na dálnici D1 v km 85,2 – 81,7, bylo i měření georadarem. Z výsledku měření a následného vyhodnocení je možné učinit závěry, že tloušťky jednotlivých vrstev mají značné rozdíly – průměrná tloušťka 250mm, směrodatná odchylka činí 18,7mm. Velké rozdíly tlouštěk asfaltových vrstev byly potvrzeny odebráním jádrových vývrtů, kde je tloušťka v rozmezí 179,6 až 246,7mm. Tloušťky cementové stabilizace odpovídají projektované tloušťce 201mm se směrodatnou odchylkou 22,9mm. Pomocí odrazu radarového signálu od rozhraní asfaltového souvrství a cementové stabilizace bylo zjištěno narušení styku vrstev. Narušení bylo nejvíce v oblasti příčných trhlin, které jsou nevhodně ošetřovány tryskovou metodou. Výsledky měření GPR jednoznačně potvrdily výsledky měření únosnosti a naopak. Bylo prokázáno, že nejslabším prvkem konstrukce vozovky a tím i největším zdrojem poruch je cementová stabilizace. [40]

Dále byl georadar využit pro zjištění stavu povrchu a asfaltového souvrství na silnici I/3 v úseku Mirošovice – Benešov. Hlavním důvodem provedení diagnostiky bylo posouzení stavu asfaltového souvrství v místech odstavných pruhů, aby bylo možné provést úpravu pro vedení dopravy ve třech jízdních pruzích. Silnice I/3 byla testována v km 2,200 – 14,320, v délce 12,120 km. Výsledky GPR měření neprokázaly žádné anomálie v konstrukčním uspořádání v podélném směru. Měření GPR bylo doplněno jádrovými vývrti a pomocnými hloubkovými vrtanými sondami. Na základě výše uvedeného lze říci, že v rámci úprav průjezdného profilu silnice I/3 v úseku km 1,500 – 14,200 není potřeba zasahovat do konstrukce vozovky v jízdních pruzích a zpevněných částí krajnic. [41]

V České republice je systém GPR také využívají správci komunikací. V tabulce 3 je provedena analýza využití GPR napříč všemi kraji v České republice.

Tabulka 3 – Využití GPR správci komunikací v České republice

ORGANIZACE	Délka silnic v kraji (km)	Využití GPR (ano/ne)	Počet km	Rok	Účel využití
Správa a údržba Pardubického kraje	3126,8	ANO	180 km	2013, 2016	diagnostika - návrh oprav
Krajská správa a údržba silnic Středočeského kraje, p.o.	9289,1	NE	-	-	-
Správa a údržba silnic Plzeňského kraje, p.o.	5023,6	NE	-	-	-
Krajská správa a údržba silnic Karlovarského kraje, p.o.	2011,3	NE	-	-	-
Správa a údržba silnic Ústeckého kraje, p.o.	4136,9	NE	-	-	-
Krajská správa silnic Libereckého kraje, p.o.	2417,7	NE	-	-	-
Správa a údržba silnic Královéhradeckého kraje, a.s.	3300	ANO	80 km	2015	diagnostika vozovky
Krajská správa a údržba silnic Vysočiny, p.o.	4981,2	NE	-	-	-
Správa a údržba silnic Jihočeského kraje, p.o.	6098,5	NE	-	-	-
Správa silnic Olomouckého kraje, p.o.	3442,4	ANO	0,5 km	2014	vyhodnocení aktuálního stavu komunikace v porovnání s PD
Správa a údržba silnic Jihomoravského kraje, p.o.	6 252	NE	-	-	-
Správa silnic Moravskoslezského kraje, p.o.	3360,8	NE	-	-	-
Správa a údržba silnic Zlínska, s.r.o.	2118,3	NE	-	-	-
Celkem km v ČR:	55737,5		260 km	-	-

V České Republice je cca 55 738 km silnic II. a III. třídy. Z tabulky výše je vidět, že měření GPR není téměř vůbec využíváno správci komunikací. GPR jako nedestruktivní metoda není využívána samostatně, ale většinou v kombinaci s jinými metodami. Často je současně s měřením GPR zajištěno provedení rázových zatěžovacích zkoušek daného úseku technologií deflektometru (FWD). Účelem těchto měření je většinou zjistit aktuální stav vozovky a na základě získaných dat provést návrh její modernizace.

Nově byly vydány technické podmínky Ministerstva dopravy (TP 207), které se v příloze E zabývají experiment přesnosti zařízení měřících tloušťky vrstev vozovek PK georadarem. [42]

4. POPIS DOSTUPNÉHO SW A HW

4.1 GPR software

Velké množství výrobců georadarových systémů produkuje také svůj vlastní vyhodnocovací software nebo moduly pro vyhodnocení silničního a mostního průzkumu. Existuje mnoho programů speciálně pro silniční diagnostiku. Jedná se především o Road Doctor TM anebo " Haescan Pro A "od Roadscanners (Finsko) nebo GRED HD (UK). [1]

Road Doctor je program zaměřený na vozovky pozemních komunikací, který není určen pouze pro zpracování GPR dat, ale spolu s dalšími vstupními informacemi, je možné ho využít pro stanovení životnosti vozovky a pro návrh plánu údržby vozovek. Program umožňuje zpracovávat výsledky z georadaru s dalšími výstupy metod, jako jsou:

- rázové zařízení FWD
- laserové skenování,
- výsledky měření profilu, sběr poruch, nerovností v podélném a příčném směru,
- odběr vrtných sond,
- video, fotky, mapové podklady. [6]

Velké množství firem, ale také i mnoho univerzit a silničních výzkumných laboratoří vyvinuly své vlastní softwarové balíčky. [1] V tabulce 3 je uveden seznam dalších výrobců s dodávaným vlastním softwarem:

Tab. 4 - Seznam jednotlivých výrobců

Výrobce:	Software:	Moduly:
3D-Radar	GeoScope TM GPR	3dr Examiner
Ingegneria Dei Sistemi	IDS GRED	moduly pro speciální aplikace, včetně 3D
MALÅ GeoScience	Ground Vision 2	RadExplorer, Object Mapper
Sensors & Software Inc.	Ekko View, Ekko-Mapper	EKKO Interp, EKKO Mapper s 3D variantami
GSSI - Geophysical Survey Systems, Inc.	RADAN®, RADAN 6	StructureScan, RoadScan, BridgeScan, 3D
Golden Software, Inc	Voxler	ObliqueImage, Isosurface

Na obrázku 15 je zobrazeno rozhraní softwaru Road Doctor.



Obr. 15 - Zobrazení softwaru Road Doctor – výsledky měření laserového skenování, georadaru a rázového zařízení FWD

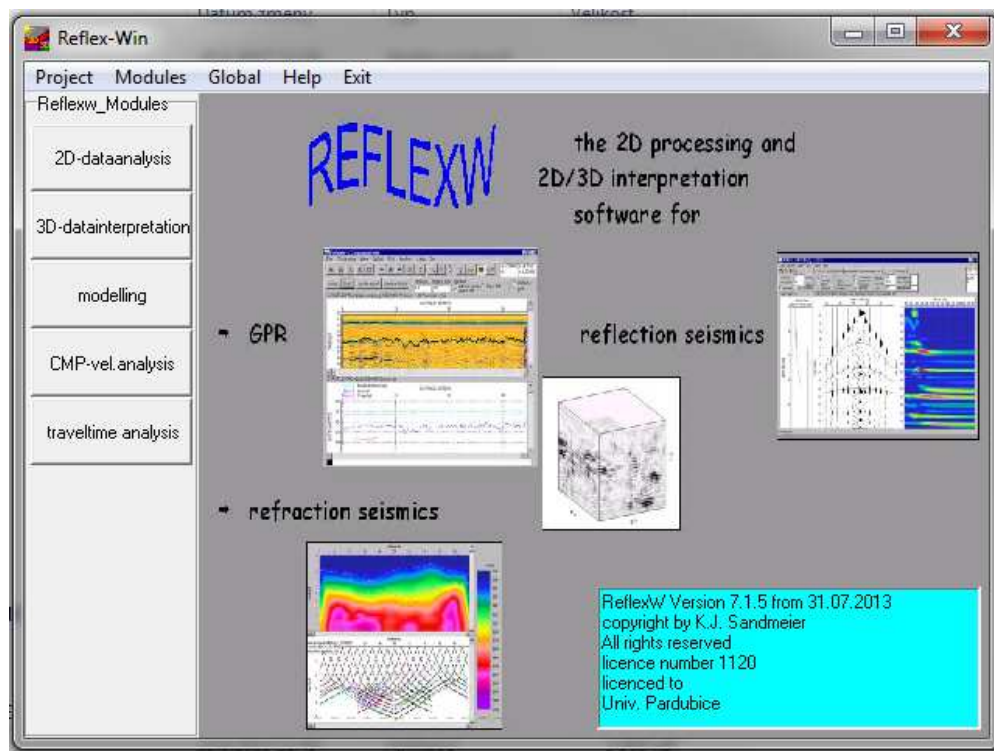
Zdroj: [10]

Další softwary, které nejsou závislé na určitém výrobci a umožňují zpracovat naměřená data, jsou např. "**Reflexw**" od firmy Sandmeier Software (Německo) a **GPR – SLICE**.

GPR – Slice je software umožňující kompletní zobrazení a zpracování signálu všech hlavních výrobců radaru, navíc je kompatibilní s jedním i vícekanálovým zařízením. Jedná se o výrobce: GSSI, Mala Geoscience, Sensors and Software, US Radar, ERA Technology, 3D Radar z Norska, Geoscanners,....

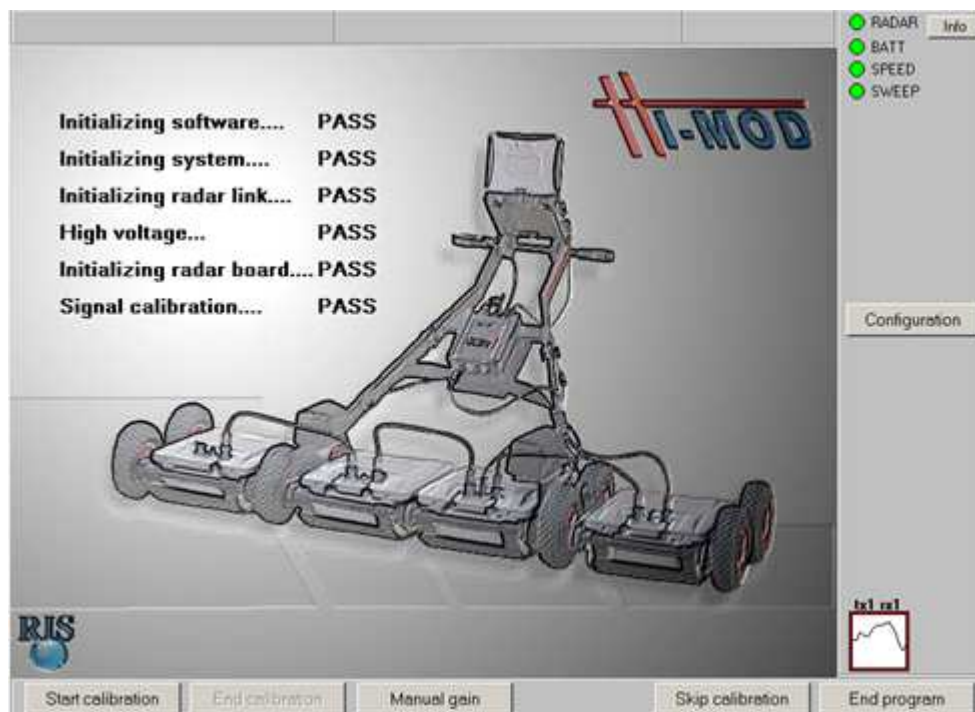
Program **Reflexw** je velmi rozsáhlý program pro zpracování GPR dat. Umožňuje zpracovat data ze seizmických průzkumů a navíc zpracovává data z GPR jádrových vrtů. Součástí programu jsou také různé moduly odpovídající různým aplikacím a další analýze naměřených dat. Kompletní program obsahuje modul pro modelování elektromagnetického pole a modul pro zpracování a vizualizaci 3D seizmických dat a RTF. Do programu Reflexw je možné importovat data ze všech nejznámějších softwarů:

- **EKKO** firmy Sensors & Software
- **SIR** firmy GSSI
- **RAMAC** firmy MALA Geoscience
- **RIS** firmy IDS
- A další (UTSI, OYO).



Obr. 16 – Program na zpracování dat Reflexw od firmy Sandmeier Software

Pro svoji práci jsem použila právě software Reflexw. Pro sběr dat, tvorbu výstupů a pro zpracování dat jsme použili software K2 FAST WAVE, zobrazený na obrázku 16.



Obr. 17 – Program K2 FW pro sběr a zpracování dat

4.2 Hardware GPR

Součásti sestavy GPR byly popsány v kapitole 2.

V tabulce 5 jsou uvedeny využívané hardwary.

Tab. 5 – Výpis hardware

Hardware:	Počet antén:	Rozsah frekvence:
Gepard GPR	1	60 - 300MHz
RIS MF Hi-Mod	2	200/600MHz, 400/900MHz
GSSI SIR-20	2	400MHz, 1GHz
EASY LOCATOR	1	500MHz
LOZA - ROTEG	1	25 - 500MHz
RoadScan 30	1,2 nebo až 4	1GHz, 2GHz
GeoScope™ GPR	1	100MHz - 3GHz

V mé práci byl využit **RIS Hi-Pave**, jedná se o GEORADAR určený pro rychlé měření na pozemních komunikacích. Systém je schopný pracovat s několika anténami současně, které umožní:

- měření tloušťek konstrukčních vrstev
- posouzení podloží PK
- detekci dutin, pórů
- detekci podpovrchových vod
- posouzení stavu letištní ranveje

Výhodou RIS Hi-Pave je zjišťování vstupních informací pro návrh rekonstrukce PK. Umožňuje také pravidelnou kontrolu stavu vozovky. Vzhledem k tomu, že využívá air-coupled antény umožňuje minimalizovat čas pro zpracování.

Hi-Pave využívá Horn antény, které mohou být použity bez kontaktu s povrchem. Je možné dosáhnout až rychlosti 260km/h, s jedinou konfigurací antény se vzorkováním dat 10cm nebo 130km/h s duální konfigurací antény a vzorkování dat 10cm. Hi - Pave může pracovat až s osmi anténami v souvislé řadě za použití stejné řídicí jednotky. Zahrnuje i antény s nižší frekvencí (typická 600MHz nebo duální frekvence 400 / 900MHz).

- Zdroj napětí: 12 V +/- 10 %
- Odolnost proti prachu a vodě (IP 64)
- Průměrná spotřeba: < 10 W

4.2.1 Použité antény společnosti IDS

Technické specifikace antén, které byly využity pro měření v této diplomové práci:

anténa HN-2000

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

anténa TR DUAL-F 400/900

- Typ antény: stíněná dipólová
- Počet kanálů: 2
- sériové zapojení *plug and play*
- Rozměry (LxWxH): 43x37x20 cm
- Váha: 6 kg
- Provozní vlhkost: < 90 %
- Odolnost proti vodě (IP 65)
- Provozní teplota: -40 °C až 50 °C

5. POUŽITÉ ALGORITMY A ZPRACOVÁNÍ DAT

Předzpracování dat, interpretace a vizualizační softwary pro pozemní komunikace jsou používány převážně pro detekci rozhraní jednotlivých konstrukčních vrstev. Navzdory skutečností, že počítačové procesory jsou stále účinnější a GPR softwarové balíky jsou stále více uživatelsky přívětivé, zpracování a interpretace dat z pozemních komunikací, železnic a letišť je stále časově nejnáročnější. [2]

Níže jsou popsány kroky pro zpracování dat. Postup zpracování může probíhat i v jiném pořadí popř. s vícenásobným opakováním jednotlivých kroků nebo s jejich různým nastavením. Na základě svých zkušeností byla vstupní data filtrována následujícím způsobem:

I. Dewow

Počátečním základním krokem zpracování je obvykle časová filtrace za účelem odstranění nízkofrekvenčního šumu a šumu ve vrcholech amplitud. Filtr působí na každou stopu nezávisle na sobě. Aktivací této možnosti dojde k výpočtu střední hodnoty každé stopy.

II. Complex trace – analysis

Pro výpočet okamžitých atributů jako je obálka, okamžitá frekvence nebo okamžitá fáze se využívá Hilbertova transformace. Okamžitá amplituda nebo obálka jsou měřítkem pro sílu odrazu. Obálka usnadňuje stanovení prvního signálu.

III. Correct max. phase

Používá se pro air-coupled antény, za účelem kompenzovat odraz antény tak, aby byl od povrchu horizontální.

IV. Move starttime

Používá se pro air-coupled antény, někdy také pro ground-coupled. Pozice odrazu od povrchu se nastaví na nulový čas.

Pokud se mění permitivita vrstvy z nižší na vyšší, volíme kladnou amplitudu – na vrcholu (air/ground rozhraní). V případě, že je to naopak, z vyšší permitivity se přechází na nižší, volíme zápornou amplitudu. Pokud nevíme hodnotu permitivity, volíme rozhraní mezi kladnou a zápornou amplitudou.

V. Background removal

Slouží k odstranění šumu, vytvářeného takzvanými sekundárními povrchovými odrazy „zvoněním v anténě“. Také pro odstranění šumu v pozadí a tedy zvýšení poměru mezi signálem a šumem.

Vytvoří přes radargram pásmový efekt, který je souběžný s vrchovou vlnou. Odstranění tohoto šumu se provede pomocí co nejužšího okénka. Zároveň nesmí odstraňovat z profilu skutečné lineární jevy. Tento krok zpracování není vhodné použít pro detekci vrstev, přesto je někdy využíván.

VI. Gain

Umožňuje násobení datových bodů dané funkce $g(y)$ nebo $g(t)$ v určeném pořadí. Funkce $g(t)$ se skládá z lineární části, která je bezrozměrná a z exponenciální části, která se zadává v dB / m. Zadává se počáteční čas (hodnota 1) a max. zisk. Zesílení dat může být provedeno automaticky nebo manuálně, pomocí lomené křivky. Nastaví se počet lomových bodů, které se na křivce automaticky rovnoměrně rozmístí, a každému bodu se přidělí příslušná hodnota zesílení. Obvykle se používá 3 až 5 bodů. Pro asfalt se využívá funkce 15dB/m.

VII. Bandpassbutterworth

Využívá pásmovou filtraci. Dochází k nastavení dvou frekvenčních parametrů - první bod určuje low-cut (spodní hranice) frekvence, druhý high cut (horní hranice) frekvence. Frekvenční spektrum pod dolním řezem a nad horním řezem frekvence je nastaveno na 0. K potlačení hluku může dojít s pásmovým filtrem, pokud se liší od obsahu signálu frekvence.

VIII. Running average

Klouzavý průměr je používán pro lepší zobrazení horizontálního rozhraní. Použitím klouzavého průměru ve 2D filtru dojde k potlačení stop závislých na hluku (místní odrazy). Cílem je zdůraznit horizontálně soudržnou energii – pro lepší zobrazení vrstev.

IX. Subtracting average

Potlačuje horizontálně soudržné energie. Cílem je zdůraznit signály, které jsou po stranách - pro lepší zobrazení malých odrazů (ohyb hyperboly).

Velké objemy dat, musí být systematicky udržovány tak, aby bylo možné provést další zpracování. V mnoha případech se základní informace o sběru dat používají ve fázi zpracování. Střední frekvence, časový a prostorový interval vzorkování jsou velmi důležitým faktorem při zpracování. [3]

Zpracování dat je téma velice rozsáhlé. Většina GPR dat sebraných například v sedimentárním prostředí vyžadují před interpretací jen minimum zpracování. Před vlastním měřením je potřeba získat co nejvíce informací - co se měří, kde a jaké okolní vlivy mohou být,... *Čím více jich totiž je, tím je zpracování dat jednodušší.*

6. VLASTNÍ MĚŘENÍ POMOCÍ GPR SESTAVY KDS A TVORBA VÝSTUPŮ

Veškerá data získána na testovacím úseku a v in situ byla získána za použití dvou různých antén - HR 2000 Air launched Horn anténou s frekvencí 2GHz a ground-coupled anténou 400 a 900MHz. Pro laboratorní měření na jednotlivých materiálech byla využita pouze anténa s frekvencí 2GHz. Zbývajících částmi soustavy je řídicí jednotka DAD Fast Wave Control Unit a notebook.



Obr. 19 – Zkušební vozík s air-coupled anténou s frekvencí 2GHz

6.1 Laboratorní měření

Měření bylo provedeno na materiálech v IBC kontejnerech. Níže jsou zpracovaná data ze šesti vzorků, které byly zjištěné pomocí Horn antény s frekvencí 2GHz. Anténa byla nastavena 30 cm nad povrchem zkoušeného materiálu.

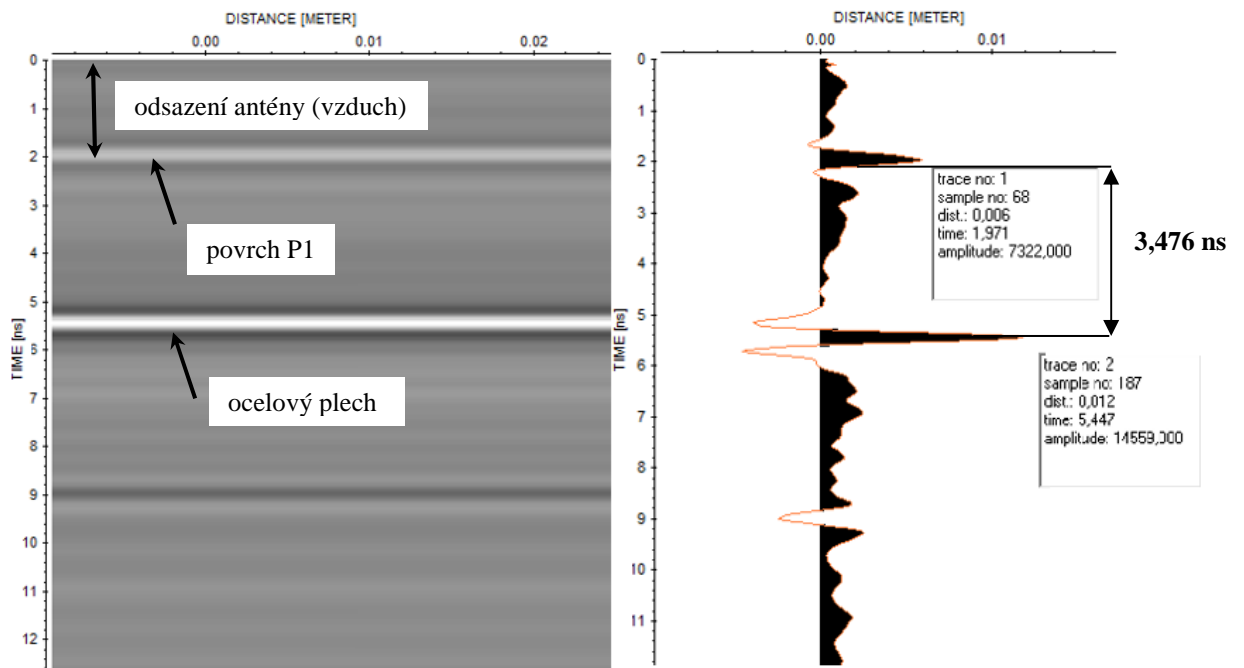
Povrch materiálů je v radargramu zobrazován ze shora jako první významný vrchol s maximální kladnou amplitudou. Z naměřených dat byly postupně odečteny časy průchodu EM signálu vrcholů s amplitudou, které jsou zobrazeny na obr. 20 - 25 vpravo. Cílem laboratorního testování je zjistit rychlost šíření a permitivitu jednotlivých materiálů.

V tabulce 6 jsou uvedeny vlastnosti zkoušených materiálů.

Tab. 6 – Vlastnosti zkoušených materiálů

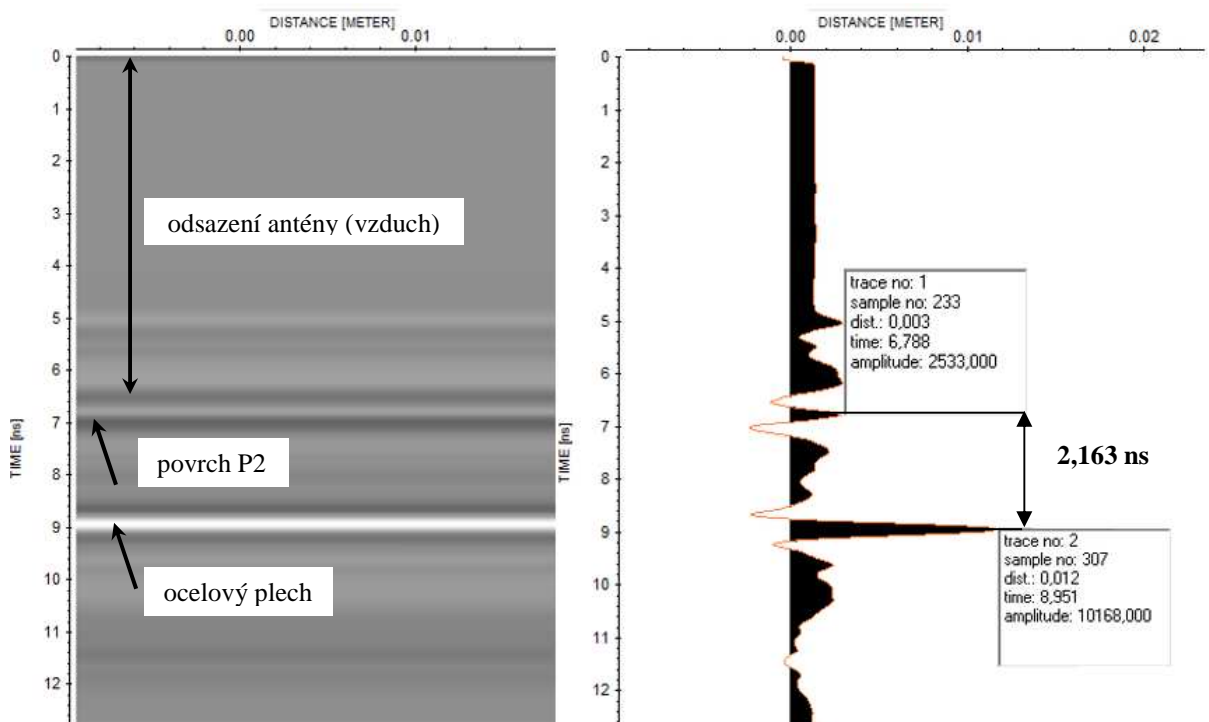
Materiál	frakce [mm]	vlhkost [%]
Písek 1 (P1)	x	0%
Písek 2 (P2)	x	9%
Písek 3 (P3)	x	4%
Štěrk 1 (Š1)	4 - 8mm	x
Štěrk 2 (Š2)	8 - 16mm	x
Štěrk 3 (Š3)	31,5 - 63mm	x

6.1.1 Vzorek P1



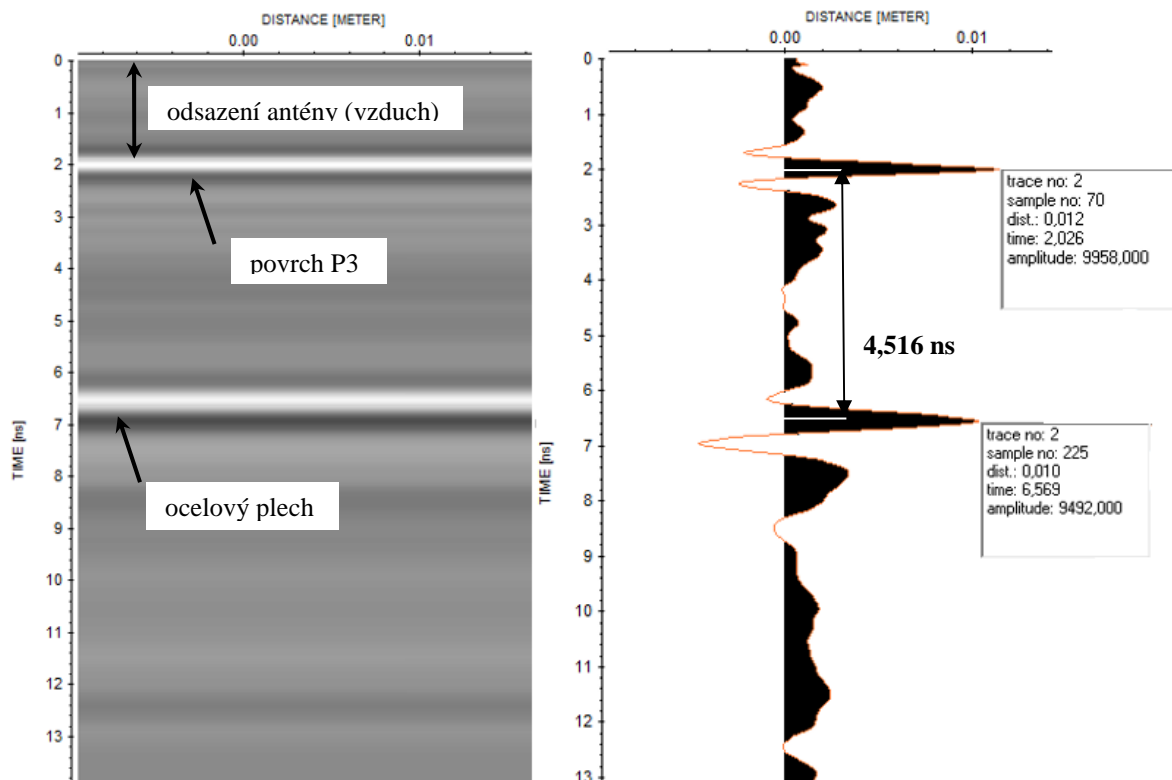
Obr. 20 - Vzorek P1 - data zpracována pomocí 2GHz antény

6.1.2 Vzorek P2



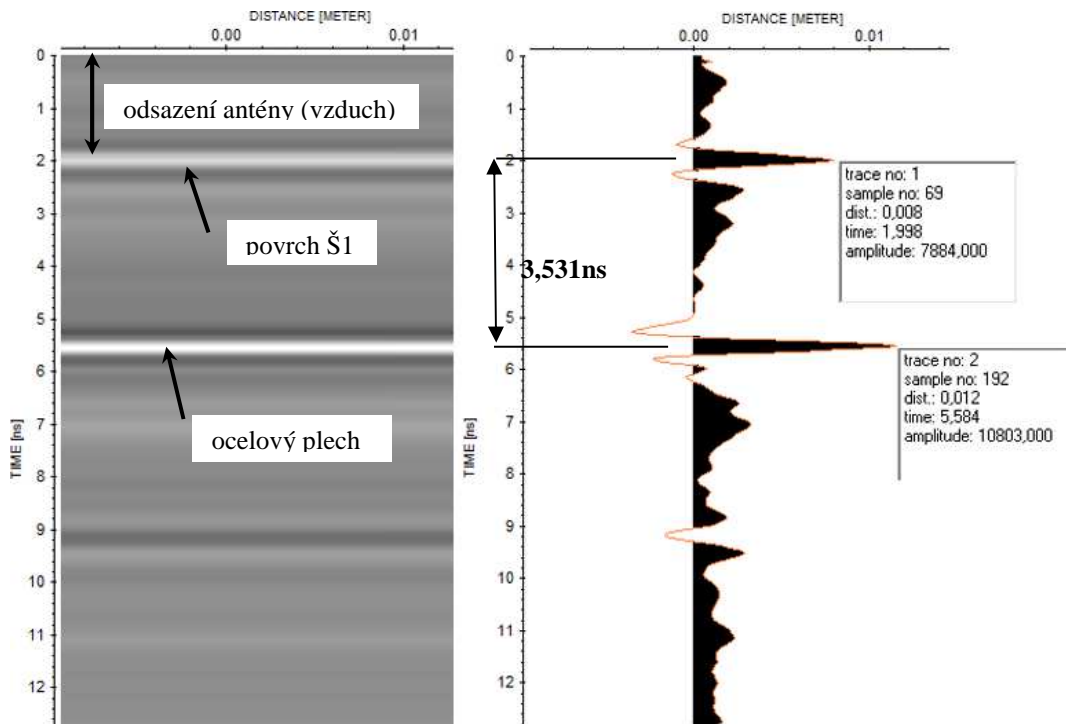
Obr. 21 - Vzorek P2 - data zpracována pomocí 2GHz antény

6.1.3 Vzorek P3



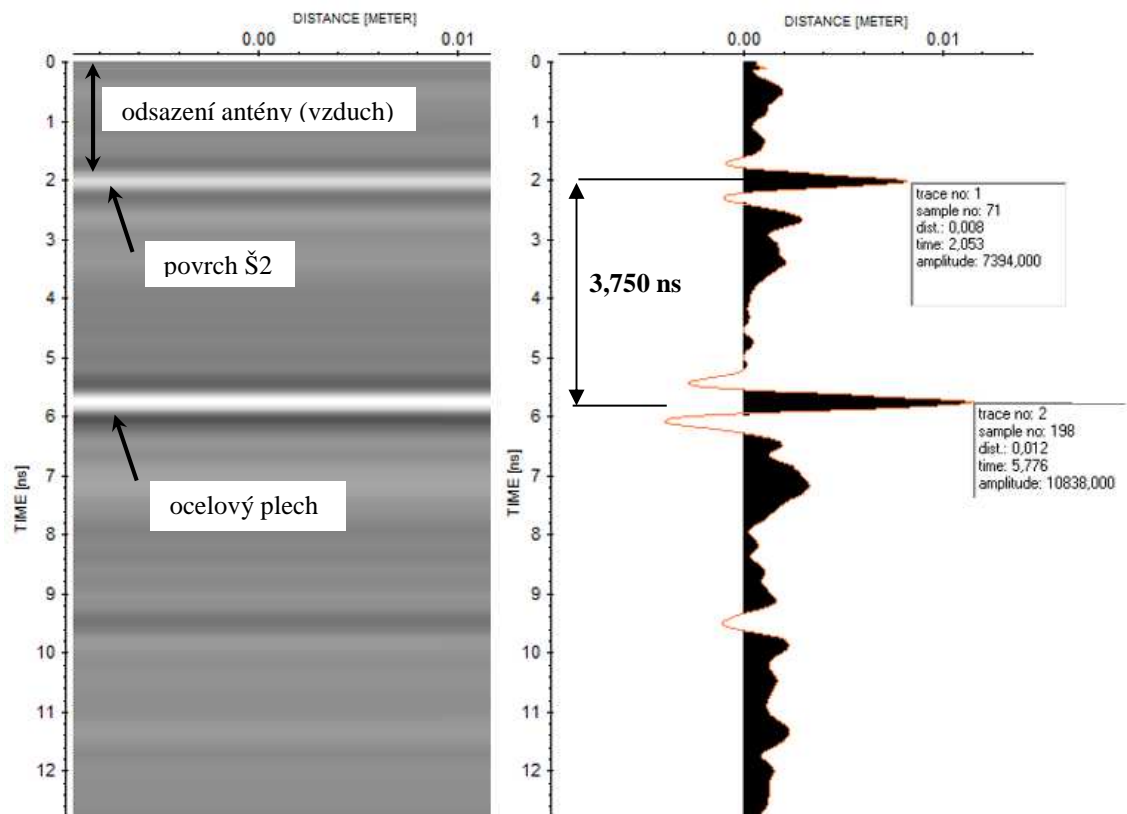
Obr. 22 - Vzorek P3 - data zpracována pomocí 2GHz antény

6.1.4 Vzorek Š1



Obr. 23 - Vzorek Š1 - data zpracována pomocí 2GHz antény

6.1.5 Vzorek Š2

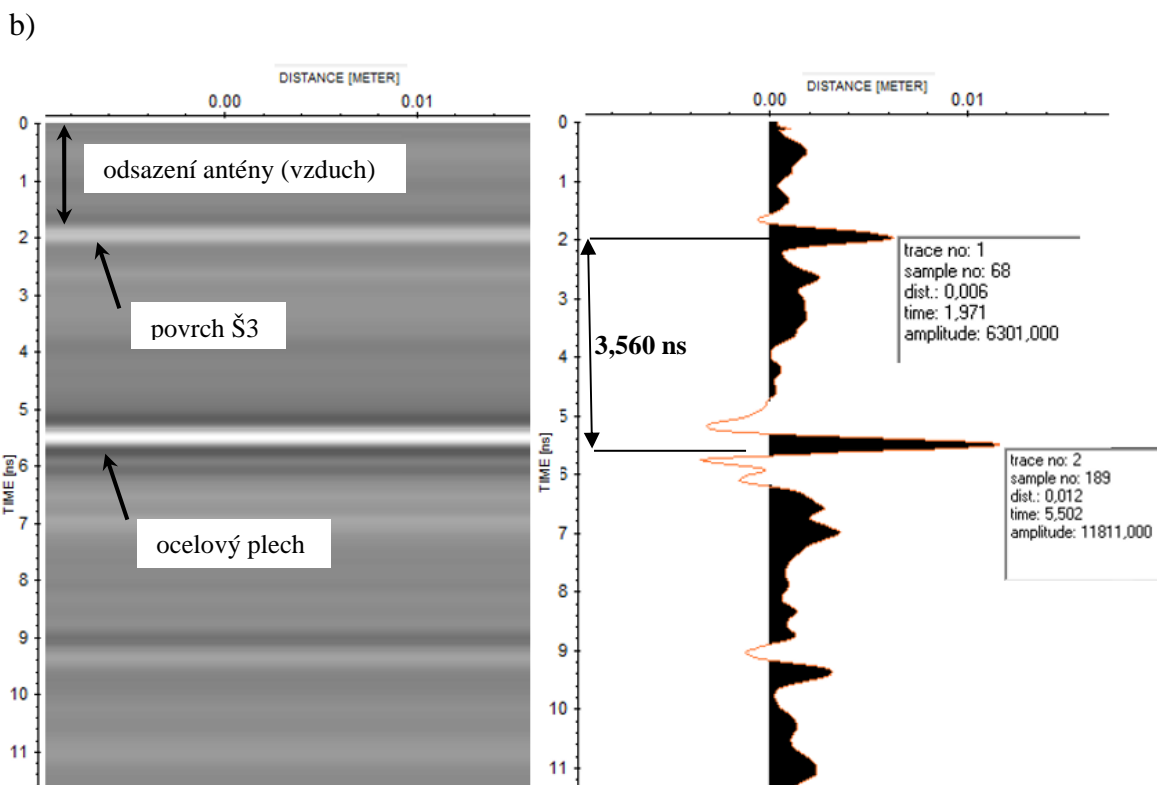


Obr. 24 - Vzorek Š2 - data zpracována pomocí 2GHz antény

6.1.6 Vzorek Š3

a)





Obr. 25 - Vzorek Š3 - a) Horn antény umístěná 30cm nad povrchem zkušebního vzorku,
b) data zpracována pomocí 2GHz antény

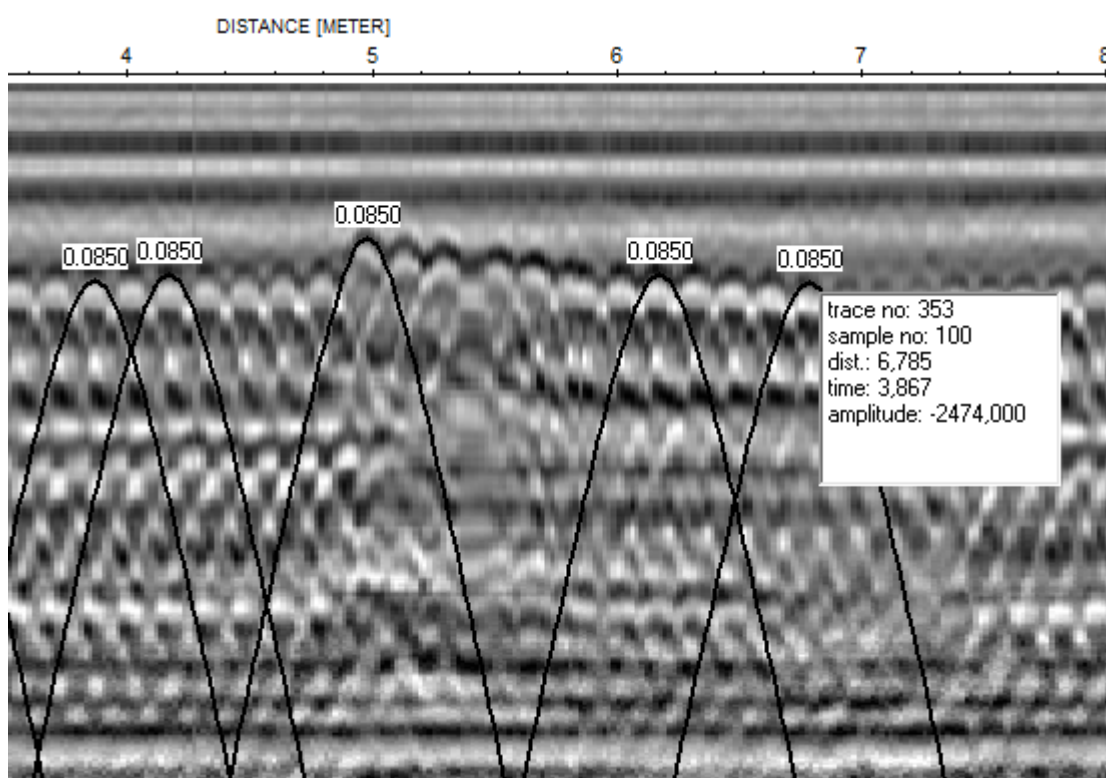
V tabulce 7 je vypočtena relativní permitivita a rychlost šíření jednotlivých materiálů. Hodnoty jsou srovnány s hodnotami z normy ASTM D4748-10 (Americká norma ASTM D4748-10: Standard Test Method for Determining the Thickness of Bound Pavement Layers Using Short-Pulse Radar).

Tab. 7 – Relativní permitivita a rychlost šíření jednotlivých vzorků

vzorek	frekvence antény [GHz]	čas průchodu EM signálu [ns]	rychlost šíření v [m/ns]	amplituda povrchu	amplituda ocelového plechu	relativní permitivita	hodnoty z normy ASTM D4748-10	
							relativní permitivita	čas průchodu EM signálu
P1	2	3,476	0,172	7322	14559	3,03	4 - 6	0,12 – 0,15
P2	2	2,163	0,277	2533	10168	1,74	4 - 6	0,12 – 0,15
P3	2	4,516	0,132	9958	9492	5,15	4 - 6	0,12 – 0,15
Š1	2	3,531	0,169	7884	10803	3,14	4 - 8	0,10 – 0,15
Š2	2	3,750	0,160	7394	10838	3,51	4 - 8	0,10 – 0,15
Š3	2	3,560	0,169	6301	11815	3,14	4 - 8	0,10 – 0,15

6.2 Betonová podlaha

Další částí vlastního měření v laboratoři byl úsek betonové podlahy. Tento úsek byl zvolen za účelem ověřit další metodu pro zjišťování rychlosti šíření, a to pomocí funkce hyperbola, která se dá nastavit v programu Reflexw. Hodnoty betonu pro rychlost šíření, jsou v literatuře uvedeny v rozmezí od 0,06 – 0,15 m/ns. Na rozdíl mezi těmito hodnotami má vliv, zda se jedná o velmi suchý, suchý, nasáklý nebo vlhký beton. Hyperboly se dají využít pouze pro materiál obsahující výztuž. Pro stanovení rychlosti šíření v asfaltu není tato metoda vhodná, a to z důvodu, že asfalt neobsahuje výztuž.



Obr. 26 - Rychlosti šíření zjištěná pomocí položky hyperbola v programu Reflexw

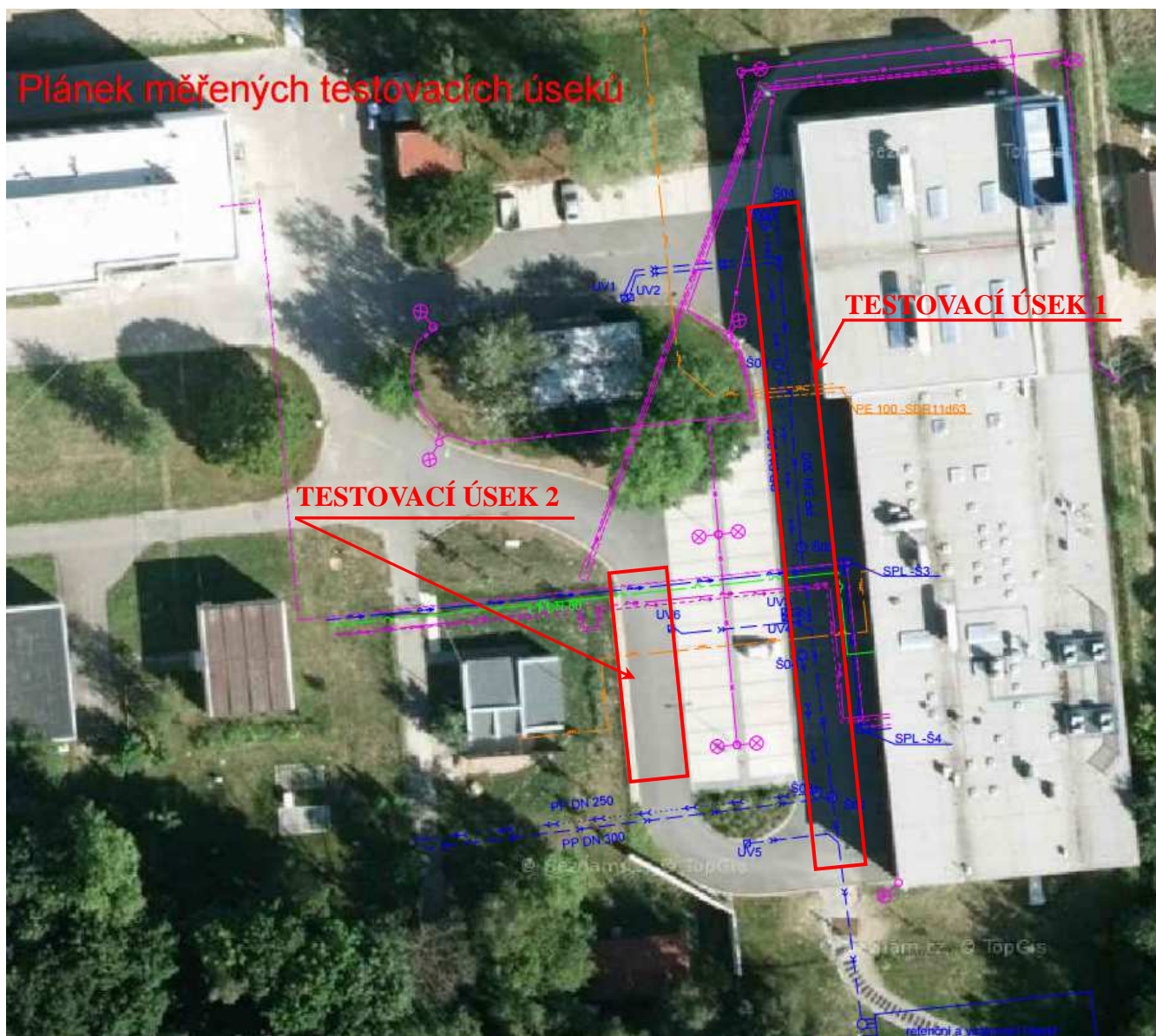
Rychlost šíření pro betonovou podlahu byla stanovena na hodnotu 0,085m/ns, což odpovídá tabulkovým hodnotám uváděné v literatuře. Relativní permitivita byla stanovena na hodnotu 12,4.

6.3 TESTOVACÍ ÚSEK

Po zpracování dat v laboratorní části, bylo provedeno měření na dvou testovacích úsecích před budovou VVCD v Doubravících. Měření bylo zajištěno dvěma anténami

air-coupled s frekvencí 2GHz a ground-coupled s frekvencí 400/900MHz. Na základě získaných zkušeností v kapitole 5.1., bylo možné naměřená data zpracovat.

Na obrázku 27 je znázorněn plánec s testovacími úseky.



Obr. 27 – Situace měřených testovacích úseků

6.3.1 Testovací úsek 1

Stanovení rychlosti šíření a relativní permitivity bylo také provedeno na testovacím úseku 1, a to za použití další metody - koeficient odrazu (RCM) (více v kapitole 2.5.1.). Metoda RCM stanovila rychlost šíření na 0,1 m/ns. Tato hodnota byla dále využita pro zjištění jednotlivých konstrukčních vrstev na tomto úseku v programu Reflexw.

V tabulce 8 jsou uvedeny amplitudy betonu a ocelového plechu.

Tab. 8 – Srovnání amplitud odraženého signálu

Trace:	Amplituda A1	Trace:	Amplituda AM
38	18690	7	8589
39	18644	8	8583
40	18506	9	8709
41	18371	10	8655
42	18281	11	8484
43	18204	12	8413
44	18187	13	8305
45	18058	14	8511
46	18135	15	8890
47	18414	16	9351
Průměr stop:	18349	Průměr stop:	8649

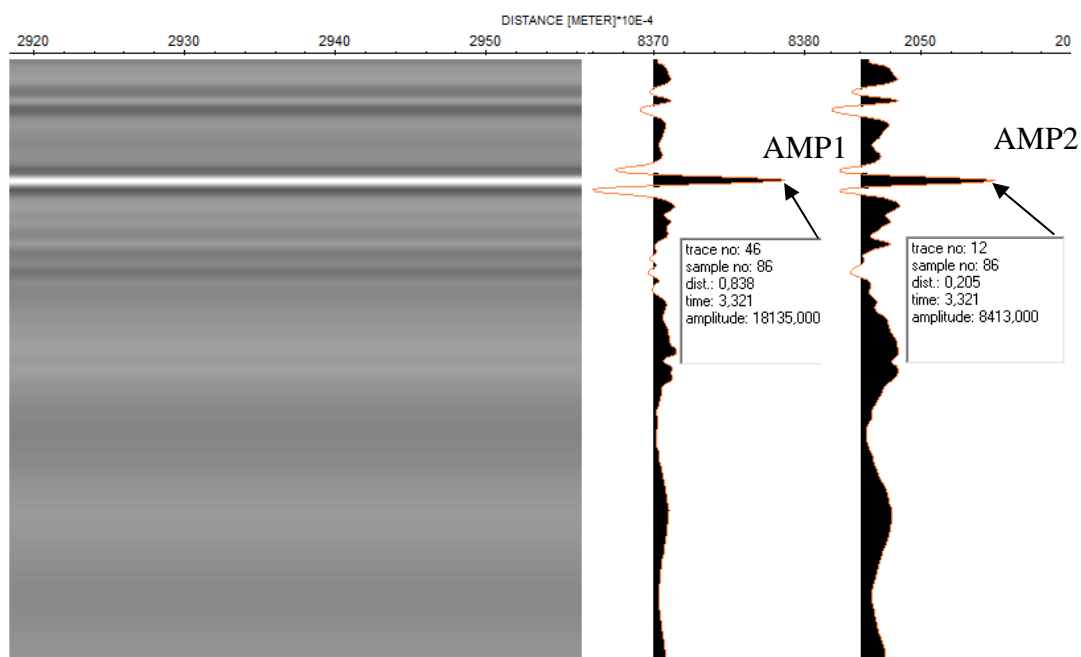
$$\epsilon_a = \left[\frac{1 + A_1 / A_m}{1 - A_1 / A_m} \right]^2 \quad (6)$$

kde: ϵ_a - relativní permitivita

A_1 – amplituda povrchu

A_m – amplituda plechu

Z výše uvedené rovnice byla stanovena relativní permitivita asfaltu na 7,7, což odpovídá tabulkové hodnotě v literatuře, která je v rozmezí od 4 – 10.



Obr. 28 – Radargram z měření rychlosti šíření EM signálu na betonové podlaze anténou 2GHz

Pro zjištění konstrukčních vrstev byla použita aplikace funkcí **correct max. phase** a **move starttime** (popsané v kapitole 5).

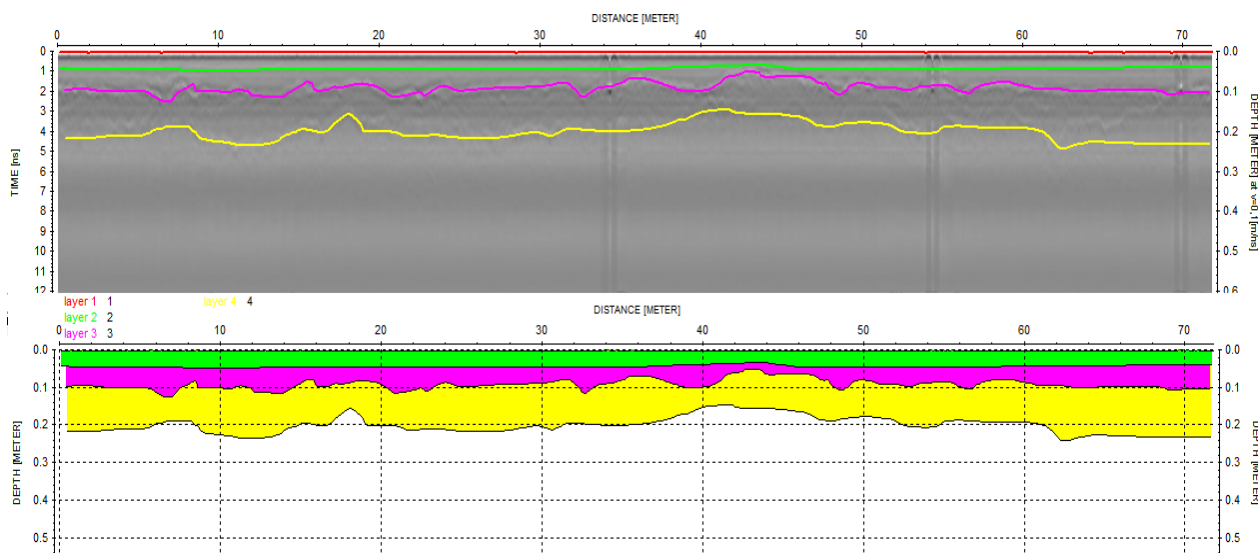
V tabulce 8 jsou uvedeny konstrukční vrstvy testovacího úseku před VVCD.

Tab. 9 – Konstrukce testovacího úseku

ACO 11+	40mm
ACP 16+	60mm
SC C _{8/10}	130mm
ŠD	200mm
KONSTRUKCE CELKEM	450mm

Došlo k identifikaci a k vyhodnocení podpovrchových struktur, znázorněných na obrázku 28. Rozhraní stmelěných a nestmelěných vrstev je naprosto zřetelné. Vysokou frekvencí antény je možné rozlišit vrstvu ACO a ACP v celkové tloušťce 100mm. I při použití takto vysoké je možné rozeznat i rozhraní vrstev SC a ŠD. Ale vzhledem k tomu, že anténa s frekvencí 2GHz dosahuje pouze do hloubky cca 0,5 m na radargramu nebylo možné rozlišit rozhraní zemní pláně.

Jelikož konstrukční tloušťka vrstev je celkově 450 mm, je potřeba pro detekování předmětů ve větší hloubce využít anténu s nižší frekvencí.



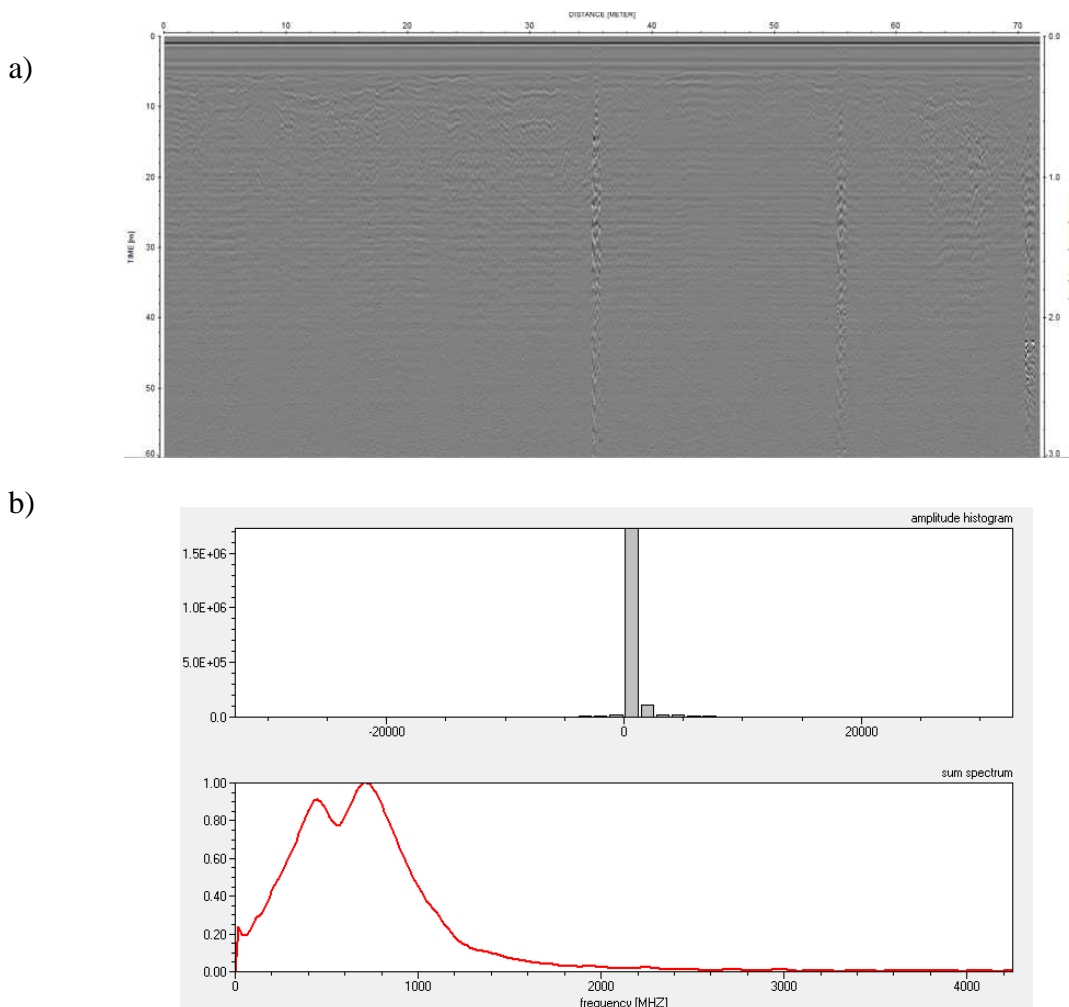
Obr. 29 – Radagram s vyznačenými vrstvami

Na základě zkušeností získaných v této testovací části byla na testovacím úseku 2 a na vybraném úseku pozemní komunikace využita také anténa s frekvencí 400/900MHz.

6.3.2 Testovací úsek 2

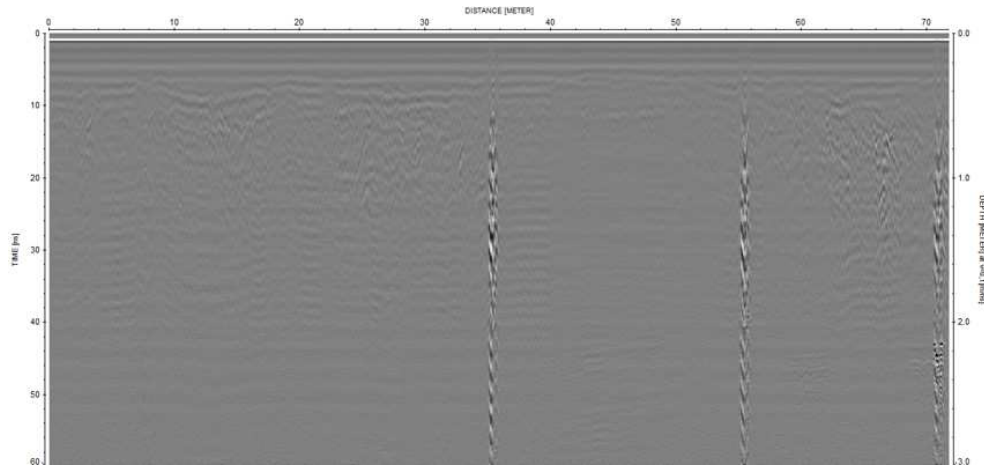
Další část měření byla provedena na úseku dlouhém cca 72 m. Kde na radargramu uvedeném na obrázku 33 a 34 bylo detekováno vedení pod povrchem a několik revizních kanalizačních šachet. Výsledky měření na obrázku 30 – 32 jsou publikovány za účelem srovnat jednotlivé výsledky z různých antén. Data těchto výsledků nebyla zpracována. Spolu s radargramy jsou k jednotlivým frekvencím znázorněny frekvenční spektra a histogramy.

Ze zkušeností získaných v předchozím měření, lze říci, že výsledná data získaná 2GHz anténou nejlépe vystihují podpovrchovou strukturu testovacího úseku. Antény s frekvencí 2GHz detekují vrstvy do hloubky cca 0,5m a antény s frekvencí 400/900MHz jdou do hloubky několika metrů, ale u povrchu nemají takové rozlišení.

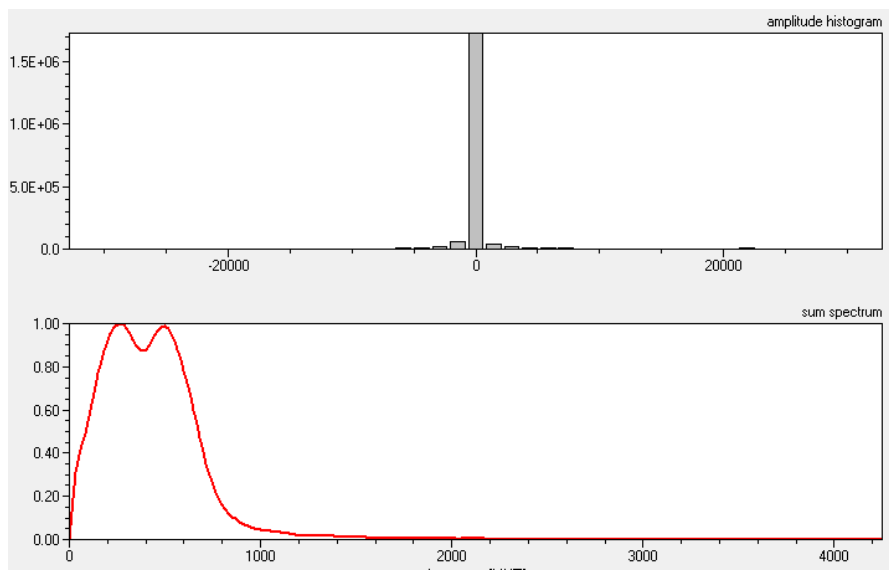


Obr. 30 - Data zpracována 900MHz anténou: a) radargram, b) Histogram a frekvenční spektrum

a)

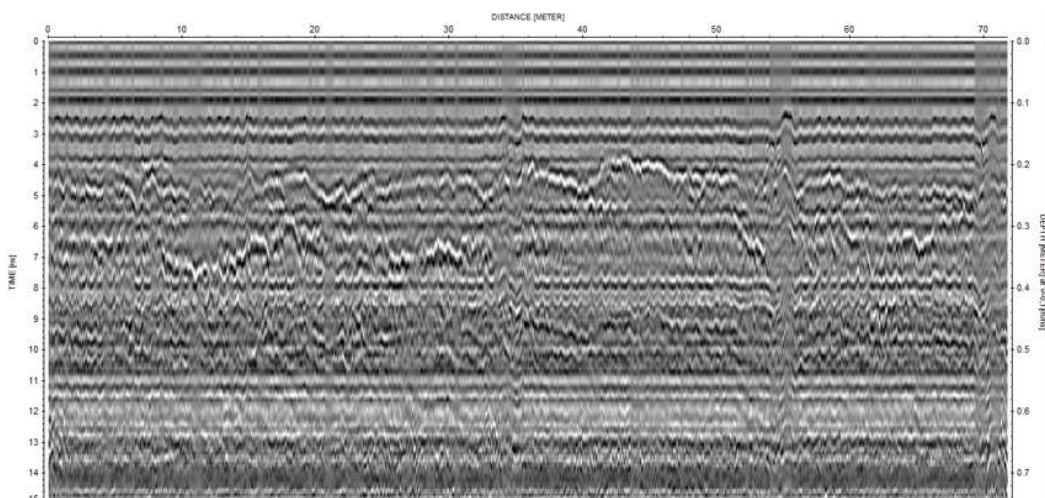


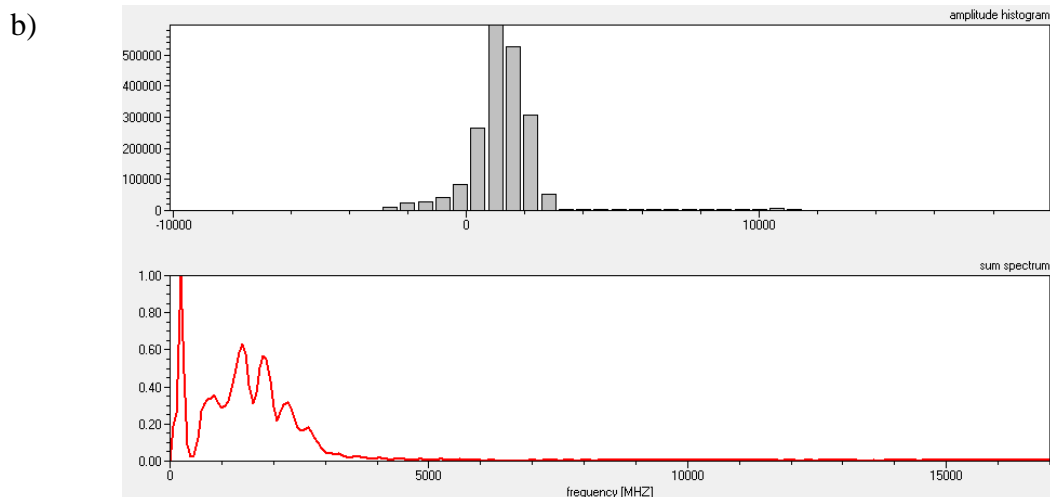
b)



Obr. 31 - Data zpracována 400MHz anténou a) radargram, b) Histogram a frekvenční spektrum

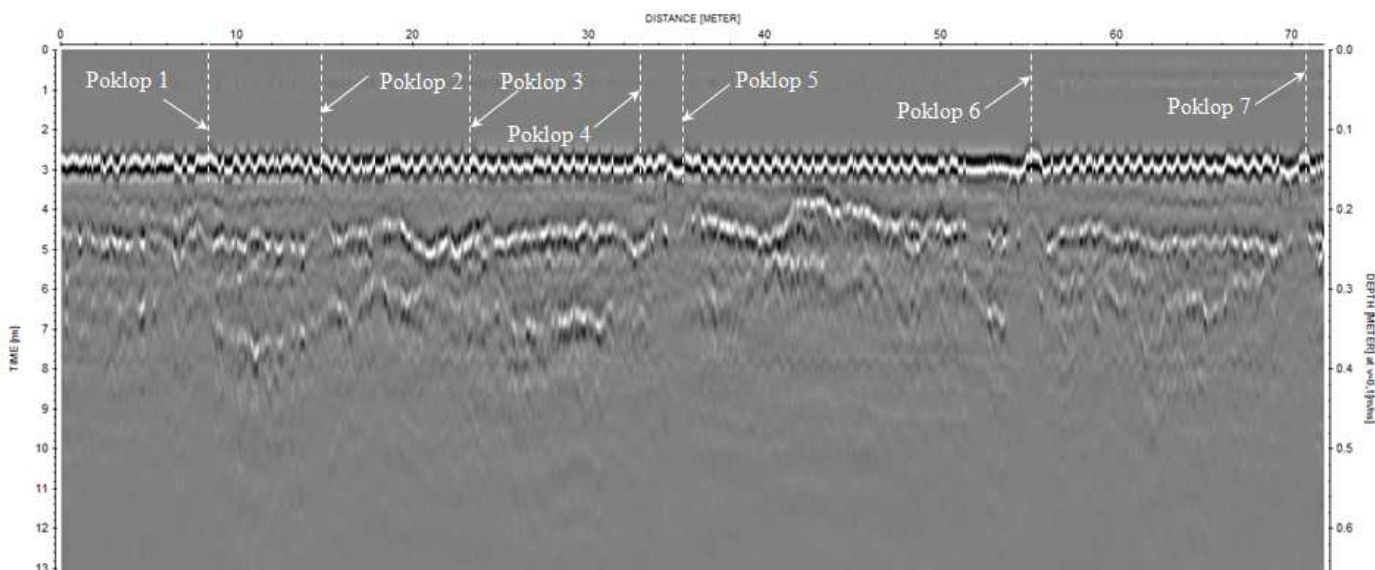
a)





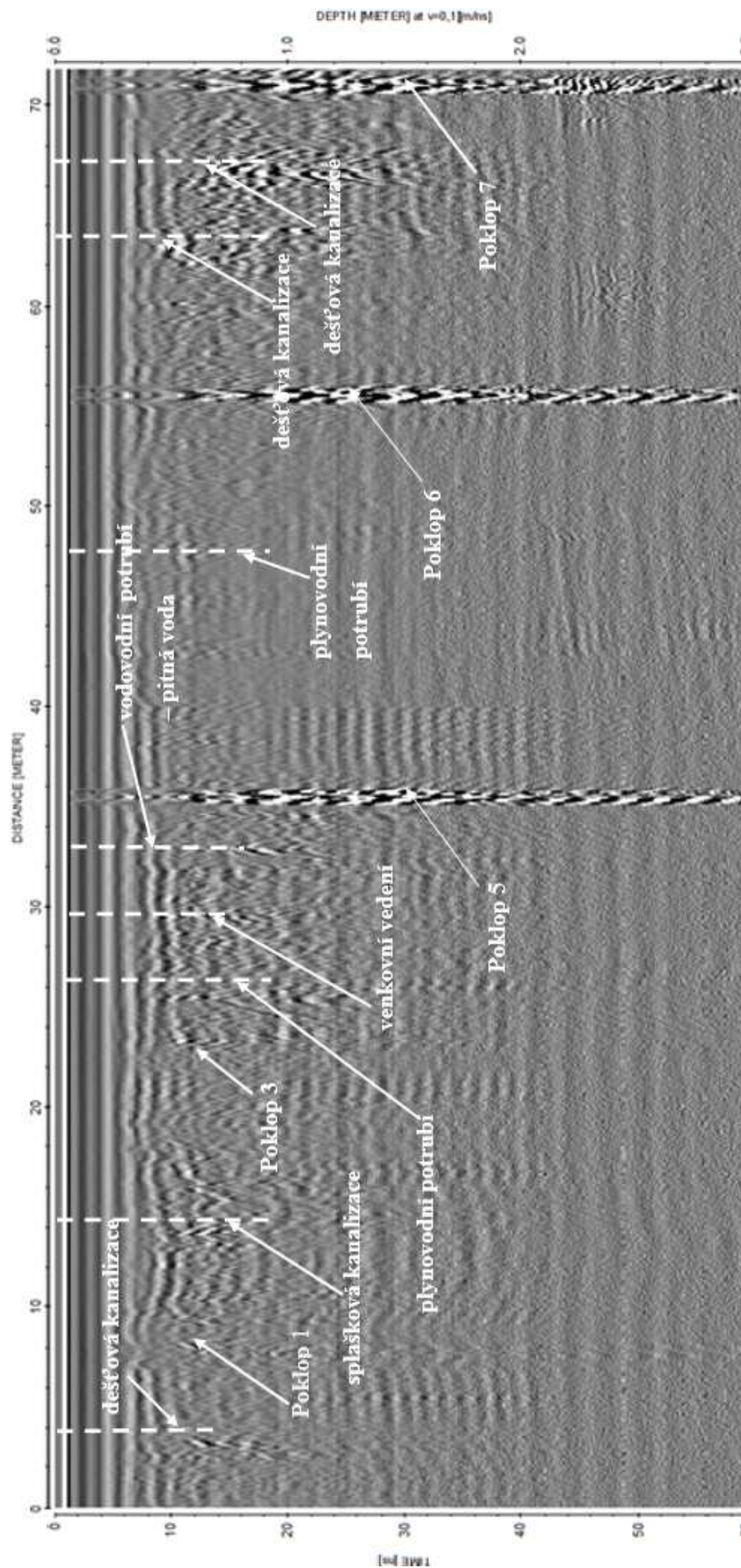
Obr. 32 - Data zpracována 2GHz anténou a) radargram, b) Histogram a frekvenční spektrum

Na obrázku 33 jsou vidět revizní kanalizační šachty nacházející se na testovacím úseku 2. Celkem bylo v radargramu detekováno 7 šachet, které odpovídají i skutečnosti. Z dat získaných 2GHz anténou není možné zjistit jednotlivé vedení pod povrchovou strukturou, proto byla použita anténa s frekvencí 400/900MHz.



Obr. 33 - Radargram z měření testovacího úseku 2- anténa s frekvencí 2GHz

Pro detekování inženýrských sítí byla data předem zpracována pomocí filtru: subtracting average (popsané v kapitole 5). Po zpracování dat byly oba radargramy vizuálně posouzeny a pro správnou detekci inženýrských sítí byla použita data naměřená anténou s frekvencí 900MHz.



Obr. 34 – Radargram z měření z testovacího úseku 2 – anténa s frekvencí 900MHz se zpracovanými daty

6.4 MĚŘENÍ NA VYBRANÉ POZEMNÍ KOMUKACI

V rámci diplomové práce byla řešena detekce konstrukčních vrstev na silnici II/322 Dašice. Počátek měření byl na křižovatce ulic Žižkova a Křičenského. Analyzovaný úsek má cca délku 300m. V této části úseku má PK dva jízdní pruhy. Měření bylo provedeno v každém jízdním pruhu ve vnější stopě vozidla. Denní intenzita měřeného úseku na této PK je cca 3000 osobních automobilů a 800 nákladních vozidel za 24 hod. [44]

Měření georadarem bylo provedeno pomocí zařízení RIS HI-Pave se dvěma anténami – 2GHz (Horn anténa) a dvou frekvenční anténou 400/900MHz. GPR sestava na pomocném vozíku na PK je zobrazený na obrázku 35.



Obr. 35 – GPR v in situ

Na obrázku 36 je znázorněn měřený úsek na silnici II/322 Dašice. První měřicí profil byl měřen z křižovatky ulic Žižkova a Křičenského směr na Dolní Roveň v km 34,188 a byl ukončen v km 34,465 na konci náměstí v místě vyústění jednosměrné ulice. První měřicí profil o délce cca 277m je znázorněn červenou barvou. Počátek druhého měřicího profilu je v km 34,465 a je totožný s koncem prvního měřicího profilu. Měření druhého profilu je vedeno přes náměstí v Dašicích ve směru ke křižovatce ulice Žižkova a Křičenského. Druhý profil je na obrázku 36 znázorněn modrou barvou o délce cca 285m.



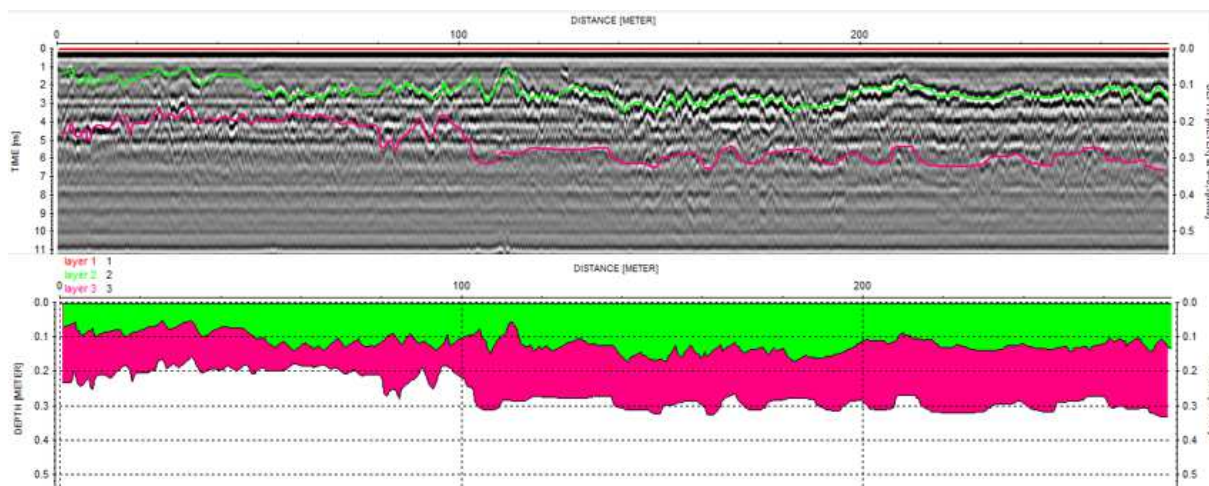
Obr. 36 – Mapa měřeného úseku

Veškerá data v této fázi práce, která byla zpracována a vyhodnocena v této kapitole byla hodnocena také v programu Reflexw, jako data naměřená v předchozích etapách.

Pro vyhodnocení rozhraní krytu, podkladní vrstvy a rozhraní stmelených a nestmelených vrstev byl použit radargram měřicího kanálu 2GHz. Pro vyhodnocení celkové konstrukční tloušťky byl použit měřicí kanál 900MHz. Vzhledem k vysoké intenzitě dopravy bylo nutné provést odstranění velkého množství šumu z naměřených dat.

Jak již bylo zmíněno, anténa s frekvencí 2GHz dosahuje do poměrně malých hloubek. Proto je potřeba pro zobrazení krytových a stmelených vrstev, které byly zjištěny při vlastním zpracování dat naměřených frekvencí 2GHz, použít úpravu pomocí následujících filtrů. Podobně jako v kapitole 6.3. byly využity funkce **correct max. phase a move starttime**. Dalším krokem pro odstranění extrémně nízkých a vysokých frekvencí byl použit algoritmus **bandpassbutterworth**. Ke zlepšení zobrazení dat pomohl filtr **gain**, díky kterému došlo k umělému zesílení slabších signálů ve větších hloubkách. Následný a zároveň poslední krok pro zpracování dat byl pro zvýšení zobrazení horizontálních rozhraní použit filtr **running average**.

Na obrázku 37 je zobrazen radargram s daty naměřenými s 2GHz anténou a zobrazené hranice krytových a stmelených vrstev. Pro lepší rozlišení naměřených dat je tento radargram zobrazený na obrázku 37 součástí **Přílohy A**, kde je podrobněji znázorněn po úsecích dlouhých 20 m.

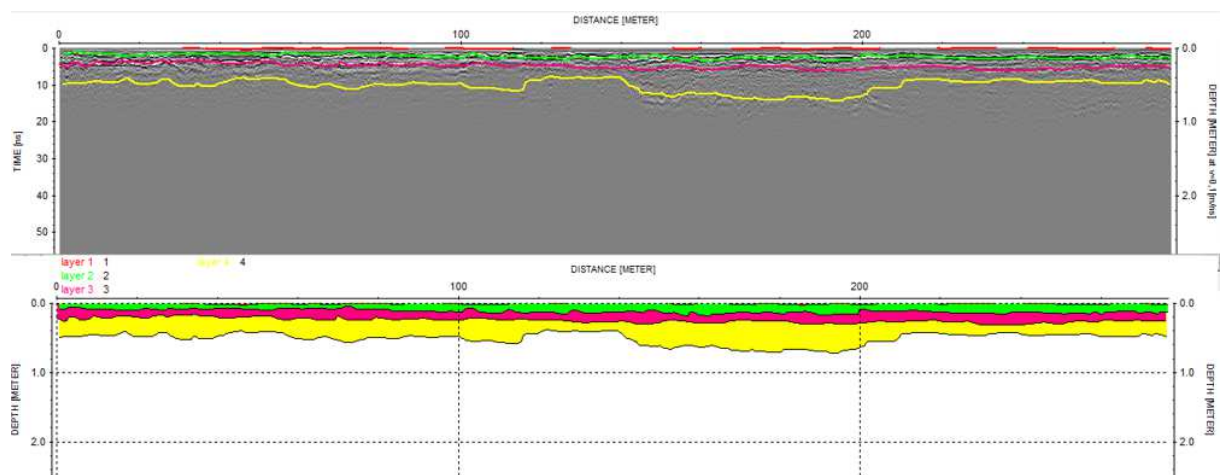


Obr. 37 – Data naměřená 2GHz anténou a zobrazení radargramu s krytovými a stmelenými vrstvami

Z převzatých dat vyplynula celková tloušťka konstrukce vozovky cca 50 až 60cm. V některých místech nad podloží/násypem může dosahovat, až do hloubky 0,9m.

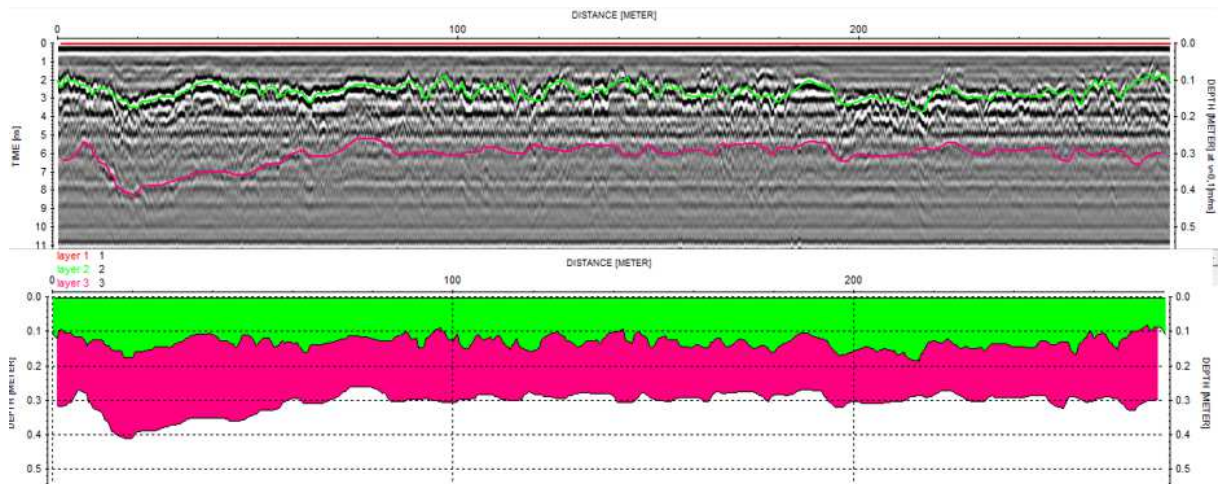
Proto bylo nutné pro ověření těchto dat, použít data naměřená anténou s frekvencí 900MHz, která dosáhne do větší hloubky.

Data získaná anténou s frekvencí 900MHz byla zpracována obdobným způsobem jako data s frekvencí 2GHz. Kromě algoritmu bandpassbutterworth, který nebyl pro tento typ frekvence použit. Pro lepší zobrazení dat a odstranění šumu byl pro data získaná nižší frekvencí využit filtr **backgroundremoval**. Na obrázku 38 je zobrazen radargram, kde díky vlastnosti antény s frekvencí 900MHz dosahovat do větší hloubky bylo možné detekovat i rozhraní nestmelené vrstvy. V určitých místech dosahuje konstrukce vozovky do poměrně velké hloubky, především v místě 140 – 200m. Podrobný radargram úseku je potom součástí **Přílohy A**.

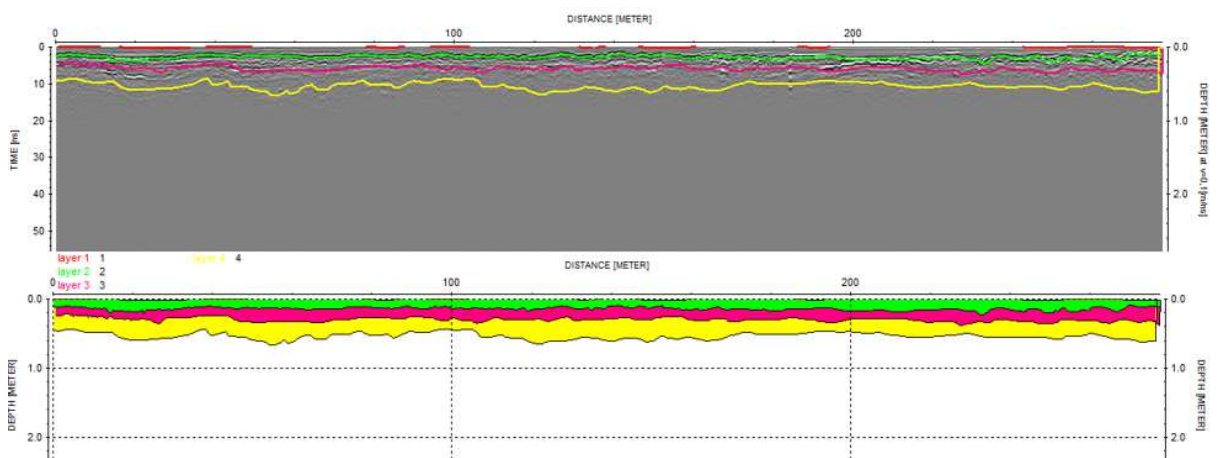


Obr. 38 – Data naměřená 900MHz anténou

Jak již bylo zmíněno v úvodu, měření proběhlo v dvou měřících profilech silnice II/322 Dašice. Na obrázcích 39 a 40 jsou potom zobrazeny radargramy z druhého měřícího profilu získané taktéž anténou 2GHz a 900MHz (podrobný radargram v **Příloze B**). V kapitole 6.4.1 je potom provedeno porovnání konstrukčních vrstev obou směrů a zároveň zhodnocení převzatých dat.



Obr. 39 – Data naměřená 2GHz anténou – směr ke křižovatce ulic Křičenského a Žižkova



Obr. 40 – Data naměřená 900MHz anténou - směr ke křižovatce ulic Křičenského a Žižkova

Kromě výše uvedeného byla také změřena tloušťka krytových vrstev. Podrobná tabulka s naměřenými tloušťkami je uvedena v **Příloze C**. Právě díky 2GHz anténě, bylo možné rozlišit krytové vrstvy, oproti převzatému měření, kde byla použita nejvyšší frekvence 1GHz.

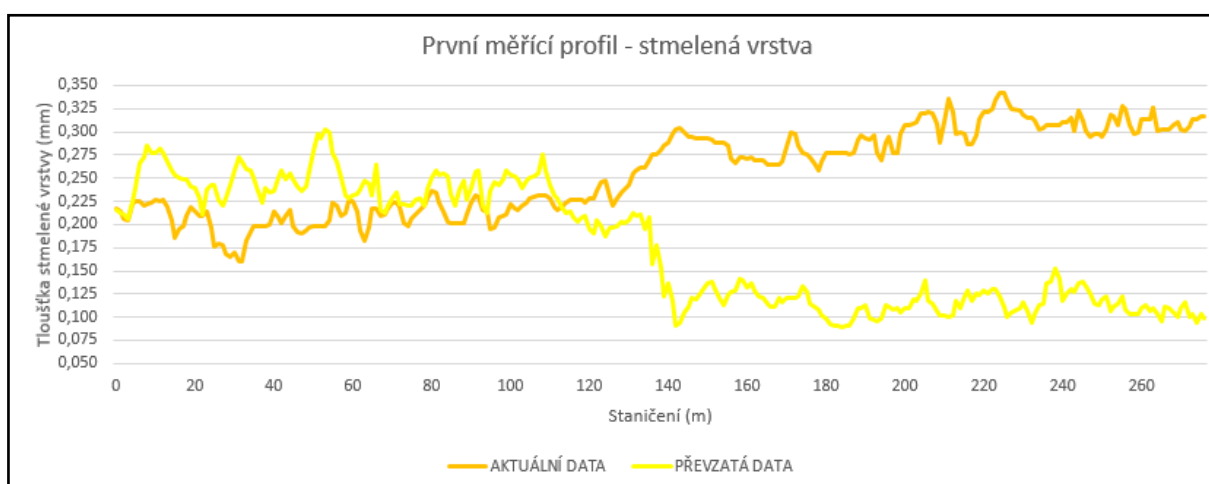
6.4.1 Porovnání převzatých dat s aktuálními daty na silnici II/322 – Dašice

Na základě georadarového měření je možné zmapovat skutečné provedení jednotlivých konstrukčních vrstev na vybraném úseku PK. Převzatá data ukazují na množství poruch v konstrukci a kolísání tloušťek konstrukčních vrstev.

V **Příloze D** je uvedena podrobná tabulka s tloušťkou stmelených vrstev po 1m pro první měřicí profily. Průměrná tloušťka stmelených vrstev z převzatých dat je cca 180mm a z aktuálních dat byla zjištěna průměrná tloušťka cca 260mm. Průměrný rozdíl mezi dříve

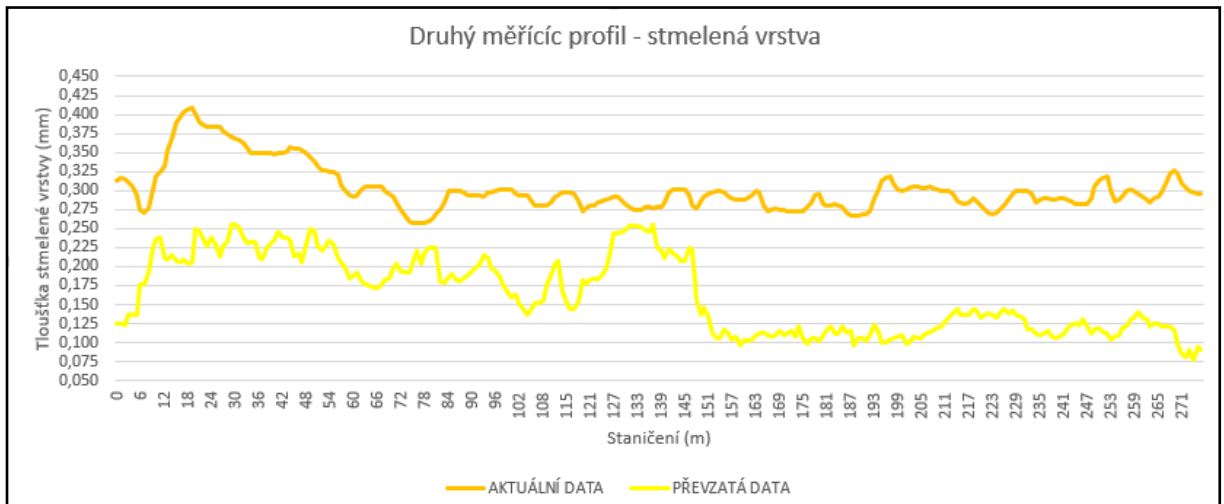
naměřenými daty a současnou hodnotou konstrukce je cca **8cm**. Na obrázku 37 je zobrazen radargram z tohoto měření, ve kterém je vidět značné zesílení stmelených vrstev cca od 100 m měření. Tento rozdíl byl způsoben pravděpodobně rekonstrukcí vozovky v roce 2014 přes náměstí v Dašicích. Nic méně podrobnější informace k této rekonstrukci nejsou dostupné.

Na 41 je znázorněn graf a provedeno porovnání rozdílných hloubek stmelených vrstev pro první měřicí profil.



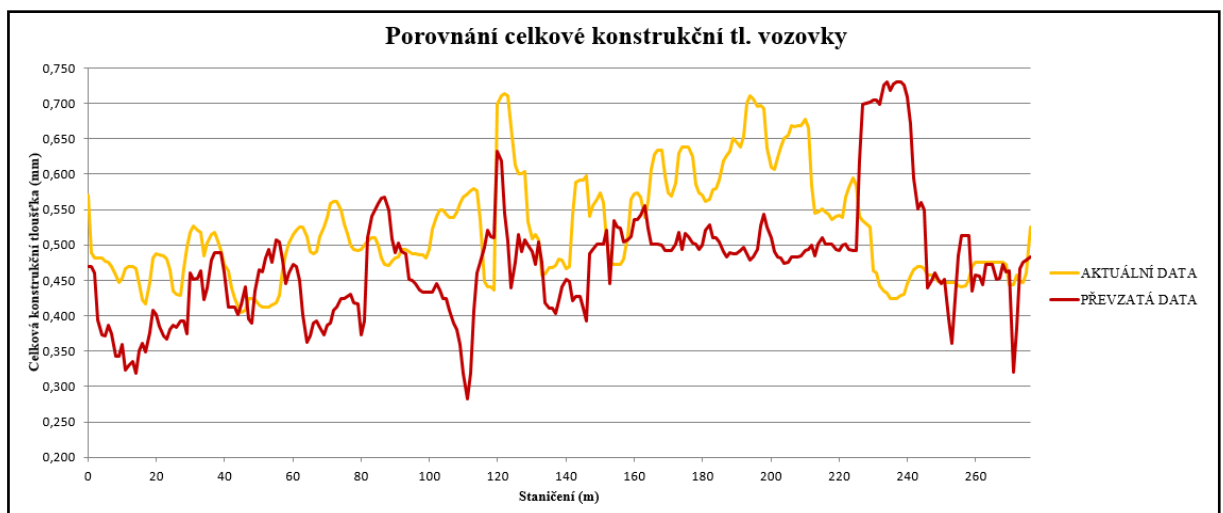
Obr. 41 – Porovnání stmelených vrstev z aktuálních dat a převzatých dat – první měřicí profil

Tloušťky stmelených vrstev detekované anténou s frekvencí 2GHz jsou pro druhý měřicí profil uvedeny také v Příloze D. V druhém měřicím profilu tloušťky stmelených vrstev vykazují značný rozptyl – aktuální průměrná tloušťka je cca 280 mm, oproti převzatým datům, kde byla průměrná hodnota cca 160 mm. Průměrný rozdíl mezi oběma hloubkami stmelených vrstev je cca **12 cm**. Takto velký rozdíl mohl vzniknout z důvodu širokého lože obrubníku nebo přítomností vody v konstrukci vozovky před zmíněnou rekonstrukcí. Porovnání stmelených vrstev z druhého měřicího profilu z aktuálních a převzatých dat je uvedeno na obrázku 42.



Obr. 42 – Porovnání stmelených vrstev z aktuálních dat a převzatých dat – druhý měřicí profil

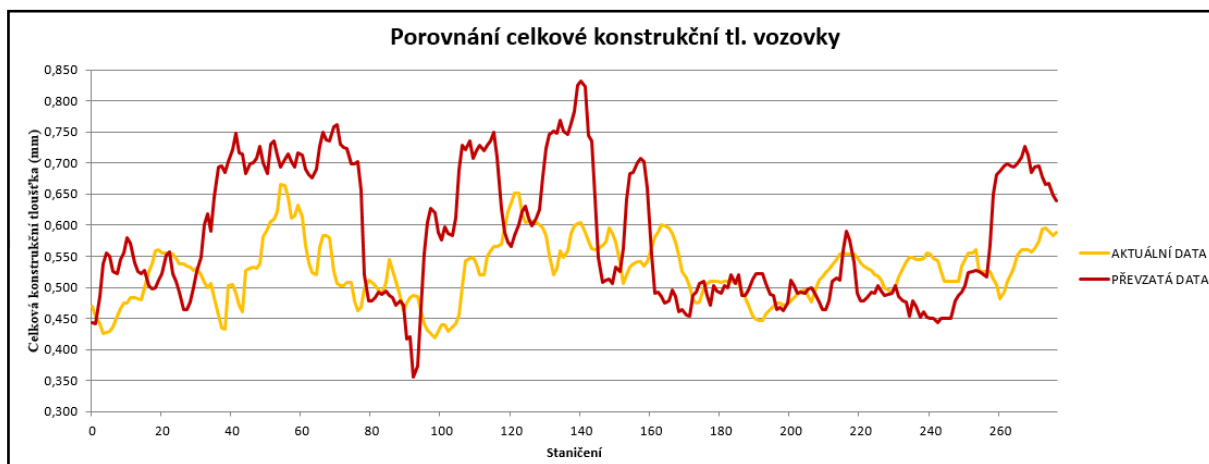
Na obrázku 43 je znázorněn graf, kde došlo k porovnání celkové konstrukční tloušťky vozovky v prvním měřicím profilu na vybraném úseku PK. Podrobná data použitá k vyhodnocení celkové konstrukční tloušťky pro oba měřicí profily jsou uvedena v **Příloze E**.



Obr. 43 – Porovnání celkové konstrukční tloušťky vozovky – v prvním měřicím profilu

Rozdíl mezi celkovou konstrukční tloušťkou z převzatých dat a aktuálních dat je cca 5cm. Aktuální konstrukční tloušťka odpovídá hodnotě cca 520 mm.

Na obrázku 44, který znázorňuje porovnání celkové konstrukční tloušťky v druhém měřicím profilu, je viditelný rozpor mezi převzatými daty a aktuálně naměřenými daty. Velký rozdíl vznikl i při hodnocení tloušťky stmelených vrstev v tomto směru. Aktuální celková tloušťka konstrukce vozovky je o cca 5 cm menší, než tloušťka zjištěná z převzatých dat.



Obr. 44 – Porovnání celkové konstrukční tloušťky vozovky – v DRUHÉM směru měření

Na úseku silnice II/322 Dašice odpovídá aktuální konstrukční tloušťka v obou směrech hodnotě cca 520 mm. Oproti původním datům, kde v prvním směru měření byla konstrukční tloušťka cca 470 mm a v druhém směru měření potom 580 mm. Nově naměřená tloušťka konstrukce 520mm odpovídají předpokládané tloušťce pro daný typ komunikace a dopravnímu zatížení dle TP 170.

Získané měření v této diplomové práci se ne zcela shoduje s tloušťkami konstrukce z převzatých dat. Rozdíly mezi těmito daty vznikly použitím jiných frekvencí, kde aktuální data byla měřena anténami s frekvencí 2GHz a 400/900MHz a převzatá data anténou s frekvencí 1GHz a 400MHz. Dalším co mohlo způsobit rozdílné hodnoty měření je, že stopy, ve kterých se měřilo, se neshodovaly. Na úseku před VVCD byla zjištěna rychlost šíření 0,1 m/ns, která byla nastavována i v měření in-situ. Proto mohl být rozdíl také způsoben nastavením jiné rychlosti signálu, než byla nastavována v převzatých datech. Změna podmínek měření a hlavně přítomnost vody v konstrukci a mechanické změny krytu způsobené dopravou vedou k značným rozdílům jednotlivých vrstev v tomto měření. Pro přesnější stanovení relativní permitivity by bylo nutné provést jádrové vývrty. Je třeba také podotknout, že velký vliv na naměřená data z jednotlivých antén mají inženýrské sítě nacházející se v podloží.

7. VLASTNÍ ANALÝZA DANÉ PROBLEMATIKY NA ZÁKLADĚ STUDIA LITERATURY A VLASTNÍCH ZKUŠENOSTÍ

GPR jako nástroj pro nedestruktivní diagnostiku vozovek je schopen zaznamenávat strukturální změny ve vozovce. Při měření dat není GPR omezen jen na měření diskrétních výsledků, ale je schopen zaznamenávat měření liniově.

Před vlastním měřením s GPR je potřeba zvážit a zamyslet se nad několika rozhodujícími body. Především se jedná o objekt a účel měření, co se bude měřit, jaké jsou vlastnosti zkoumaného předmětu, vlastnosti okolního materiálu, požadovaná přesnost měření (poloha, rozlišení). V případě měření na pozemní komunikaci jaká je intenzita dopravy na zvoleném úseku, jaké výsledky jsou od měření očekávány atd. Na základě těchto úvah, je potom možné nastavit vstupní parametry jednotlivých přístrojů pro sběr dat.

S ohledem na naměřená data a jejich interpretaci pro další zpracování je třeba zvolit způsob měření a správně si rozvrhnout měřený úsek. Naměřená data je možné umístit do souřadnicového systému s kombinací GPR průzkumem, geodézií nebo propojení GPR s anténou GNSS, což je možné použít pro přesnou lokalizaci jádrových vývrtů.

Faktorů, které ovlivňují odrazy EM a rychlost šíření je mnoho. Jedná se především o typ použitého asfaltu, typu pojiva, přítomnost vodivých minerálů, pórovitost, účinkem solí a v neposlední řadě na výplň pórů a poruch. Obecně materiály s vysokou vodivostí značně utlumují signál.

Dalším a důležitým vlivem, který ovlivňuje měření GPR jsou klimatické podmínky. Měření by nemělo být prováděno na vlhkých vozovkách, po dešti a ne vůbec za deště. Teplota nesmí klesnout pod bod mrazu. Dále ovlivňuje měření GPR také intenzita provozu na měřeném úseku, proto se doporučuje provádět měření v době menší intenzity dopravy.

V případě, že se pod povrchem měřeného úseku nachází inženýrské sítě, jsou inženýrské sítě nejlépe viditelné, pokud prochází kolmo přes viditelný profil.

Georadar je jedinečnou technologií, která poskytuje přesné a nedestruktivní dohledání sítí, a to i takových, které nejsou kovové.

Pro stanovení rychlosti signálu se často využívá metoda CMP, která umožňuje stanovit běžné tloušťky konstrukčních vrstev. Tuto metoda nelze ovšem využít u všech GPR systémů. Pro PK je také možné využít metodu koeficientu odrazu – RCM. Využívá se především pro stanovení vrstev krytu. Tato metoda se používá v případě, že zkoumaný předmět neobsahuje žádnou výztuž.

Pro zjištění tlouštěk konstrukčních vrstev se doporučuje měření provádět kombinací anténních systémů s různou centrální vysílací frekvencí, které se volí tak, abychom získali maximální rozlišovací schopnosti systému v celém profilu konstrukčních vrstev. Měření by se mělo provádět ve vnější stopě jízdního pásu.

V případě, že se zvolí nevhodná frekvence, může dojít k slabému odrazu, a to je důvod, proč nevznikne dostatečný kontrast rozdílného podloží a tím není možné provést jeho identifikaci. Pro GPR měření na PK se převážně používají anténní systémy s centrální vysílací frekvencí od 400MHz do 2,0GHz.

Dosah a rozlišení systému ovlivňují parametry GPR systému, ale také okolní terén, kalibrace antén, umístění antén a parametry nastavované pro sběr dat. Pro diagnostiku na pozemních komunikacích se nastavuje přírůstek od 1 – 10 stop na metr. Dosah se nastavuje podle frekvence antény a podle hloubky zkoumaného předmětu. Anténám s vyšší frekvencí se nastavuje dosah v intervalu od 10ns do 20ns a pro antény s nižší frekvencí je možné dosah nastavit až k 90ns.

Pro přesnější stanovení konstrukčních vrstev se doporučuje provést kalibrace pomocných jádrových vývrtů. Důležitým faktorem je volba umístění jádrových vývrtů. Nejvhodnější je provádět vývrty v místě měřicího úseku, a to po provedení měření s GPR v místě, kde je nejlépe vidět rozhraní vrstev. Kalibrace pomocí jádrových vývrtů poskytuje minimální chyby pro stanovení tloušťky asfaltových vrstev. Přesnost tohoto postupu závisí zejména na množství získaných jader.

Za účelem získat podrobné informace o měřeném úseku PK v celé jeho délce se georadar umístí na pomocný vozík nebo se uchytlí na/za měřicí vozidlo. Pomocný vozík je tlačěn a jeho rychlost závisí na rychlosti chůze operátora.

Oproti tomu měřicí vozidlo umožňuje zaznamenat data v rychlosti až 100 km/h, které může být použito za běžného provozu bez většího omezení dopravy. Při nižších rychlostech dochází k přesnějšímu zaznamenávání dat s vyšším rozlišením.

Dalším přínosem systému GPR je možnost využít pole antén, které umožňuje provádět autokalibraci (CMP, WARR) pro měření tloušťek konstrukčních vrstev vozovek, čímž se podstatně snížila nutnost kontrolních vývrtů prováděných po celé délce měřeného úseku. Polem antén je také možné získat 3D záznam, což umožňuje vytvoření časových řezů v určité hloubce.

Při diagnostice vozovek se určuje celková konstrukční tloušťka, ale i tloušťka jednotlivých konstrukčních vrstev. Pro stanovení tloušťek se standardně provádějí jádrové vrty, které jsou, ale časově náročné. GPR udává data souvisle, ale konstrukce je často zjednodušena na stmelenu vrchní vrstvu a podkladní vrstvu z nestmelovaných materiálů.

Současné zkušenosti ukazují, že přesnost stanovení tloušťky krytu nebo podkladní vrstvy vozovek je při nízké rychlosti měřicího vozidla kolem 5%. V případě vysoké rychlosti je to potom okolo 10 %. Další konstrukční vrstvy jsou stanovované s přesností cca 10 – 30%.

GPR je metoda, která umožňuje poskytnout údaje o celkové konstrukční tloušťce nebo i podloží bez většího omezení dopravy. Měření GPR je možné provádět za běžného provozu.

Vyhodnocená data je možné využít pro tvorbu výstupů u dalších nedestruktivních, ale i destruktivních metod, sloužící k diagnostice na pozemních komunikacích. Výsledky měření pomocí GPR mohou sloužit také jako podklad pro doplnění dalších diagnostických metod. Jako podklad je možné měření GPR využít pro již zmíněné jádrové vrty. Další využití GPR dat je možné jako vstupní údaj pro zařízení FWD, a to pro stanovení únosnosti vozovek. Kombinace GPR dat s dalšími metodami pro diagnostiku vozovek umožňují stanovit aktuální stav vozovky a na základě získaných dat stanovit návrh na její modernizaci.

8. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo prozkoumat možnosti využití technologie GPR pro detekci konstrukčních vrstev netuhých vozovek na pozemních komunikacích. Na základě rešerše z literatury a vlastních zkušeností z měření vypracovat analýzu možností využití GPR pro detekci konstrukčních vrstev netuhých vozovek PK. Hlavním cílem této diplomové práce je potom stanovení konstrukčních vrstev na vybraném úseku PK.

V průběhu zpracování mé diplomové práce jsem se seznámila s novou technologií pro nedestruktivní testování vozovek PK. Postupným seznamováním a studií příslušné literatury jsem dospěla k závěru, že GPR technologie má pro diagnostiku vozovek velký přínos. GPR je metoda, která jako jediná umožňuje určit konstrukční tloušťky vozovky kontinentálně po celé délce měřeného úseku. Je potřeba poznamenat, že přestože sběr dat je časově nenáročný a samotný hardware GPR je poměrně jednoduchý, tak především pro zpracování dat je potřeba poměrně hodně znalostí a zkušeností. Velmi důležité je, aby před vlastním měřením došlo k důkladnému seznámení s technologií GPR a byly stanoveny cíle zkoumání.

V začátku diplomové práce byly přiblíženy teoretické poznatky týkající se technologie GPR, byly uvedeny obecné informace o této metodě a představeny metody pro stanovení rychlosti šíření signálu. V této diplomové práci byla pro stanovení rychlosti šíření použita metoda RCM. Dále byl popsán využitý hardware RIS Hi-Pave a softwaru Reflexw. A v neposlední řadě došlo k charakterizování použitých algoritmů, které byly využity pro zpracování dat v této diplomové práci.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo měření na silnici II/322 Dašice, kde došlo k uplatnění získaných informací ze studie příslušné literatury a zkušeností z předchozích měření. Během praktické části uvedené v kapitole 6, došlo ke stanovení konstrukčních tloušťek. Tloušťky byly měřeny a porovnávány ve dvou měřících profilech. Data, která byla naměřena a zpracována ze silnice II/322, byla porovnána s převzatými daty od Správy a údržby silnic Pardubického kraje.

Na vybraném úseku PK byla stanovena krytová vrstva, což bylo umožněno díky využití antény s vysokou frekvencí (2GHz). Z naměřených dat bylo možné stanovit i hranici stmelěných vrstev a tím i jejich tloušťku. V prvním měřícím profilu byla stanovena tloušťka

stmelených vrstev 260mm, což bylo o 8cm více, než bylo zjištěno z převzatých dat. Značný rozptyl hodnot byl potvrzen i v druhém měřícím profilu, kde rozdíl mezi aktuálními daty a převzatými daty je 12cm. Uvedené rozdíly byly způsobeny výše uvedenými vlivy. Celková konstrukční vrstva v obou měřících profilech je dle interpretace autorky cca 520mm. Oproti převzatým datům, kde v prvním měřícím profilu byla zjištěna celková konstrukční tloušťka 470mm a v druhém měřícím profilu cca 580mm. Celkově tyto rozdílné hodnoty porovnávacího měření na úseku silnice II/322 ovlivnilo nastavení rychlosti šíření signálu, časový rozestup mezi aktuálními daty a převzatými daty cca 4 roky a tím způsobené mechanické změny v konstrukci vlivem intenzity dopravy.

S metodou GPR jsme schopni určit tloušťku konstrukce vozovky s přesností cca 10%. Přesto není georadar stále vyhledávaným a uznávaným zařízením. Mezi odbornou veřejností panuje stále částečná nedůvěra ohledně přesnosti naměřených dat. V České republice nejsou vypracovány detailní standardy pro využití GPR v oblasti silnic. Kromě informací uvedených v TP 233 a TP 207. To je možná jeden z důvod proč diagnostika metodou GPR není využívána v České republice, tak často jako v ostatních zemích. Často jsou ovšem výsledky využívány jako vstupní údaje pro rázové zařízení FWD a termografii.

V současné době je k dispozici stále více nedestruktivních diagnostických metod, které umožňují stanovit stav vozovek. V řadě případů je vhodné použít kombinaci těchto metod. Vždy je ale potřeba zvážit, v jak velkém rozsahu, a které nedestruktivní metody použít.

Diagnostika vozovek prováděná metodou GPR v pravidelných cyklech by mohla správcům komunikací přinést snížení finančních nákladů. Toho by bylo docíleno právě kontinuální a rychlou diagnostikou PK, kterou GPR umožňuje. GPR také odhalí skryté vady vozovky před jejich rozšířením, což umožní odhadnout stav vozovky dříve než je nutná její kompletní rekonstrukce.

9. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] TAKAHASHI, Kazunori, Holger Preetz, IGEL Jan. *Soil properties and performance of landmine detection by metal detector and ground-penetrating radar — Soil characterisation and its verification by a field test*. Journal of Applied Geophysics.[online] roč. 4, s. 368 – 377. ISSN: 0926-9851.
- [2] SAARENKETO, Timo. *Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys*. Oulu: University of Oulu, 2006. ISBN 9514282221
- [3] ANNAN, A.P. (2012), *Ground Penetrating Radar, principles, procedures and applications*. [online].
- [4] TAKAHASHI, Tím Kazunori, Jan IGEL, Holger PREETZ a Seiichiro KURODA. *Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management*. 2012, kap. 8, s. 155 - 178. ISBN 978-953-51-0117-8.
- [5] DANIELS, David J., *Ground Penetrating Radar* [online]. B.m.: Iet, 2004
- [6] MATULA, R. *Nedestruktivní diagnostika konstrukcí vozovek pozemních komunikací georadarem* [online]. Brno, 2013. Disertační práce. Univerzita Jana Pernera.
- [7] Matsima Bankane Magakgala, *Possibilities of Using Ground Penetrating Radar in the Diagnosis of Road Pavement* [online]. Pardubice, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Dopravní fakulta Jana Pernera
- [8] Geophysical Survey Systems, Inc., GSSI, *BridgeScan Brožura* [online]. 2015. Dostupné:<http://www.geophysical.com/Documentation/Brochures/GSSI-BridgeScanBrochure.pdf>
- [9] Geophysical Survey Systems, Inc., GSSI, *RoadScan30 Brožura* [online]. 2015. Dostupné:<http://www.geophysical.com/Documentation/Brochures/GSSI-RoadScan30Brochure.pdf>
- [10] Geophysical Survey Systems, Inc. GSSI [online]. Dostupné z: <http://www.geophysical.com/>
- [11] Technické podmínky TP 233, *Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací*. 2011
- [12] Eltesta, *Ground Penetrating Radars. Principles, Applications and Design* [online]. Dostupné z: <http://www.eltesta.com/beta/Downloads/files/AN-1.pdf>
- [13] Mara Nord Project , *Recommendations for guidelines for the use of GPR in Site investigations* [online]. 2011.

- [14] TAKAHASHI, Kazunori, Holger Preetz, IGEL *Evaluating GPR for Geotechnical and Hazards Assessment of Deep – Mine Geology*. FastTimes.[online] roč. 14, s. 26 – 30. 2009.
- [15] Eric Brandon Sucre. *Soil resource heterogeneity and site quality in southern appalachian hardwood forests: Impact of decomposing stumps, geology and sakamander abundance* [online]. 2008. Disertační práce.
- [16] 4.7 *Ground penetrating radar. Burval* [online]. s. 99-104.
Dostupné z: <https://www.liag/BURVAL/buch/099-106.pdf>
- [17] JOL, Harry M. *Ground Penetrating Radar theory and applications*. Oulu: Elsevier, 2008
- [18] C. Plati, A. Loizos. *Using ground-penetrating radar for assessing the structural needs of asphalt pavements*. Nondestructive Testing and Evaluation, roč. 27, No. 3, September 2012, s. 273–284
- [19] Andreas Loizos, Christina Plati. *Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches*. NDT&E International 40 (2007), s. 147–157
- [20] Marko Ožbolt¹, Tatjana Rukavina, Josipa Domitrović. *COMPARISON OF THE PAVEMENT LAYERS THICKNESS MEASURED BY GEORADAR AND CONVENTIONAL METHODS – EXAMPLES FROM CROATIA*. The Baltic journal of road and bridge engineering, 2012, s. 30–35
- [21] Lech Krysiński, Jacek Sudyka. *GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks*. Journal of Applied Geophysics, roč. 97, říjen 2013, s. 27–36
- [22] D. Ranalli, M. Scozzafava, M. Tallini, S. Colagrande. *GPR signal attenuation vs. depth on damaged flexible road pavements*. Advanced Ground Penetrating Radar, 2007, ISBN: 1-4244-0886-5
- [23] Samer Lahouar, Imad L. Al-Qadi. *Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data*. NDT&E International, roč. 41, 2008, s. 69–81
- [24] J. Pedret Rodés, V. Pérez-Gracia, A. Martínez-Reguero. *Evaluation of the GPR frequency spectra in asphalt pavement assessment*. Construction and Building Materials, roč. 96, 2015), s.181–188
- [25] Edwards, Lulu; Bell, Haley P. *Comparative evaluation of nondestructive devices for measuring pavement thickness in the field*. International Journal of Pavement Research and Technology, březen 2016, roč. 9, s. 102 - 111

- [26] Le Bastard, Baltazart, V.; Yide Wang, J.; Saillard, J. *Thin-Pavement Thickness Estimation Using GPR With High-Resolution and Superresolution Methods*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, roč. 45, s. 2511 - 2519
- [27] M.U.Ahmed, R.A.Tarefder, A.K.Maji. *Incorporating transmitter–receiver offset to interpret pavement layer thicknesses by GPR*. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation, roč. 6 , 2016, s. 94–104
- [28] Pengcheng Shangguan, Imad L. Al-Qadi, Samer Lahouar. *Pattern recognition algorithms for density estimation of asphalt pavement during compaction: a simulation study*. Journal of Applied Geophysics, roč. 107, 2014, s. 8–15
- [34] Diogo B. Oliveira, Douglas A.G. Vieira, Adriano C. Lisboa, Fillipe Goulart. *A well posed inverse problem for automatic pavement parameter estimation based on GPR data*. NDT&E International, roč. 65, 2014, s. 22–27
- [29] Martin Pitoňáka, Ján Filipovsky. *GPR application – non-destructive technology for verification of thicknesses of newly paved rous in Slovakia*. Procedia Engineering 153, 2016, s. 537 – 549
- [30] Mercedes Solla, Higinio González-Jorge, Henrique Lorenzo, Pedro Arias. *Uncertainty evaluation of the 1GHz GPR antenna for the estimation of concrete asphalt thickness*. Measurement, roč. 46, 2013, s.3032–3040
- [31] C. Fauchard, X. De´robert, J. Carioub, Ph. Côte. *GPR performances for thickness calibration on road test sites*. NDT&E International, roč. 36, 2003, s. 67–75
- [32] Edwards L., Mason Q. *Evaluation of technologies for nondestructively determining concrete pavement thickness*. [online]. 2011.
- [33] Lahouar S, Al-Qadi IL, Loulizi A, Clark TM, Lee DT. *Approach to determining ilitu dielectric constant of pavements: development and implementation at interstate 81 in Virginia*. Transp Res Rec: J Transp Res Board 2002;1806:81–7.
- [34] Maser KR. *Condition assessment of transportation infrastructure using ground-penetrating radar*. J Infrastruct Syst 1996;2(2):94–101.
- [35] Loizos A, Plati C. *Accuracy of pavement thicknesses estimation using different ground penetrating radar analysis approaches*. NDT E Int 2007;40(2):147–57.
- [35] Al-Qadi IL, Lahouar S, Loulizi A. *In-situ measurements of hot-mix asphalt dielectric properties*. NDT E Int 2001;34(6):427–34.
- [36] Zhen Leng, Imad L. Al-Qadi. *An innovative method for measuring pavement dielectric constant using the extended CMP method with two air-coupled GPR systems*. NDT&E International, roč 66, 2014, s.90–98

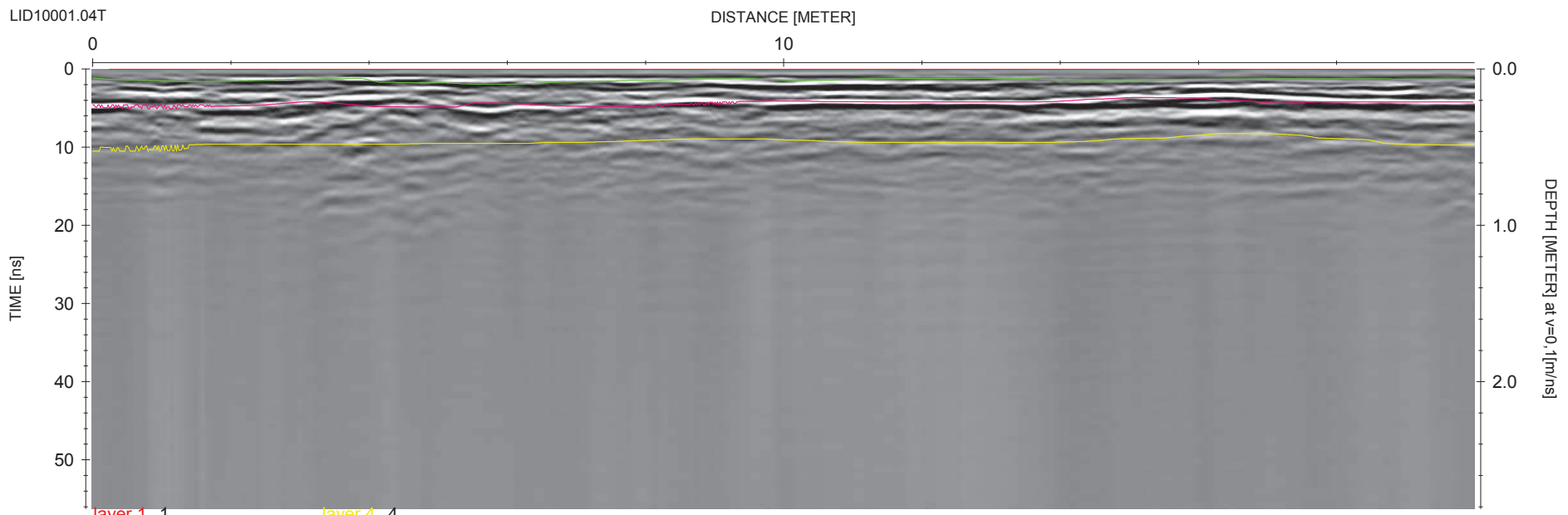
- [37] M.U.Ahmed, R.A.Tarefder, A.K.Maji. *Incorporating transmitter–receiver offset to interpret pavement layer thicknesses by GPR*. Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation, roč. 6, 2016, s. 94–104
- [38] *Měření tloušťek asfaltových vrstev vozovky georadarem*. Dostupné z: <http://sledovanivozovek.vars.cz/p%C5%99%C3%ADpady-u%C5%BEit%C3%AD-technologi%C3%AD>
- [39] *Luděk KOVÁŘ, Pavel POSPÍŠIL. APPLICATION OF GPR DURING INVESTIGATION CONCERNING CAUSES OF PAVEMENT FAILURE AND ROAD SUBGRADE QUALITY IN GRANITOID MASSIF NEAR SIMTANY*. Roč. LIX, 2013, s. 36-46, ISSN 1802- 5420
- [40] *Rázové zkoušky únosnosti na vozovkách s asfaltovým krytem*. Dostupné z: <http://sledovanivozovek.vars.cz/p%C5%99%C3%ADpady-u%C5%BEit%C3%AD-technologi%C3%AD>
- [41] *Zjištění stavu povrchu a asfaltového souvrství silnice I/3 v úseku Mirošovice - Benešov* Dostupné z: <http://sledovanivozovek.vars.cz/p%C5%99%C3%ADpady-u%C5%BEit%C3%AD-technologi%C3%AD>
- [41] *Technické podmínky Ministerstva dopravy TP 207, Experiment přesnosti zařízení pro měření povrchových vlastností a dalších parametrů vozovek pozemních komunikací*. 2017
- [43] *RIS HI – PAVE*. Dostupné z: <http://idsgeoradar.com/products/ground-penetrating-radar/ris-hi-pave>
- [44] *Intenzita dopravy na silnici II/322 Dašice*. Dostupné z: www.dasice.cz

10. PŘÍLOHY

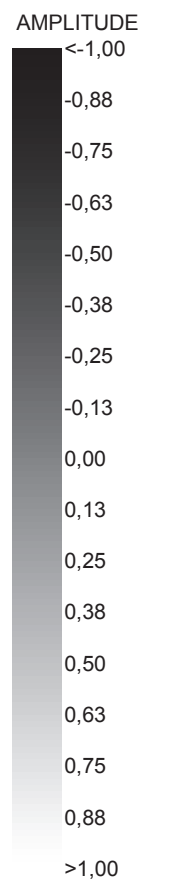
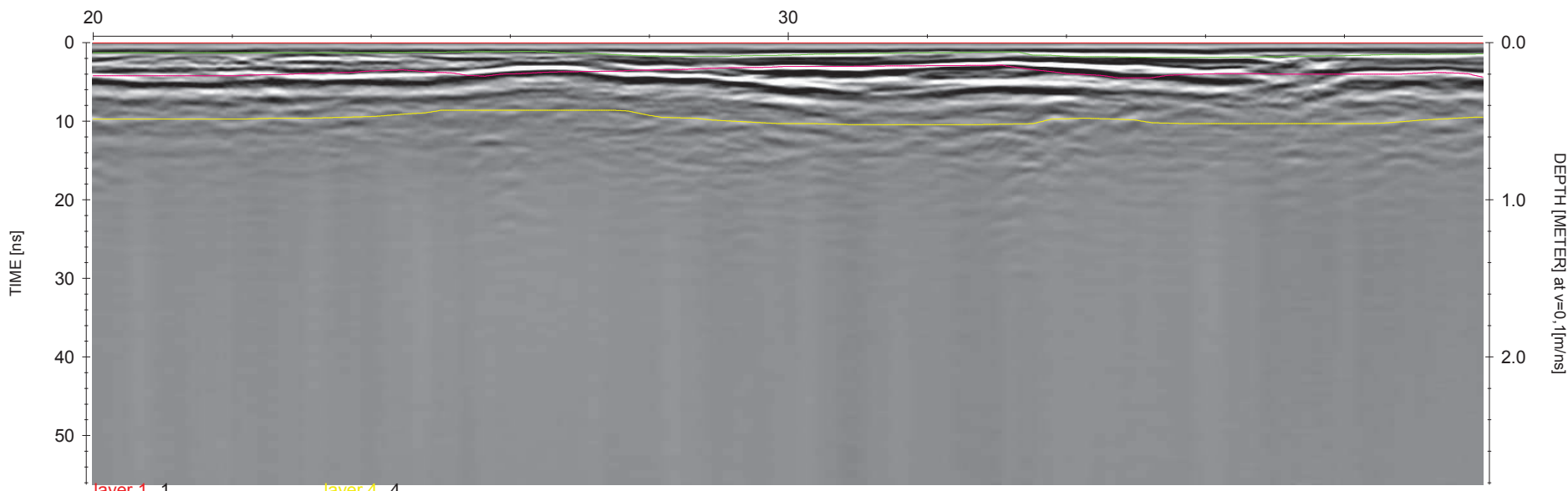
PŘÍLOHA A – Podrobný radargram získaný anténou s frekvencí 2GHz a 900Mhz v prvním měřícím profilu.....	85
PŘÍLOHA B – Podrobný radargram získaný anténou s frekvencí 2GHz a 900Mhz v druhém měřícím profilu.....	99
PŘÍLOHA C – Tloušťky krytových vrstev v obou měřících profilech.....	113
PŘÍLOHA D – Celková tloušťka stmelených vrstev v obou měřících profilech	119
PŘÍLOHA E – Celková tloušťka konstrukčních vrstev v obou měřících profilech.....	126

PŘÍLOHA A

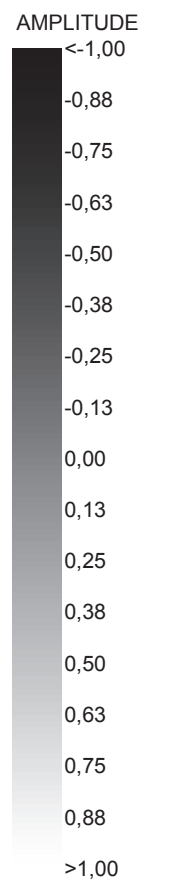
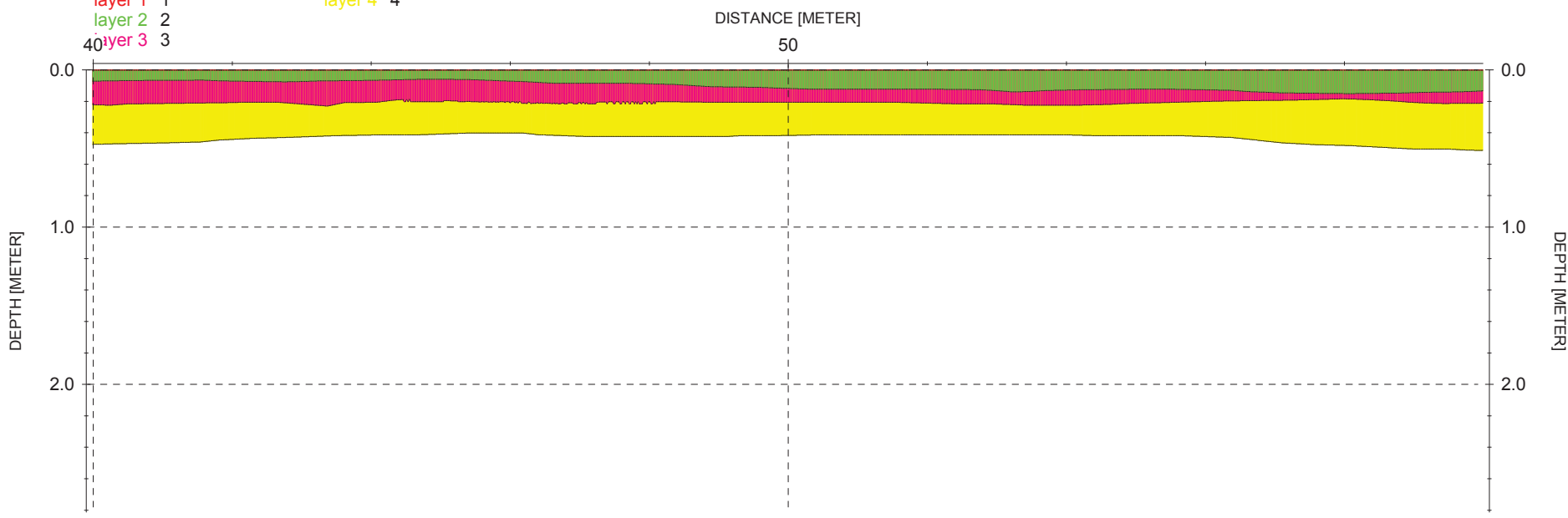
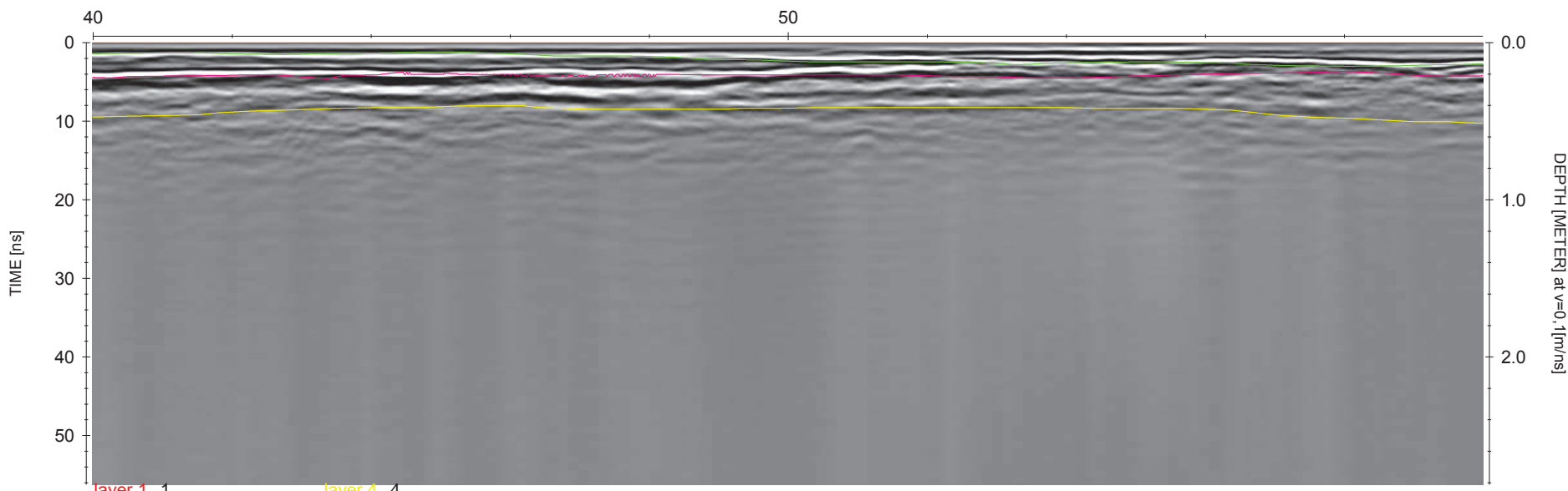
LID10001.04T



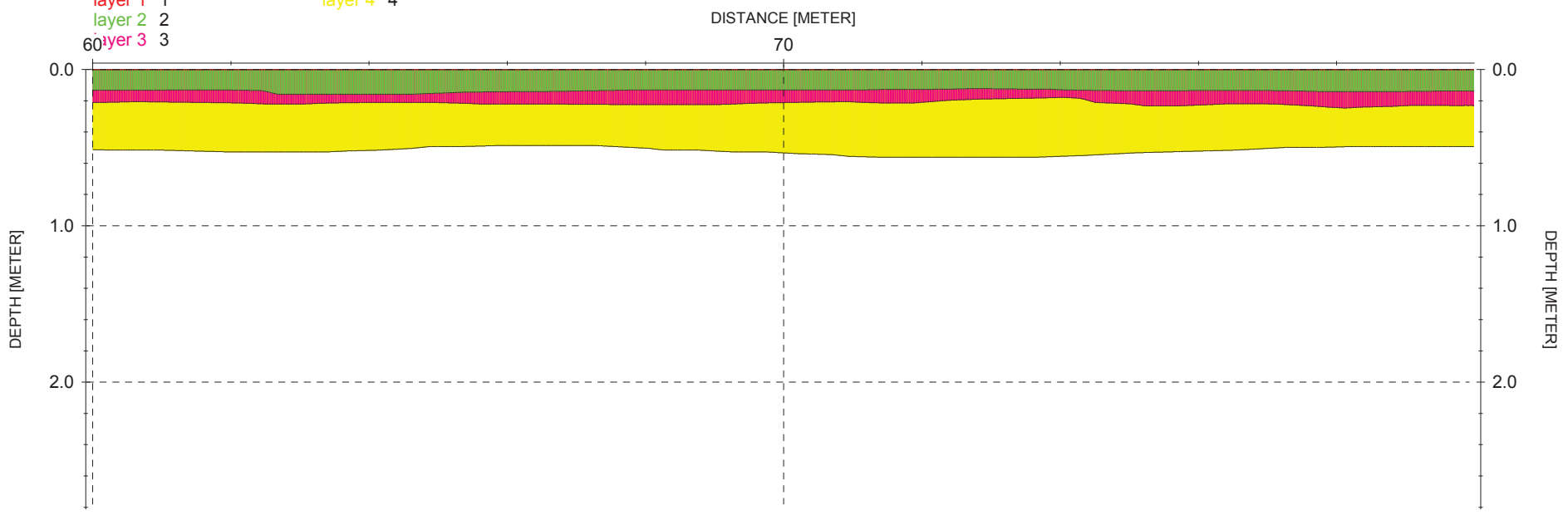
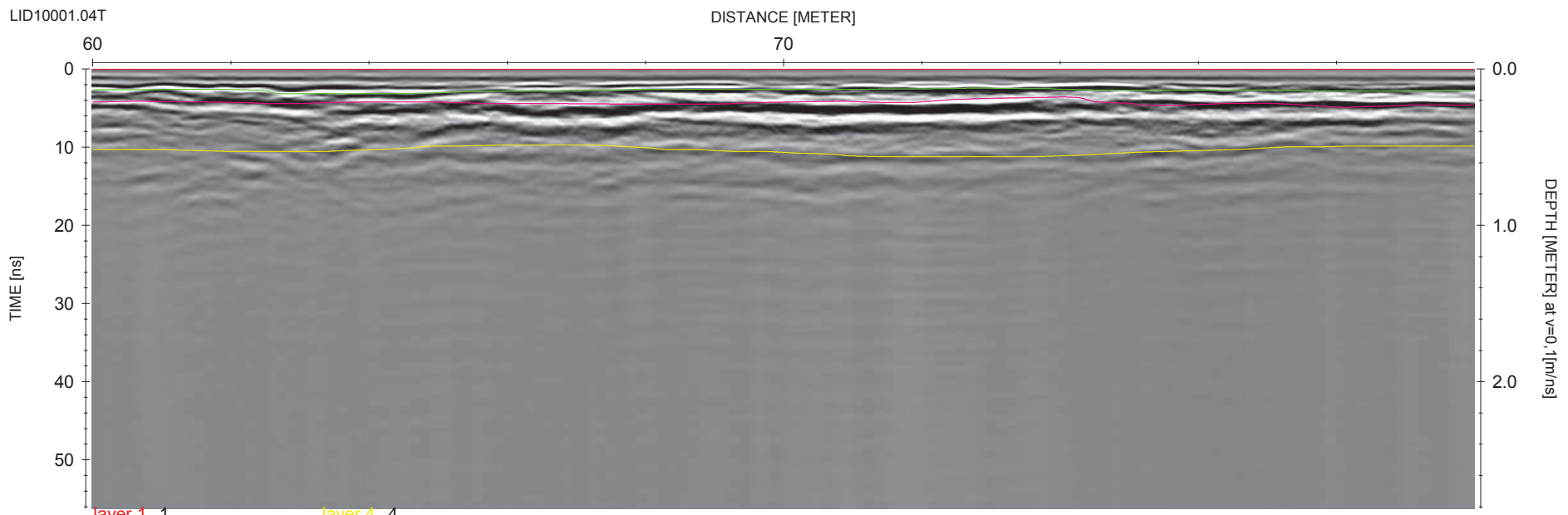
LID10001.04T



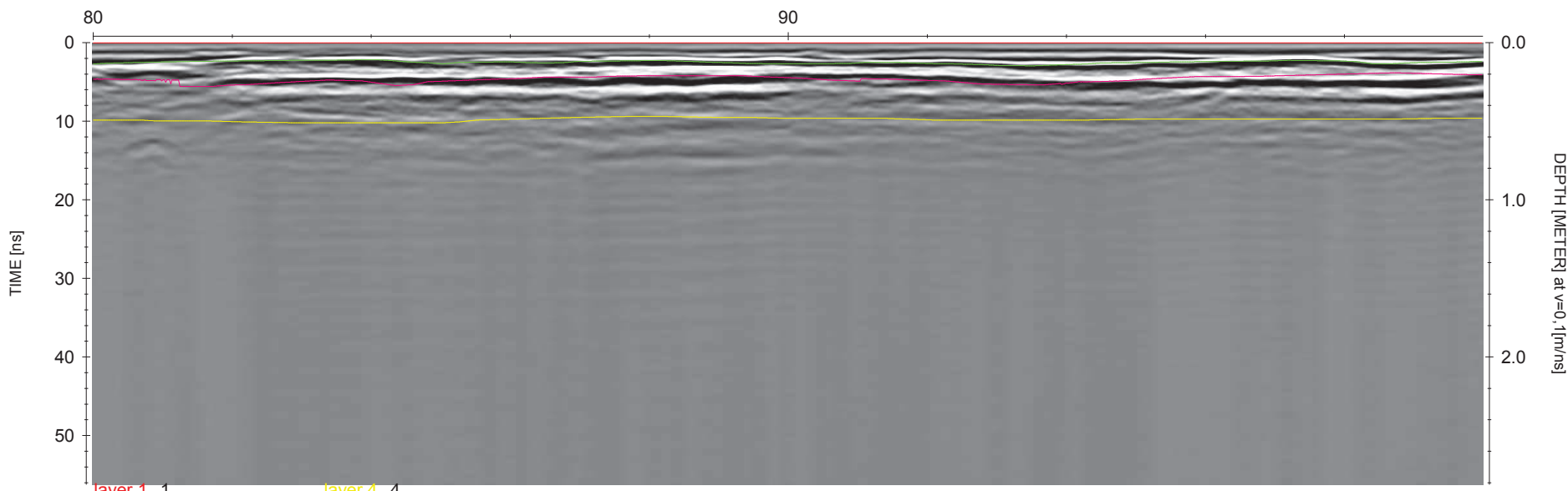
LID10001.04T



LID10001.04T



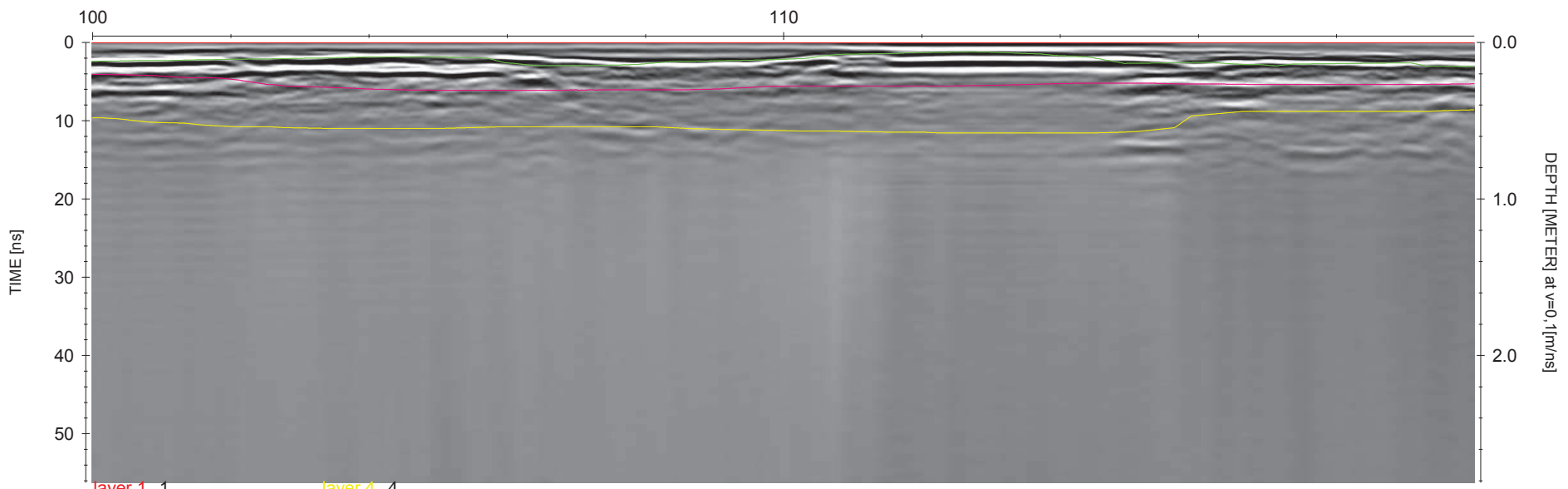
LID10001.04T



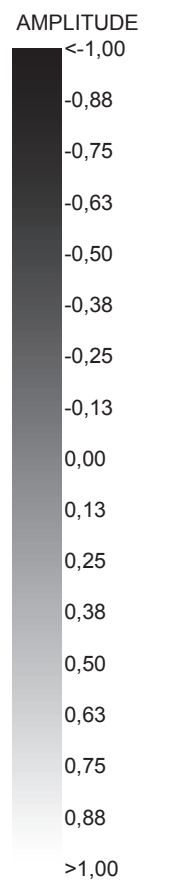
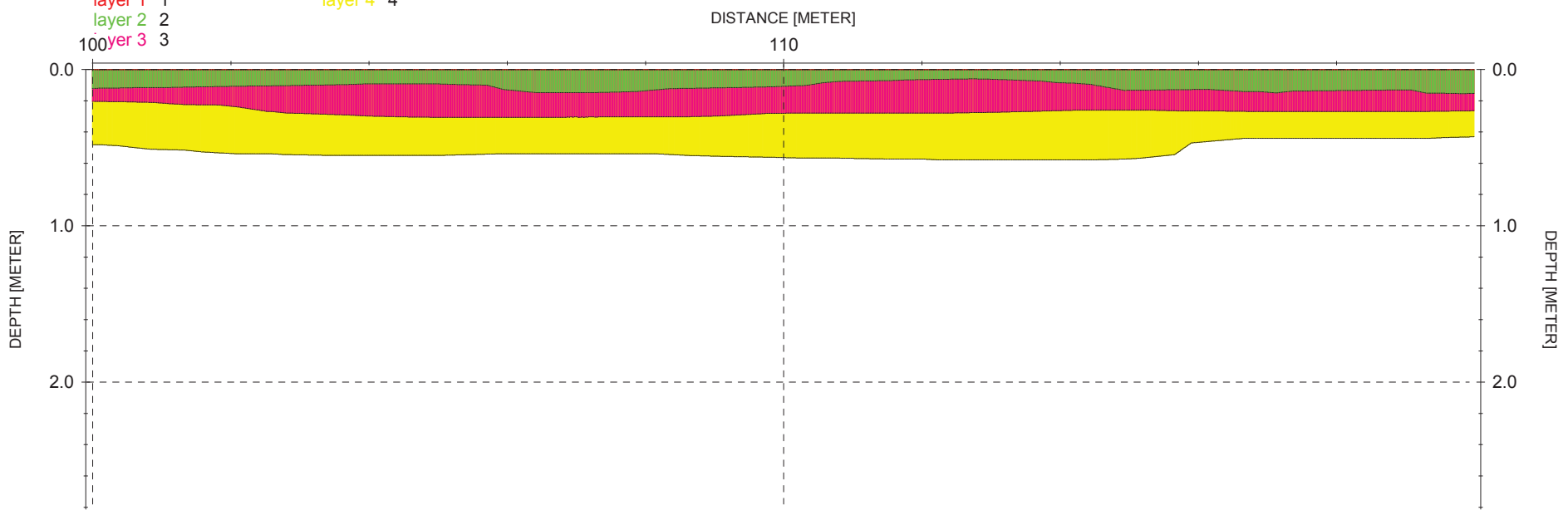
layer 1 1
layer 2 2
layer 3 3
layer 4 4



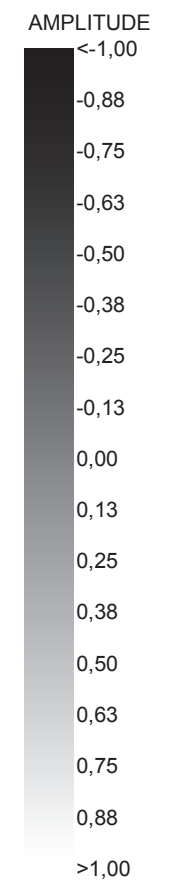
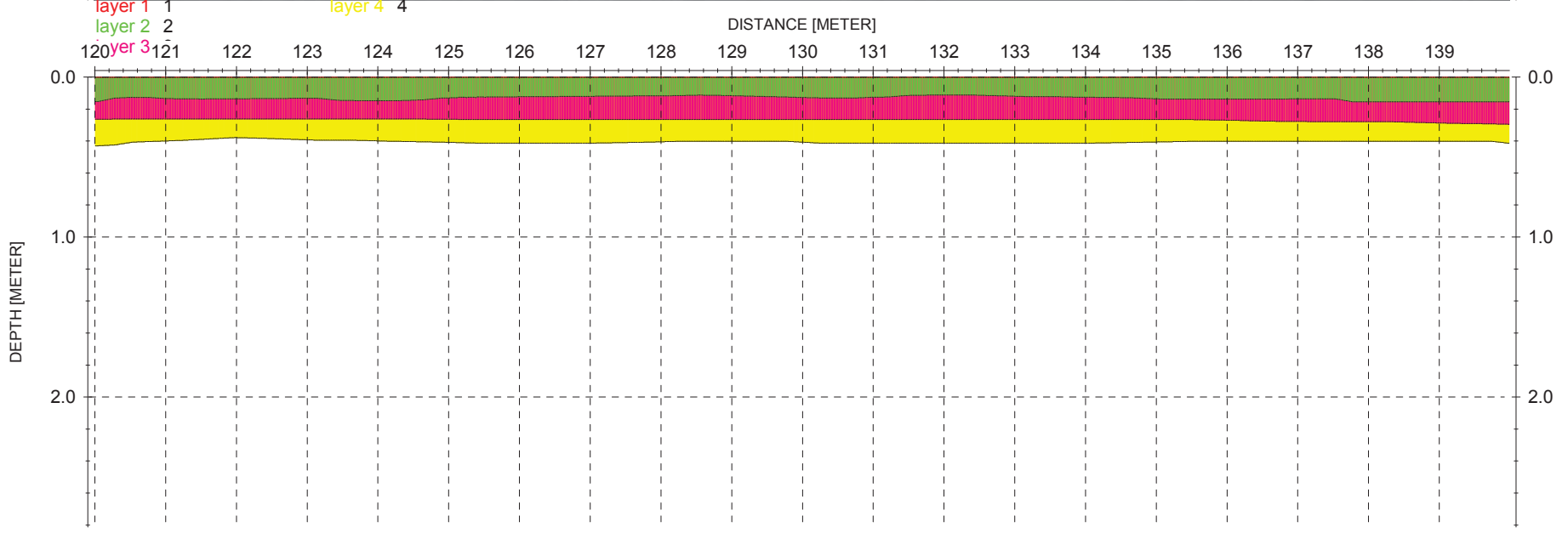
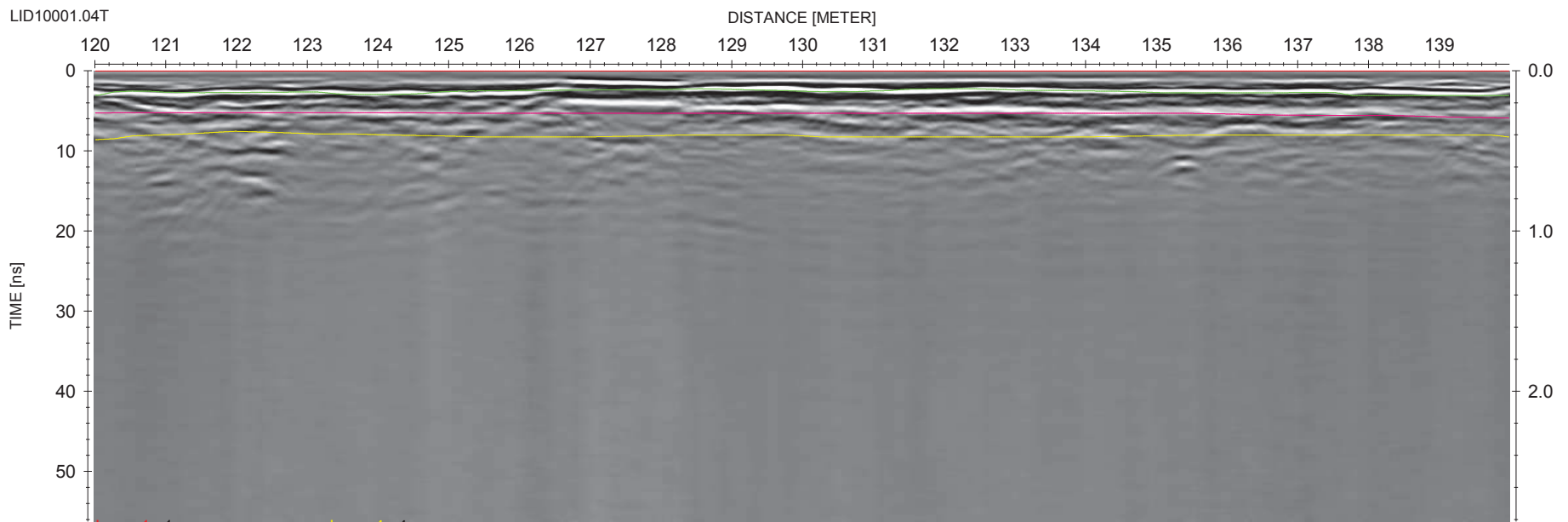
LID10001.04T



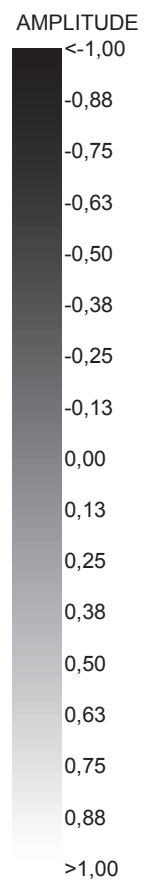
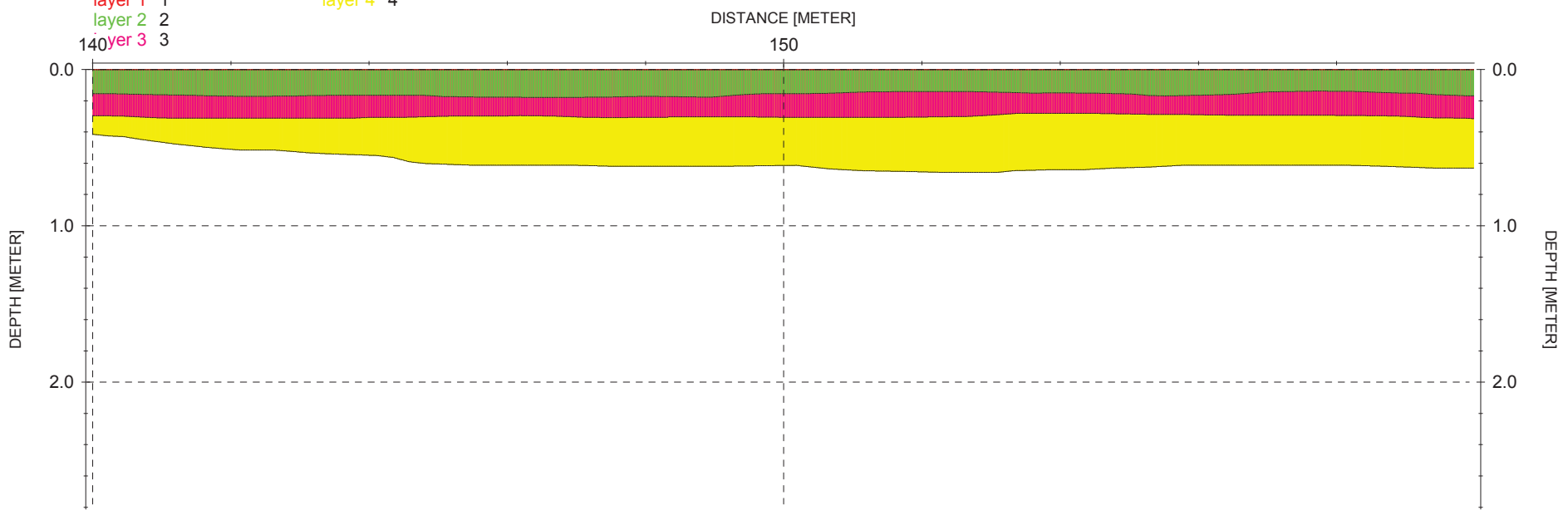
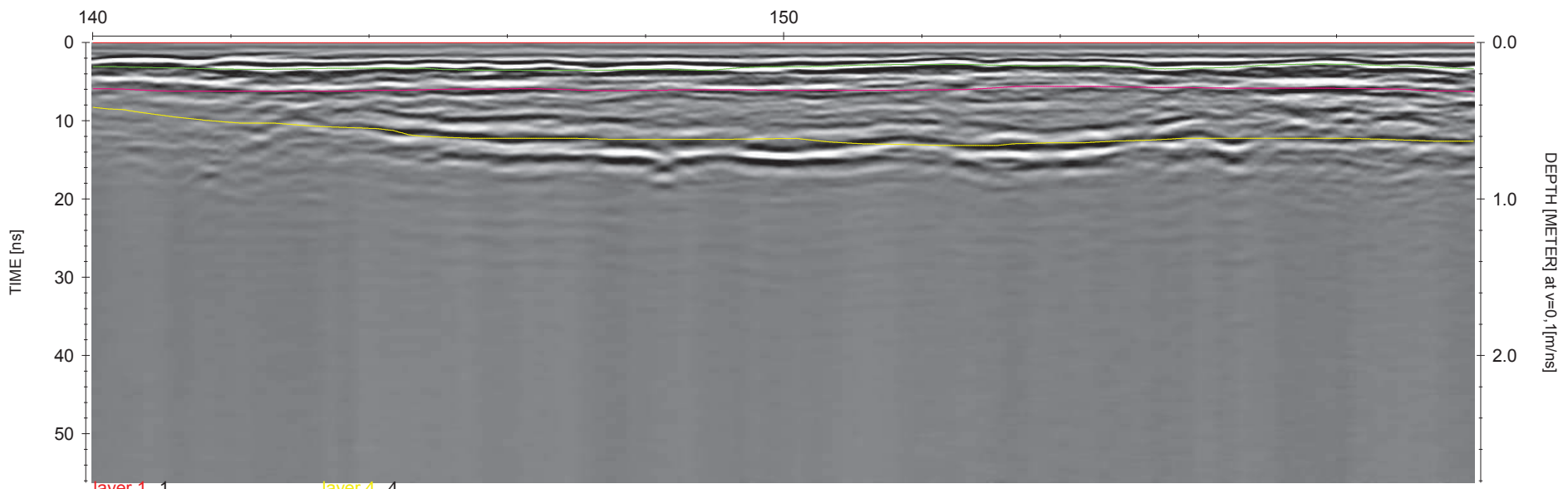
layer 1 1
layer 2 2
layer 3 3
layer 4 4



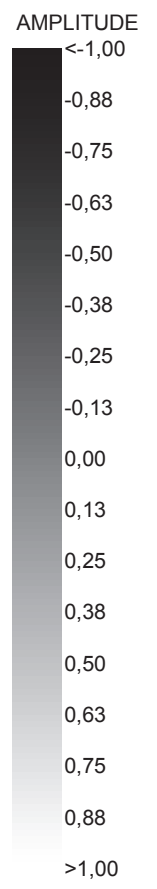
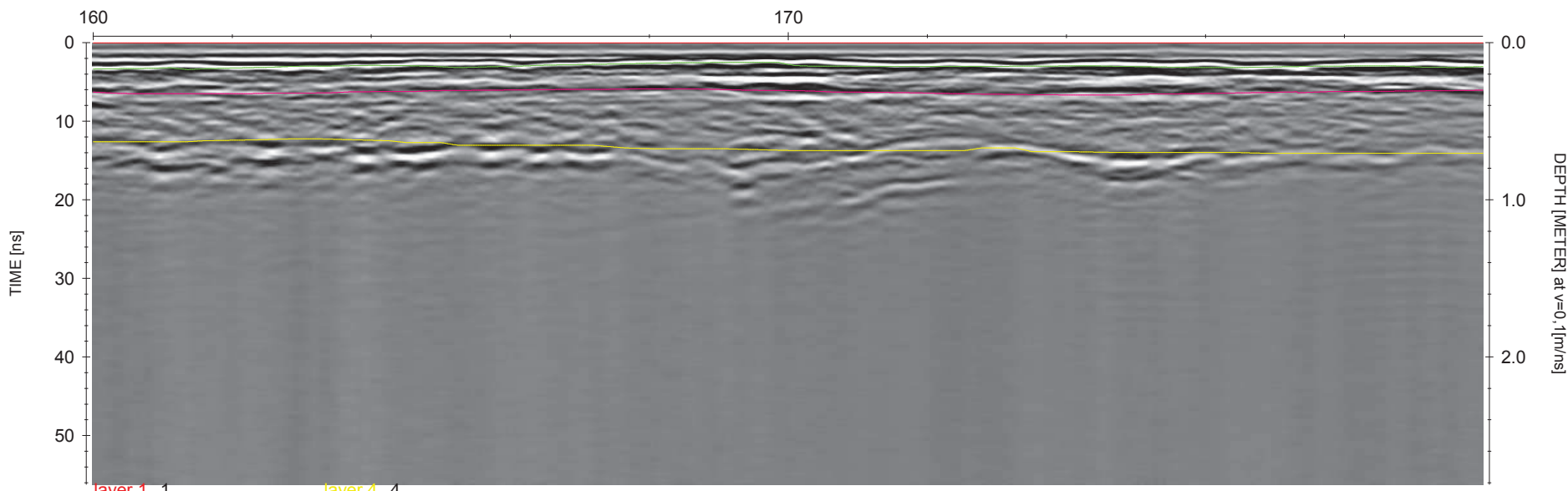
LID10001.04T



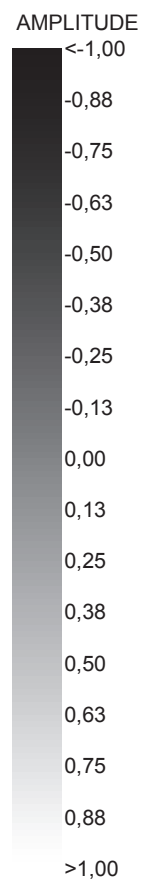
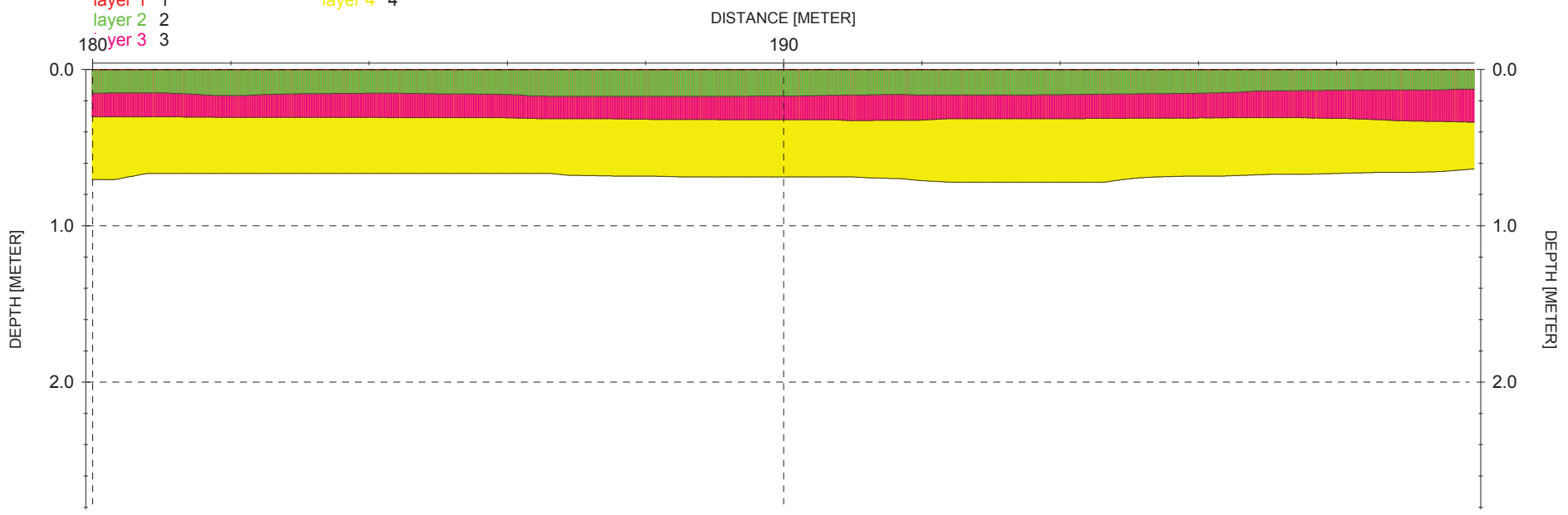
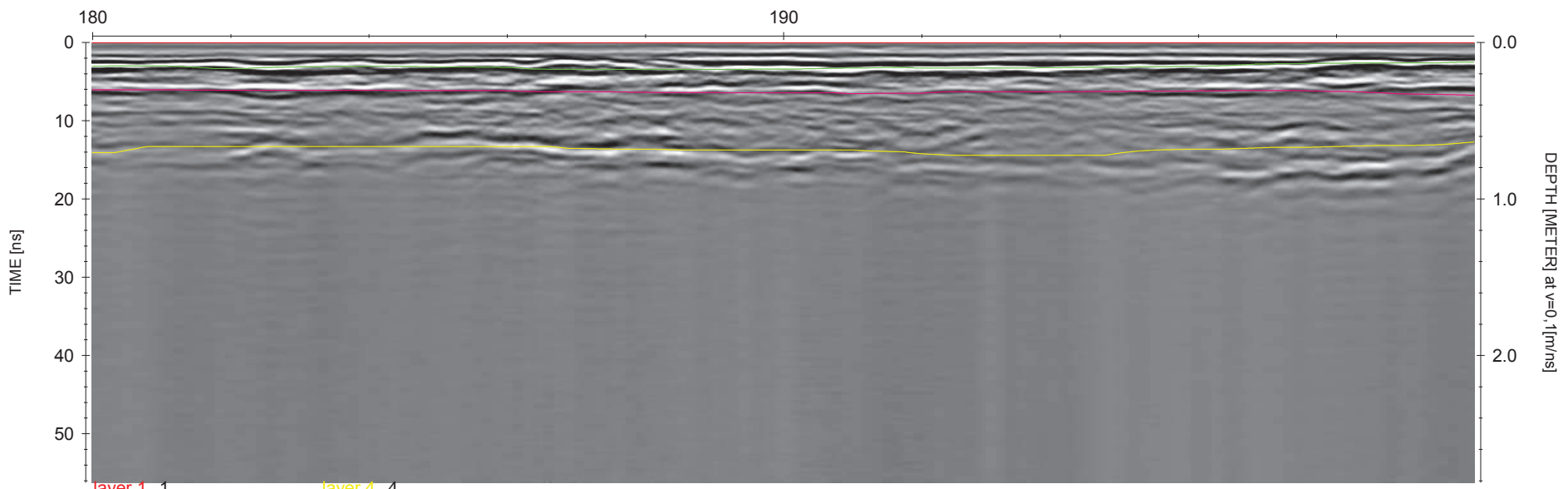
LID10001.04T



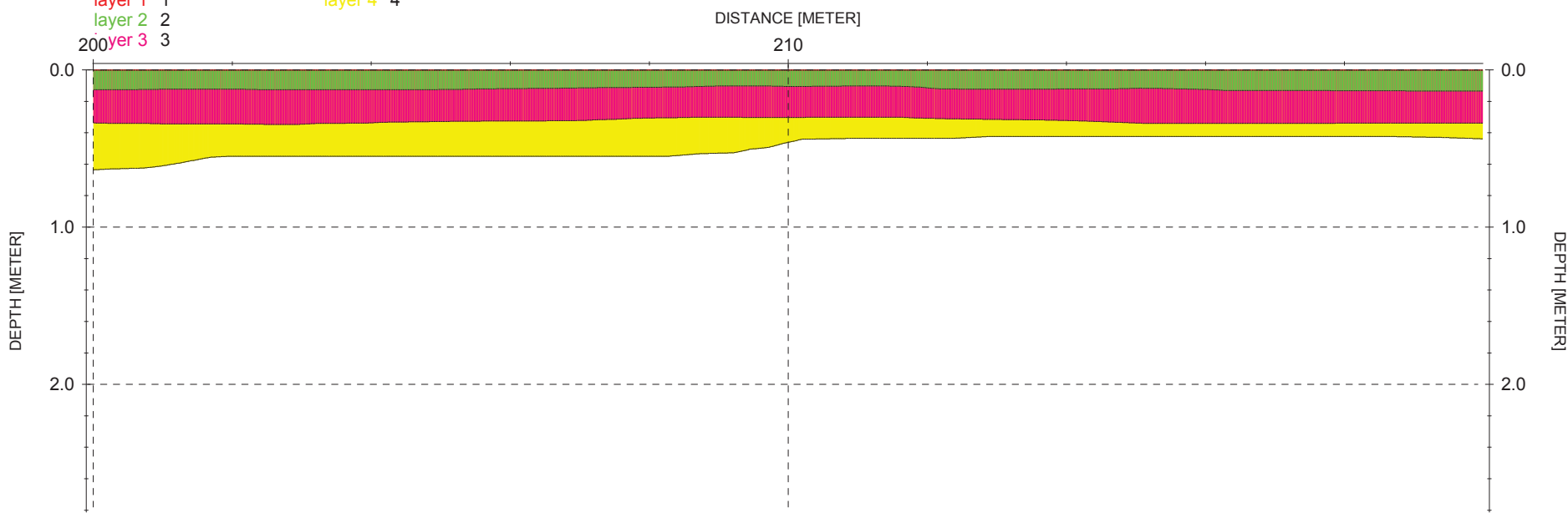
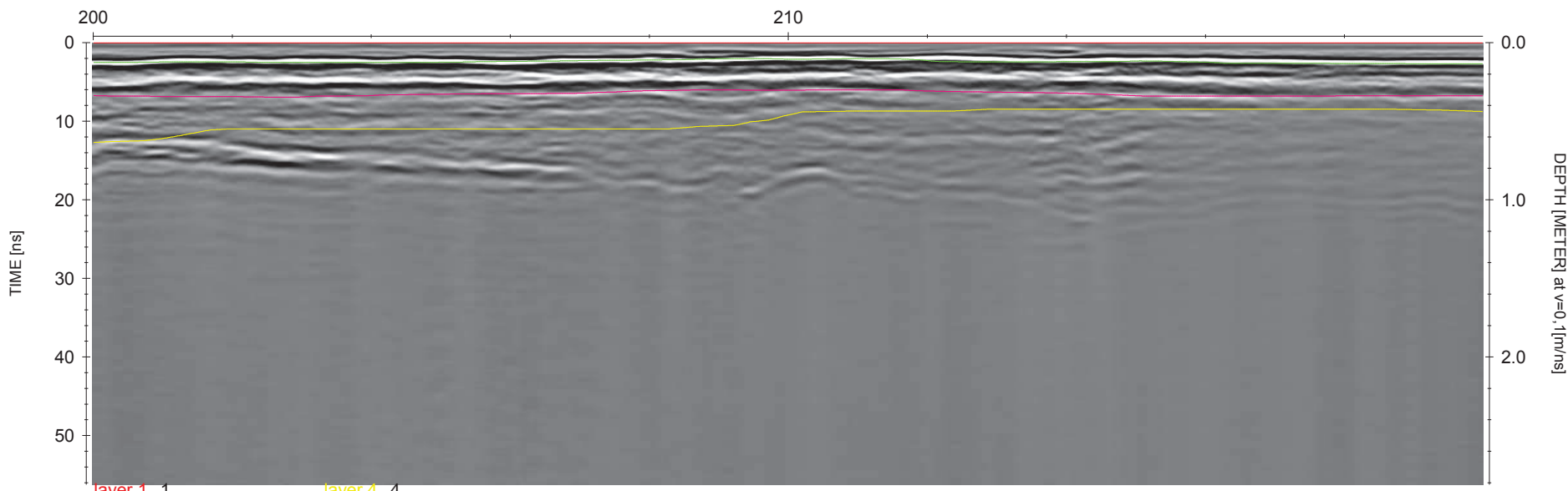
LID10001.04T



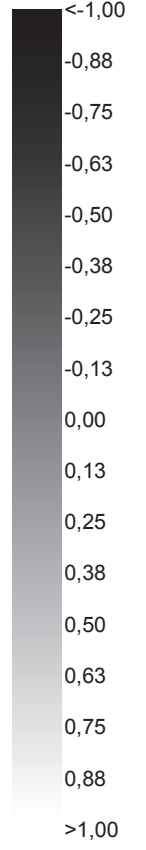
LID10001.04T



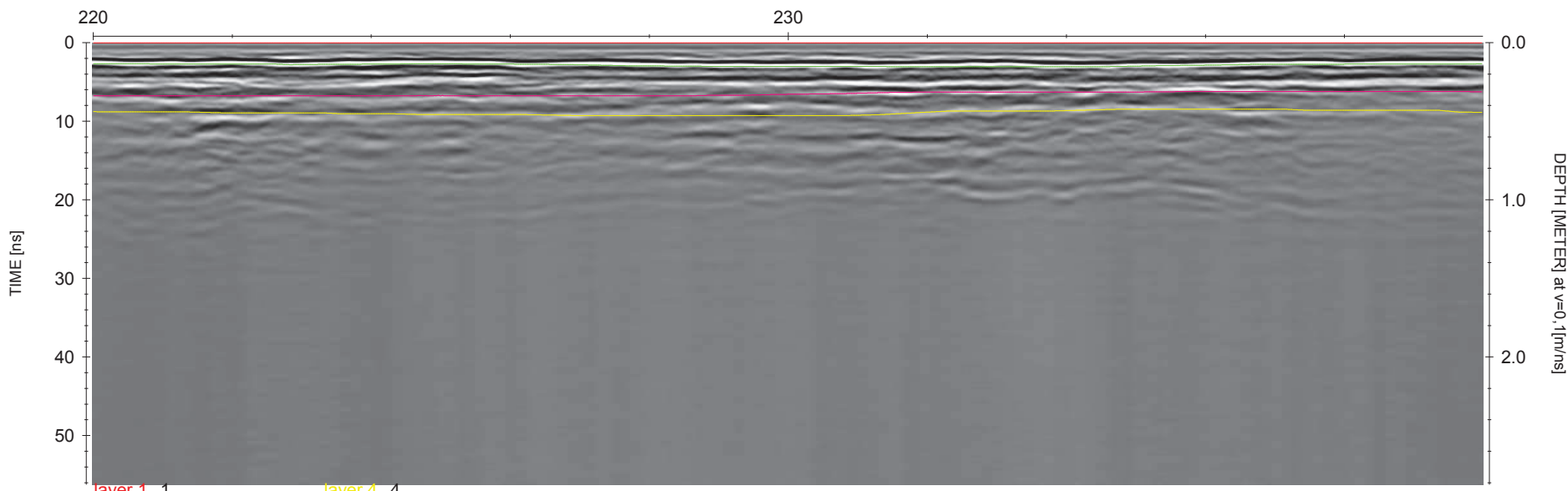
LID10001.04T



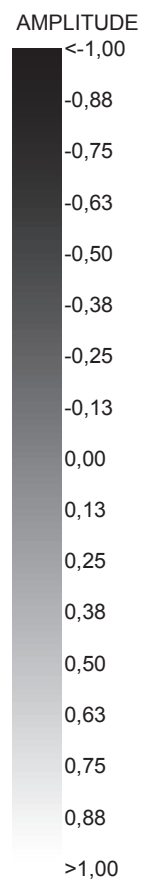
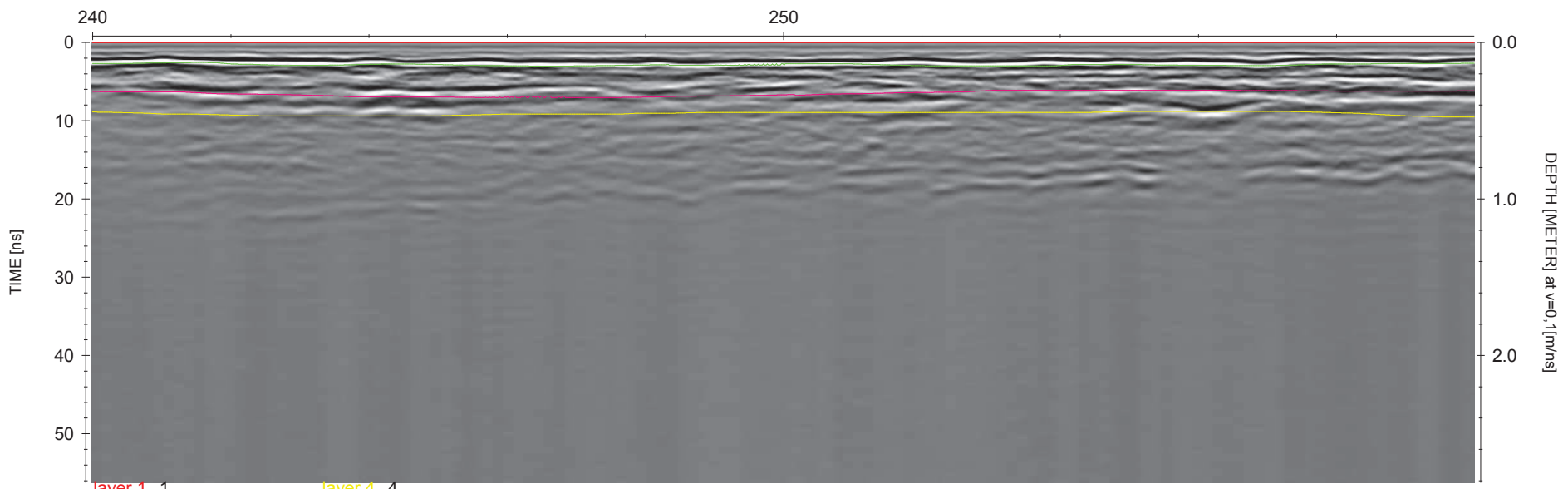
AMPLITUDE

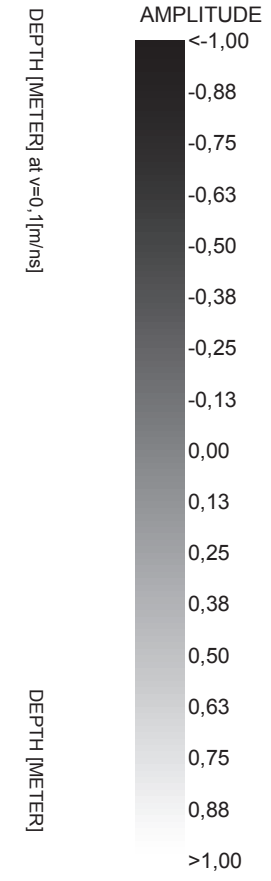
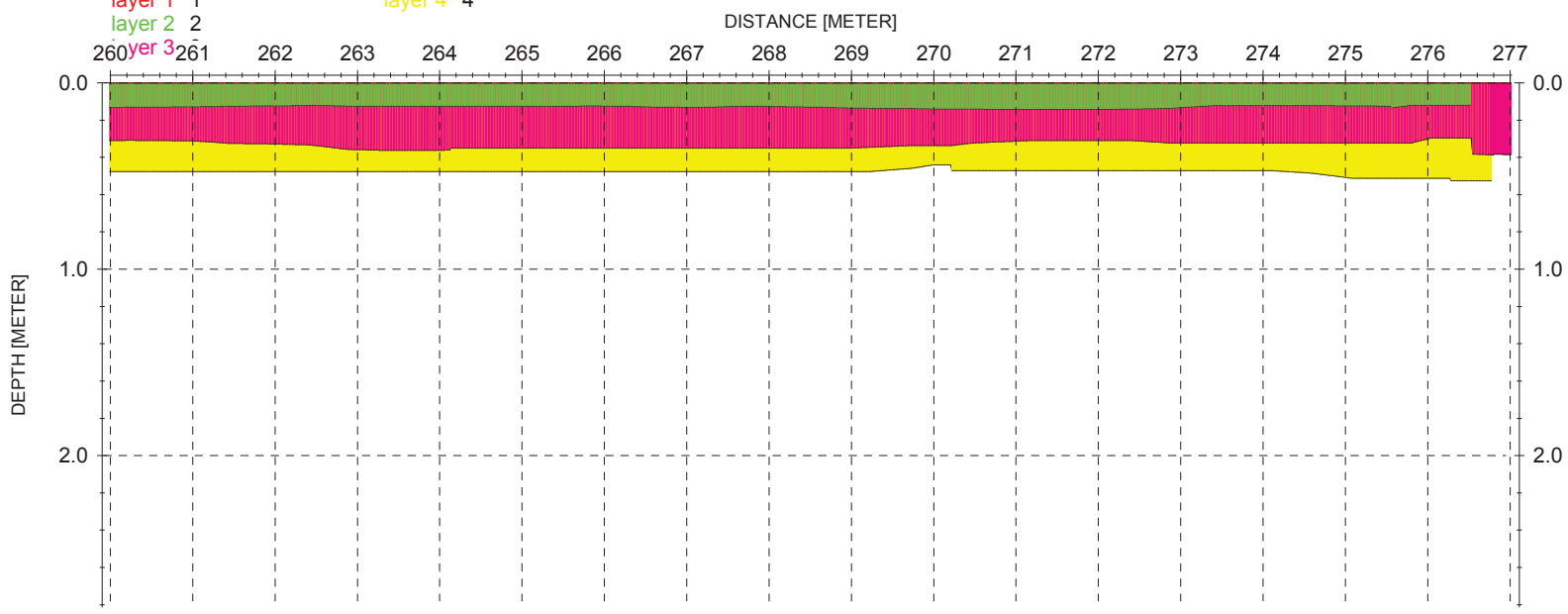
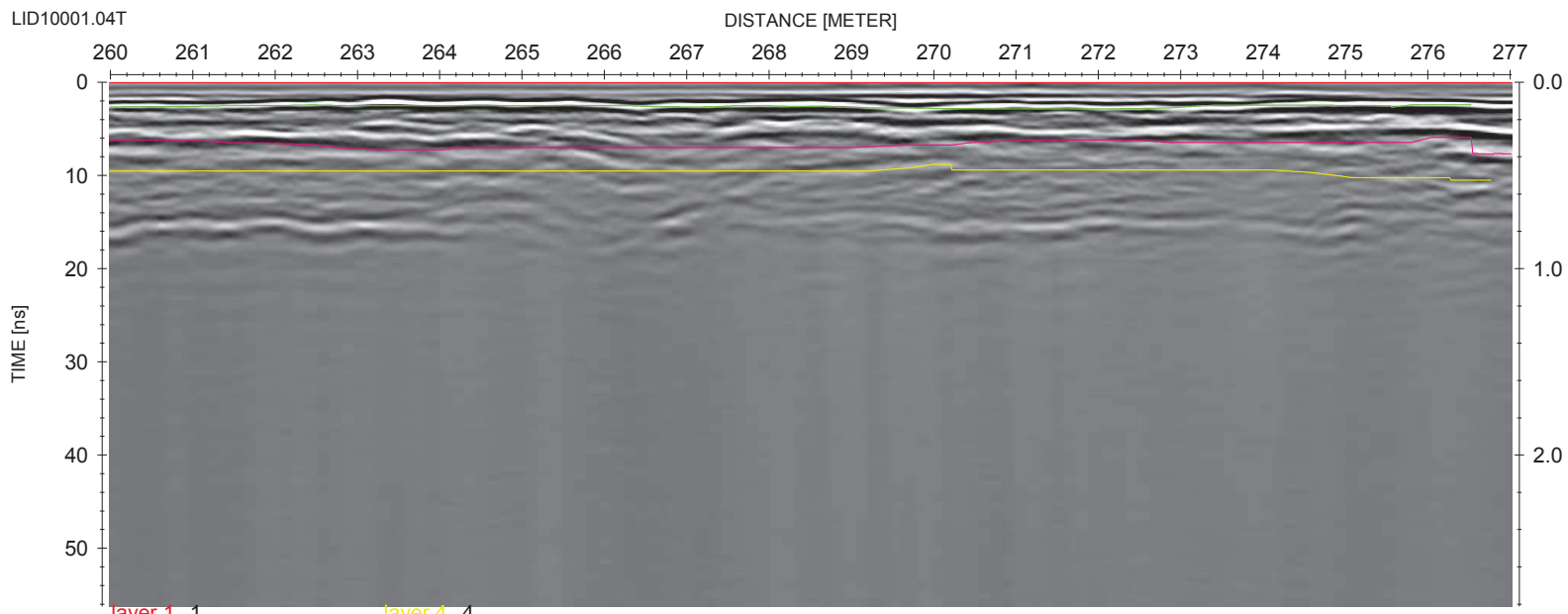


LID10001.04T



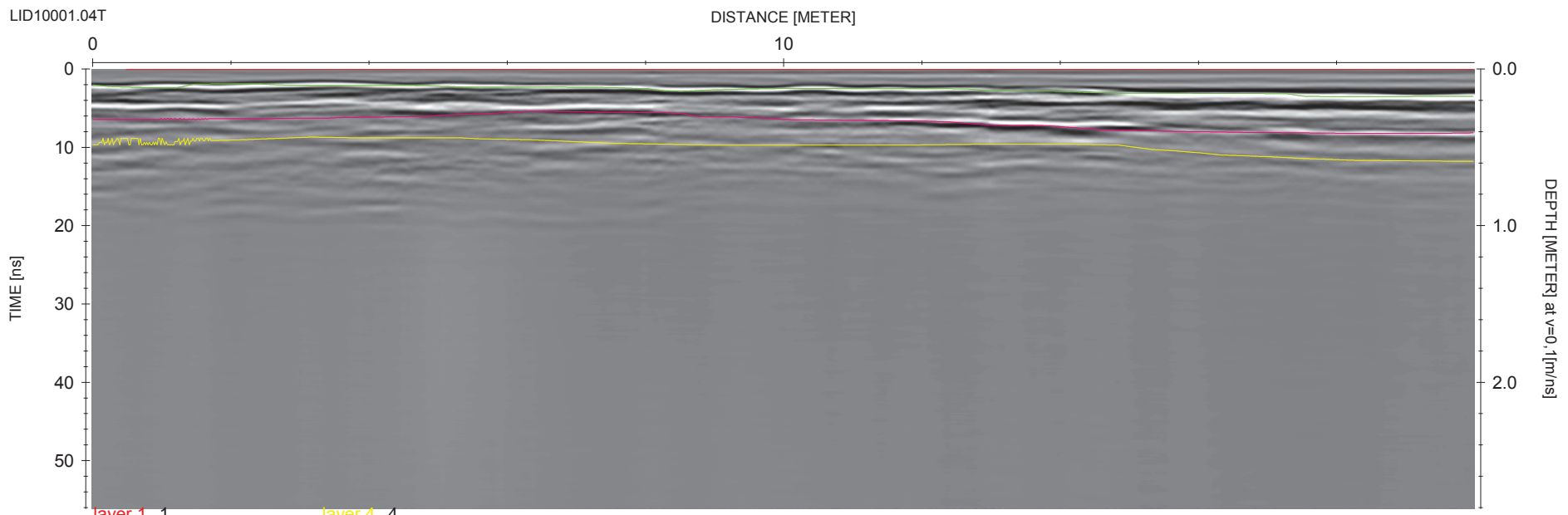
LID10001.04T



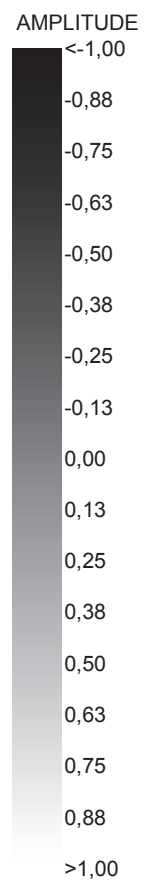


PŘÍLOHA B

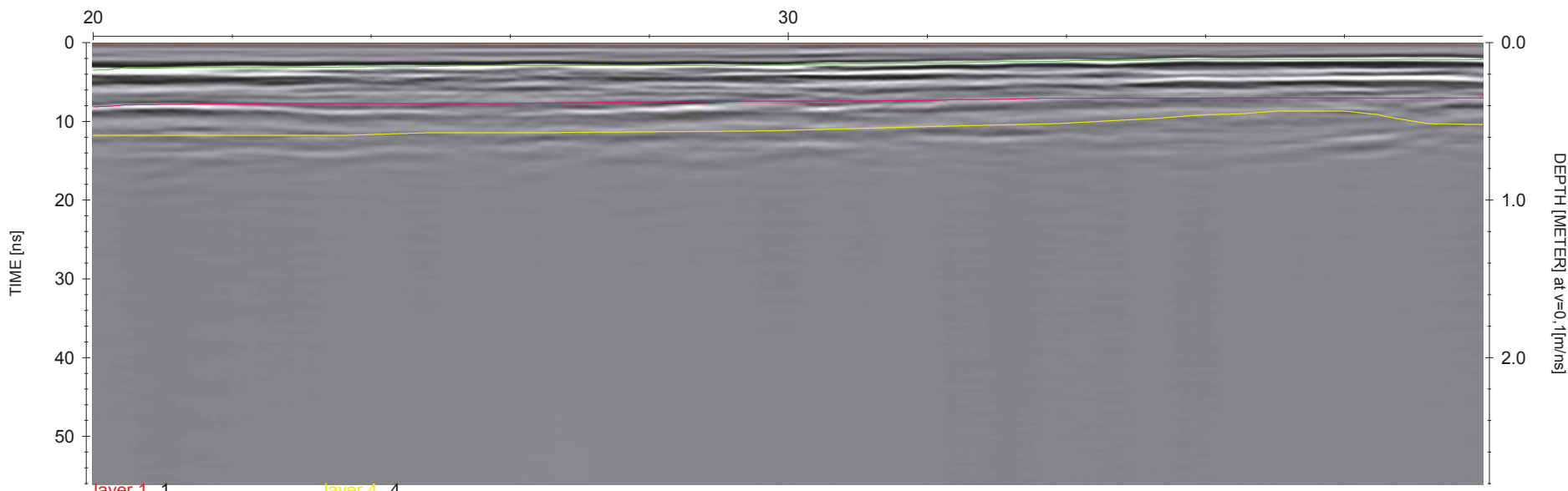
LID10001.04T



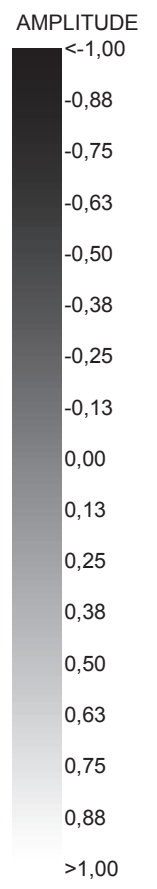
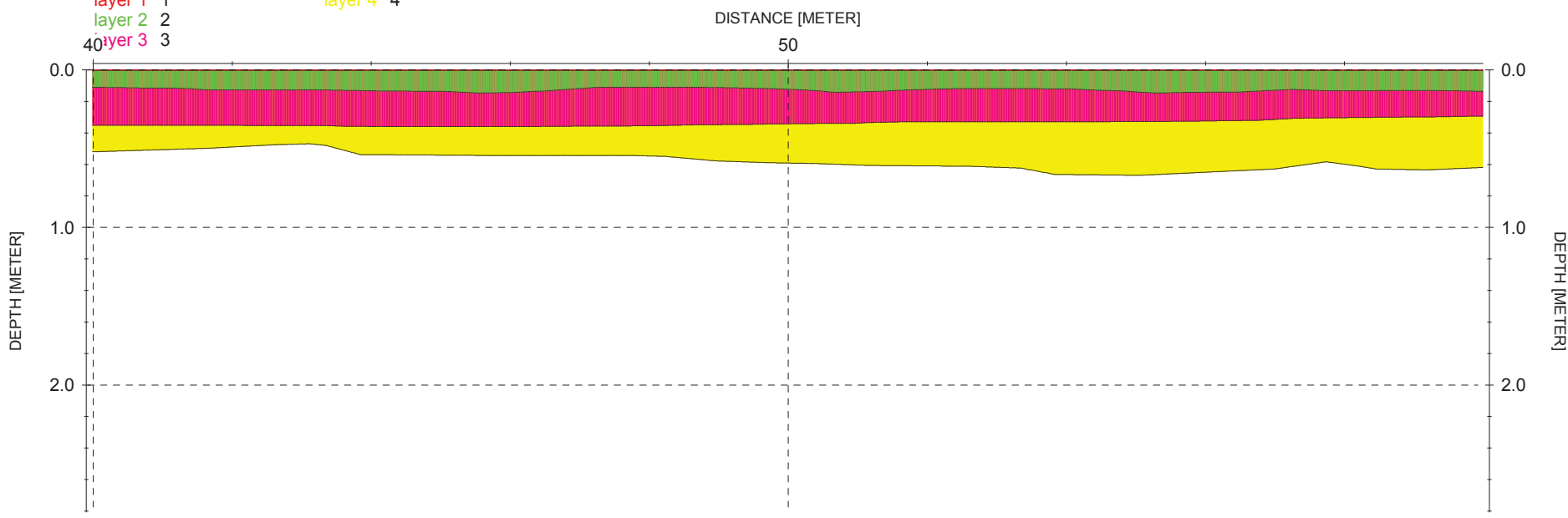
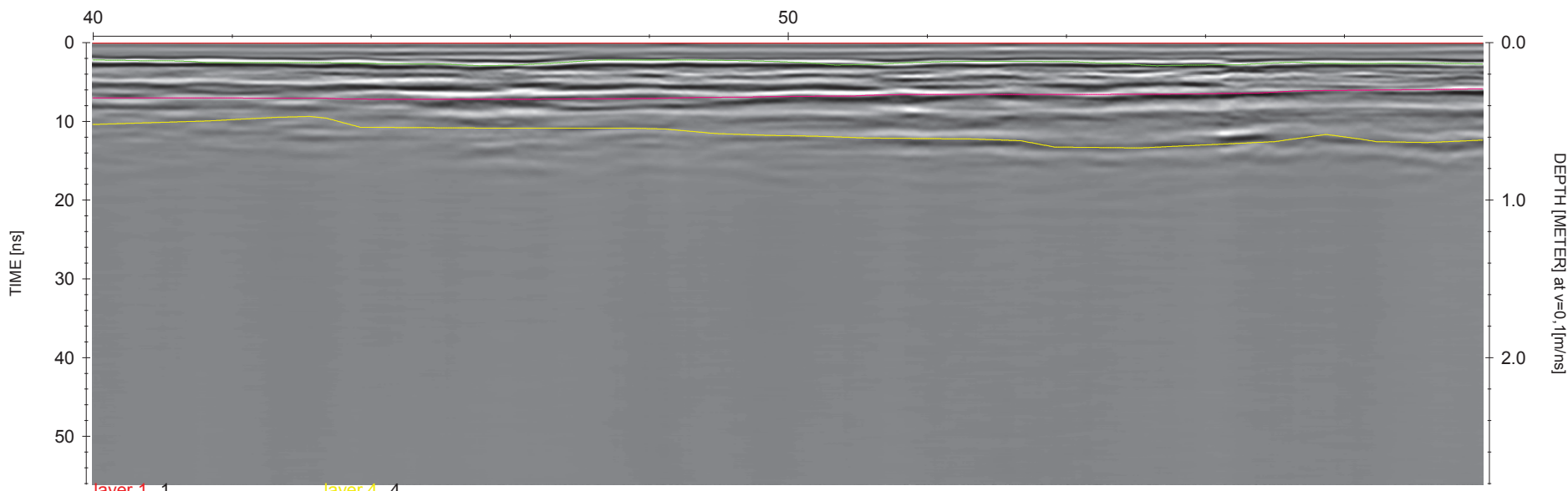
layer 1 1
layer 2 2
layer 3 3
layer 4 4



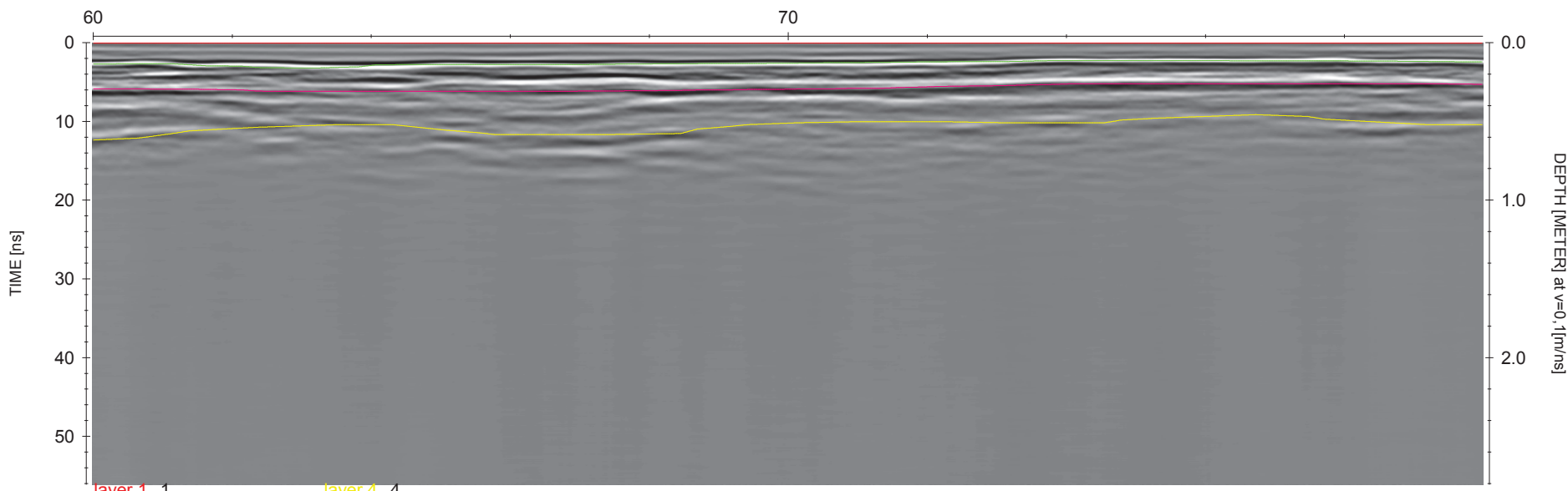
LID10001.04T



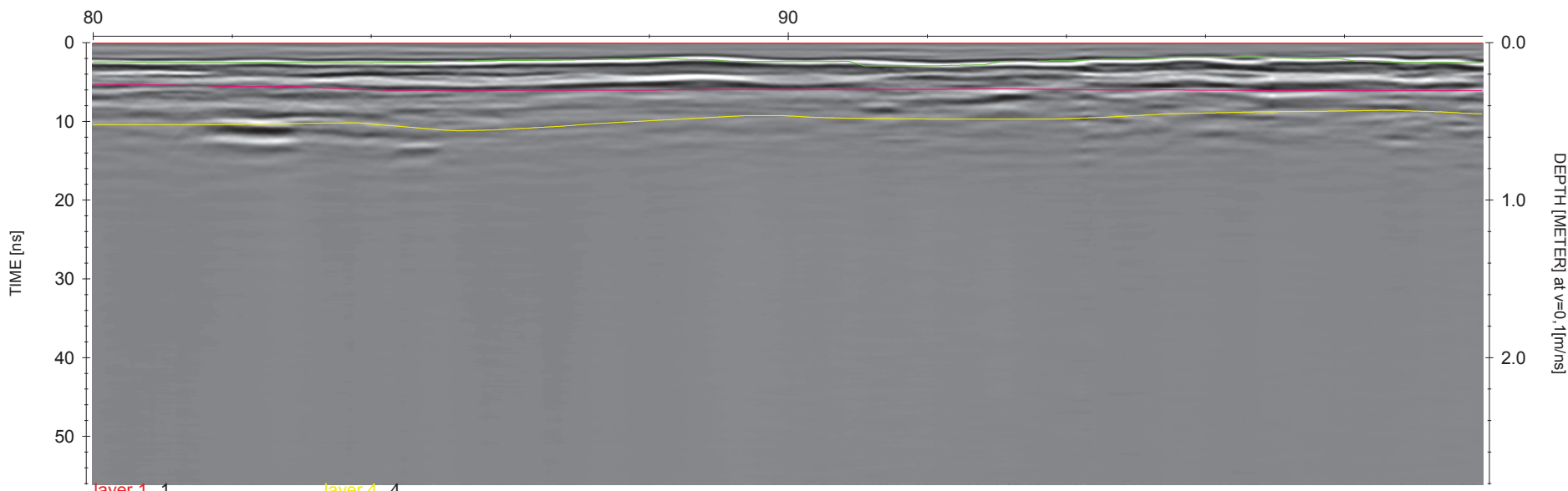
LID10001.04T



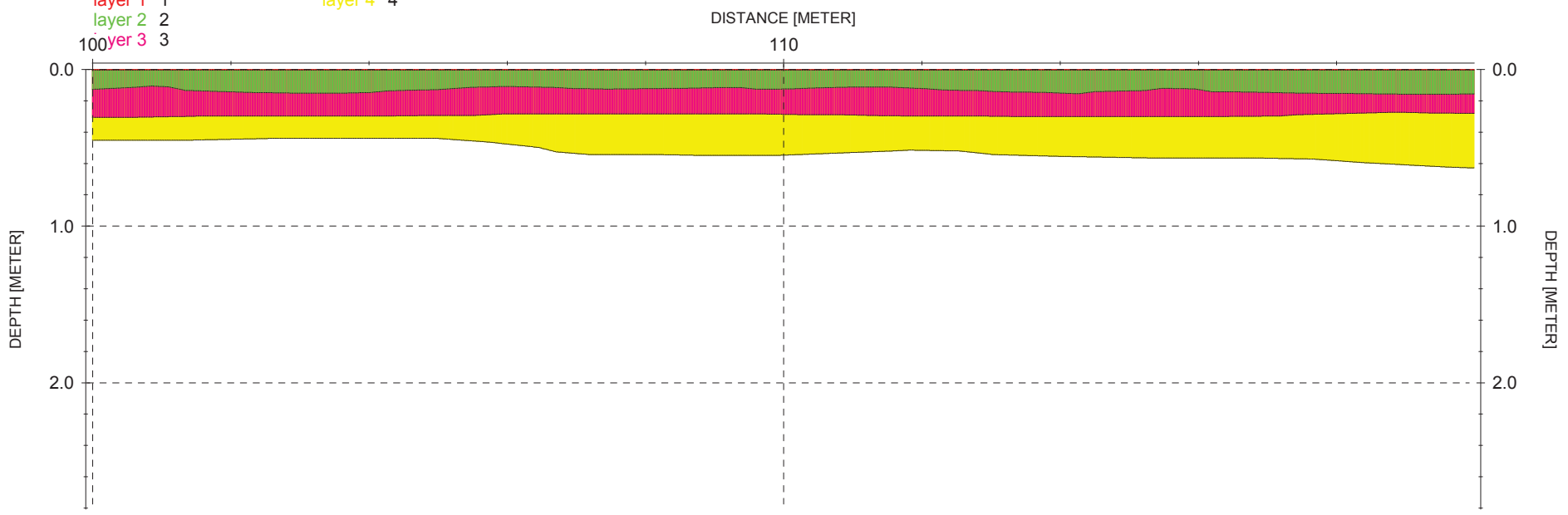
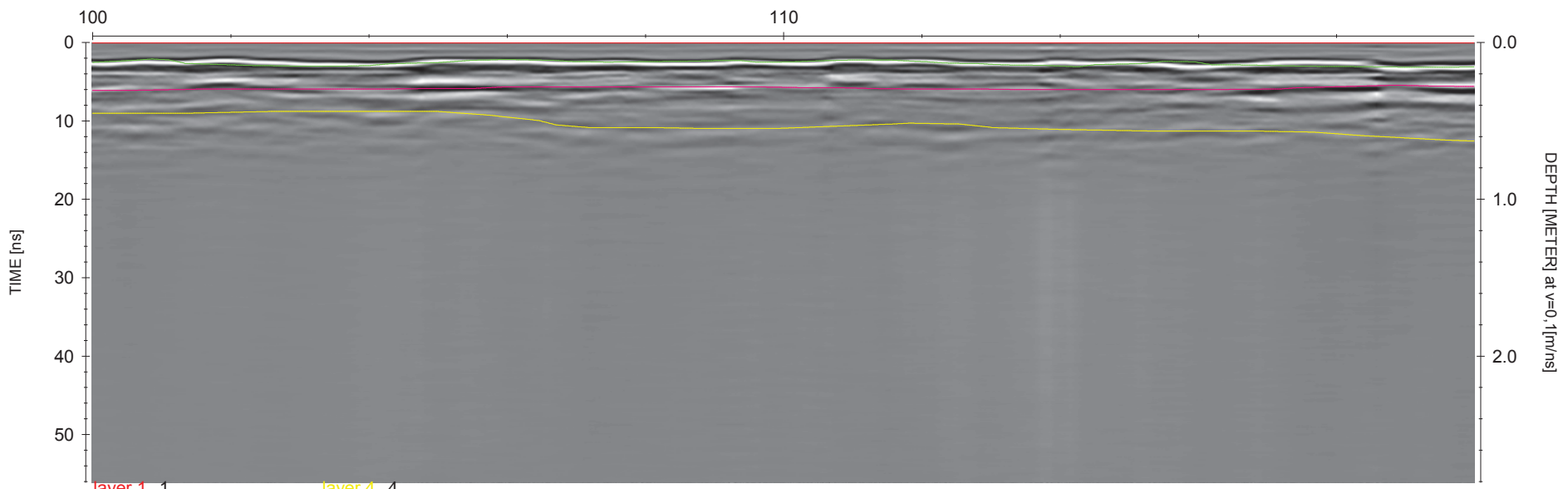
LID10001.04T

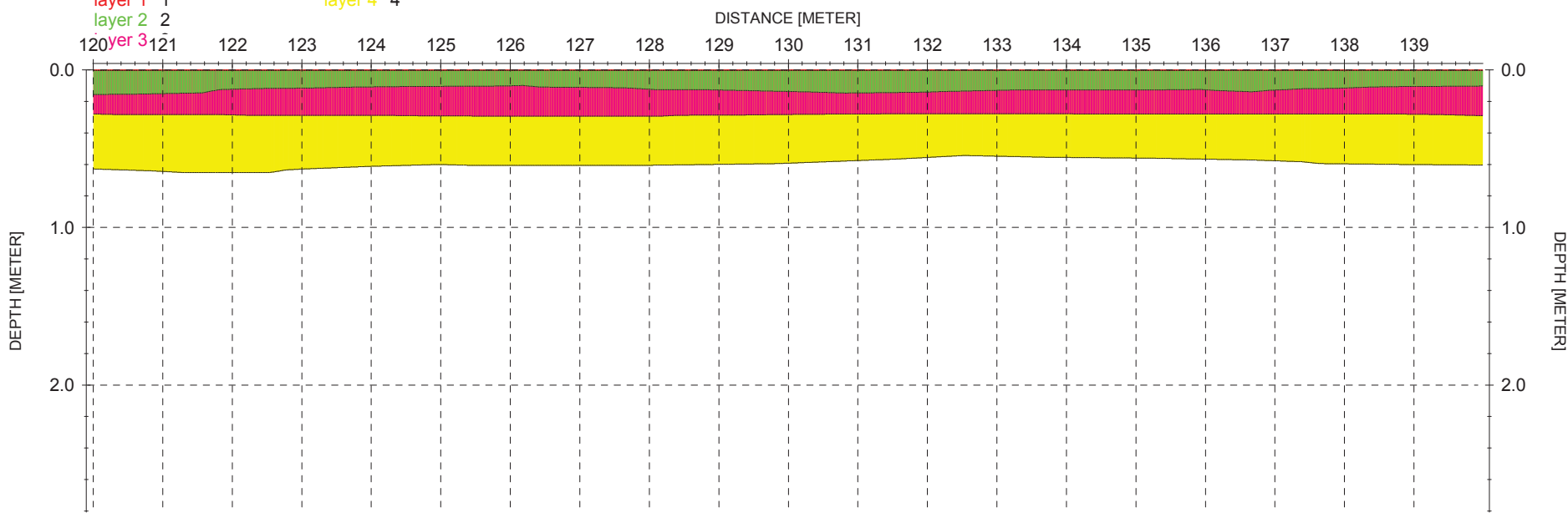
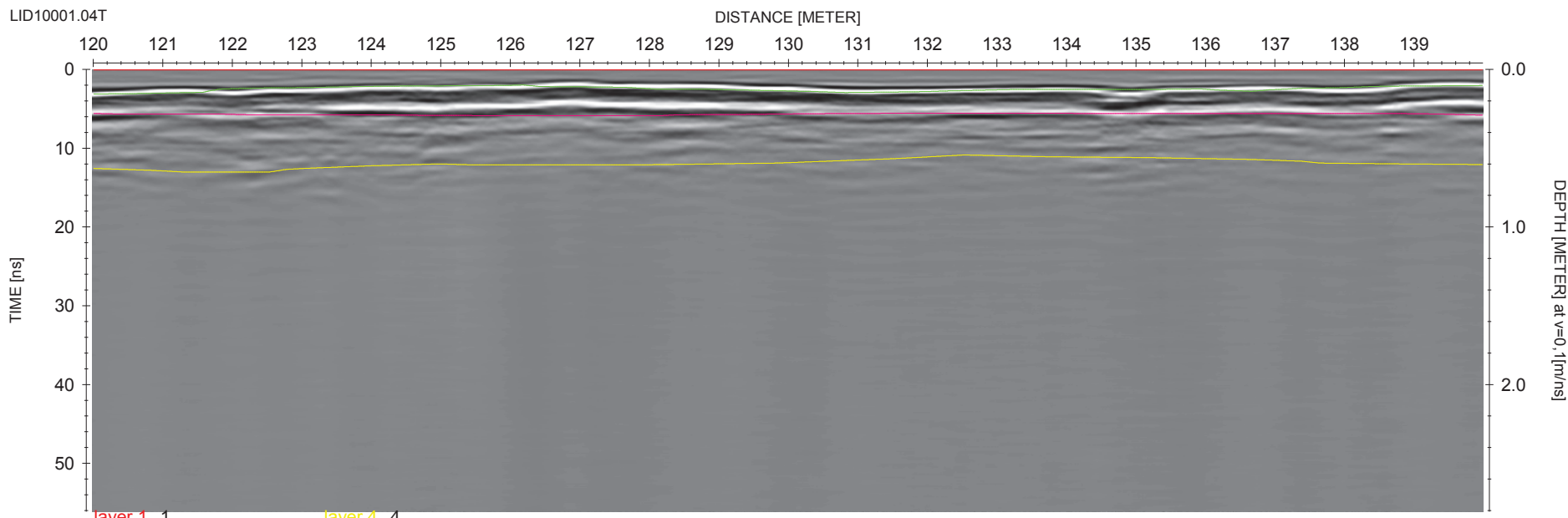


LID10001.04T

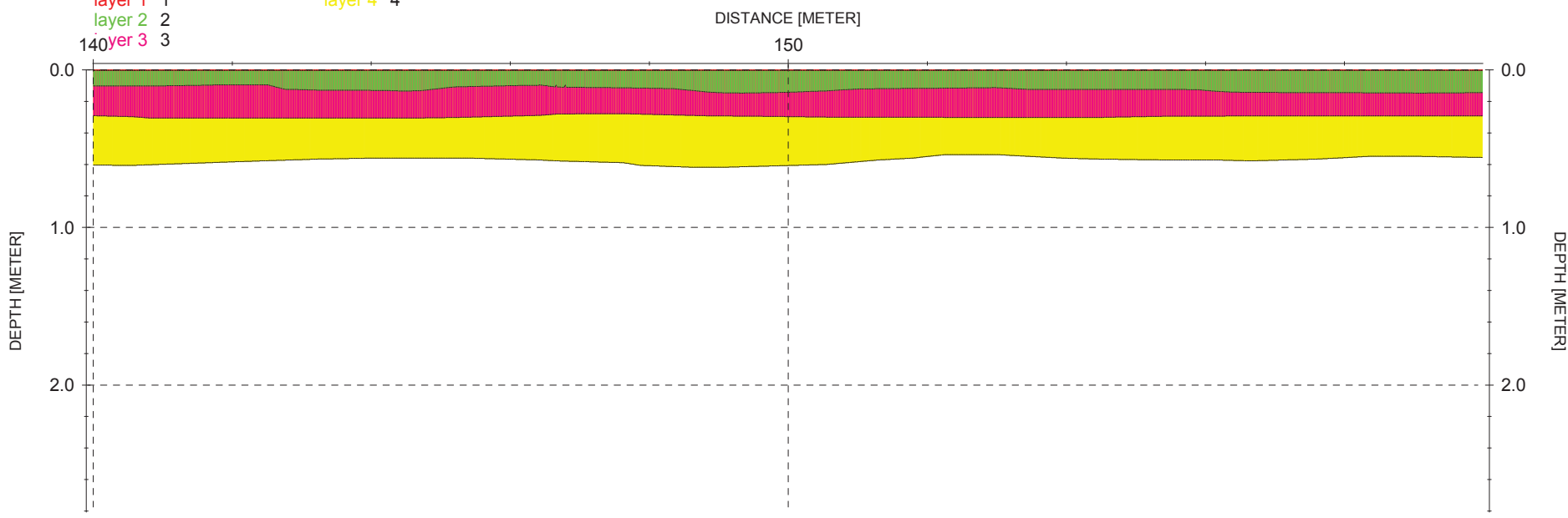
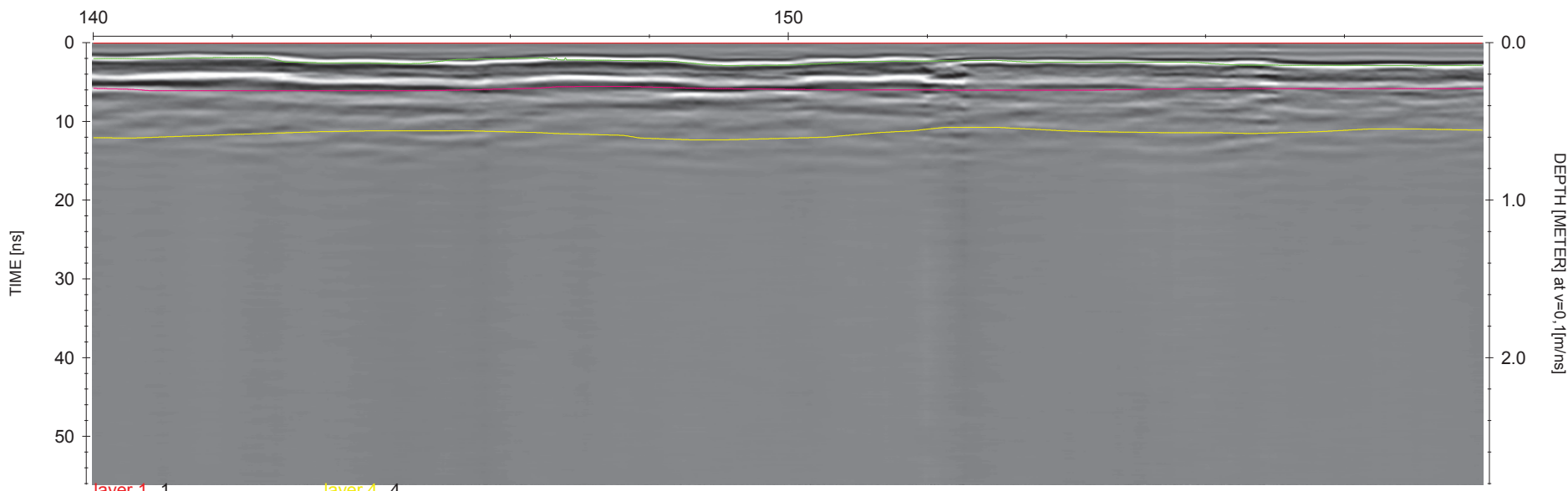


LID10001.04T

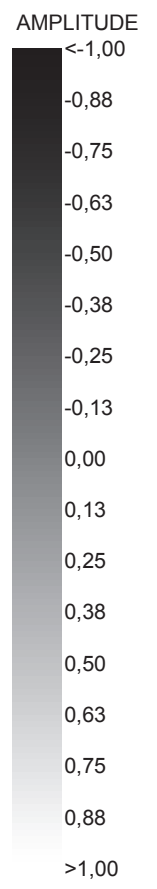
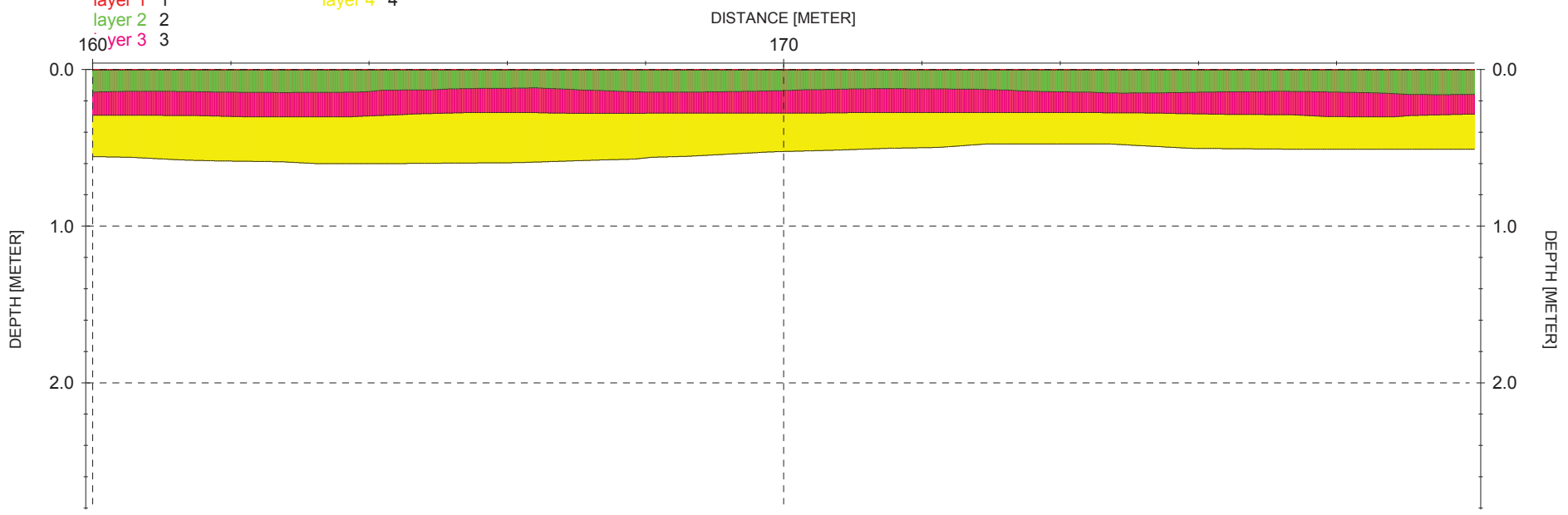
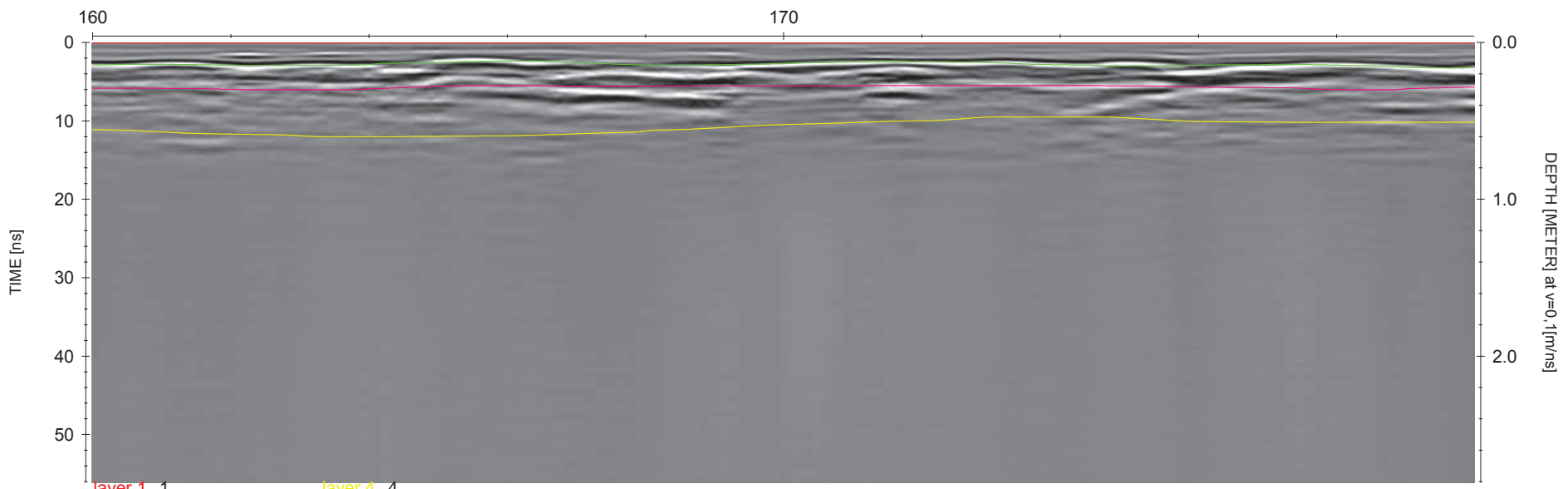




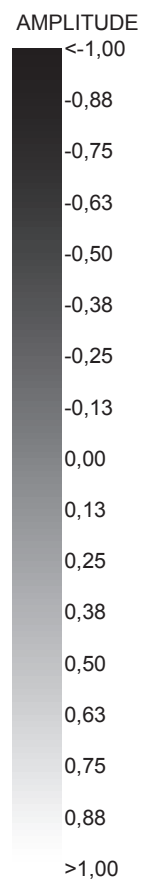
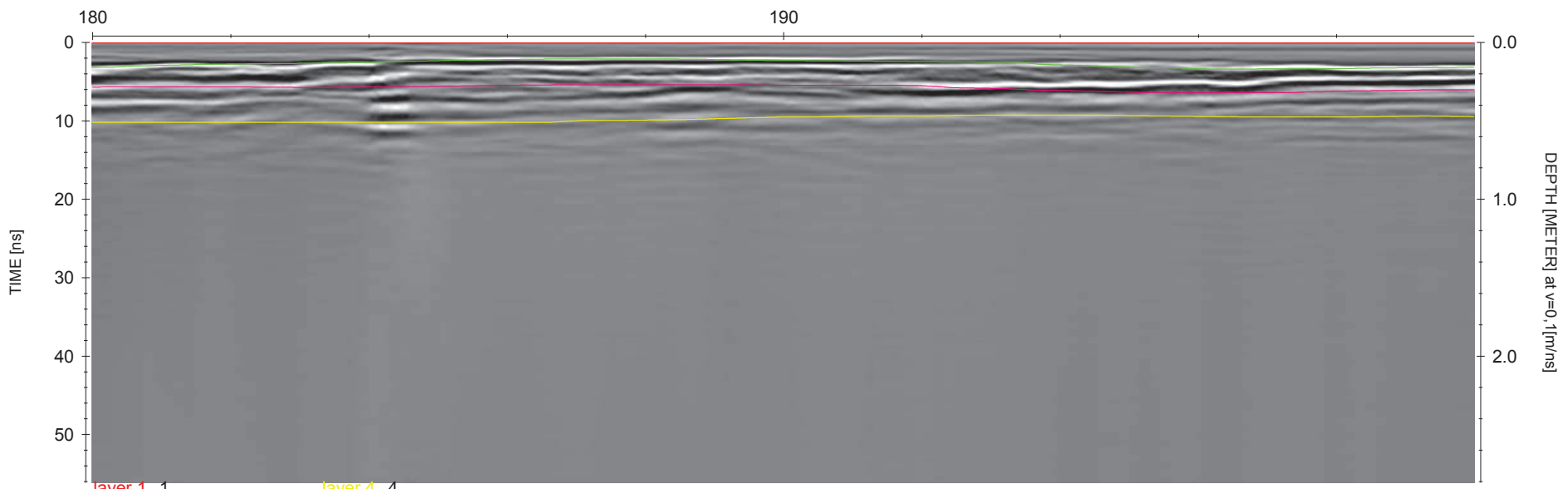
LID10001.04T



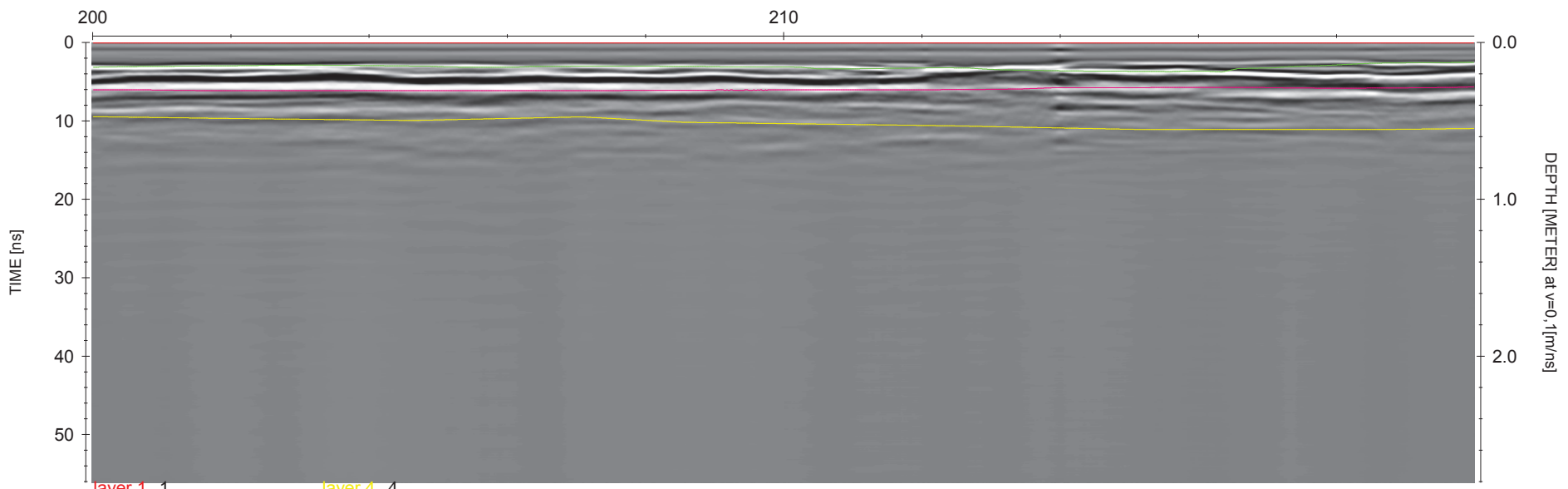
LID10001.04T



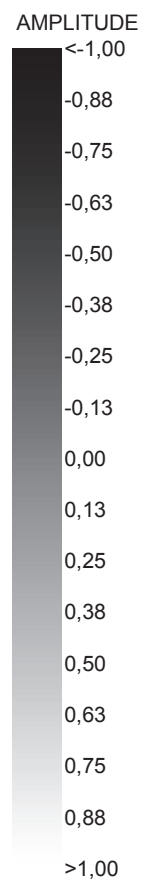
LID10001.04T



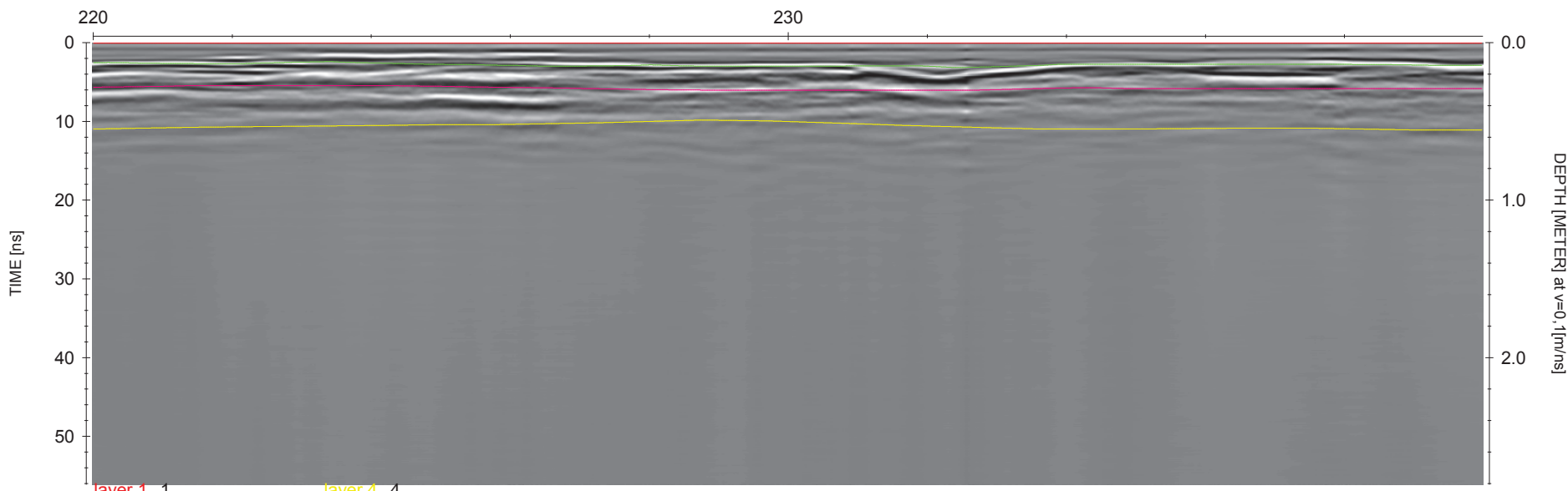
LID10001.04T



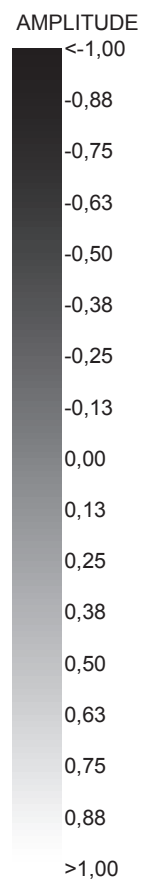
layer 1 1
layer 2 2
layer 3 3
layer 4 4



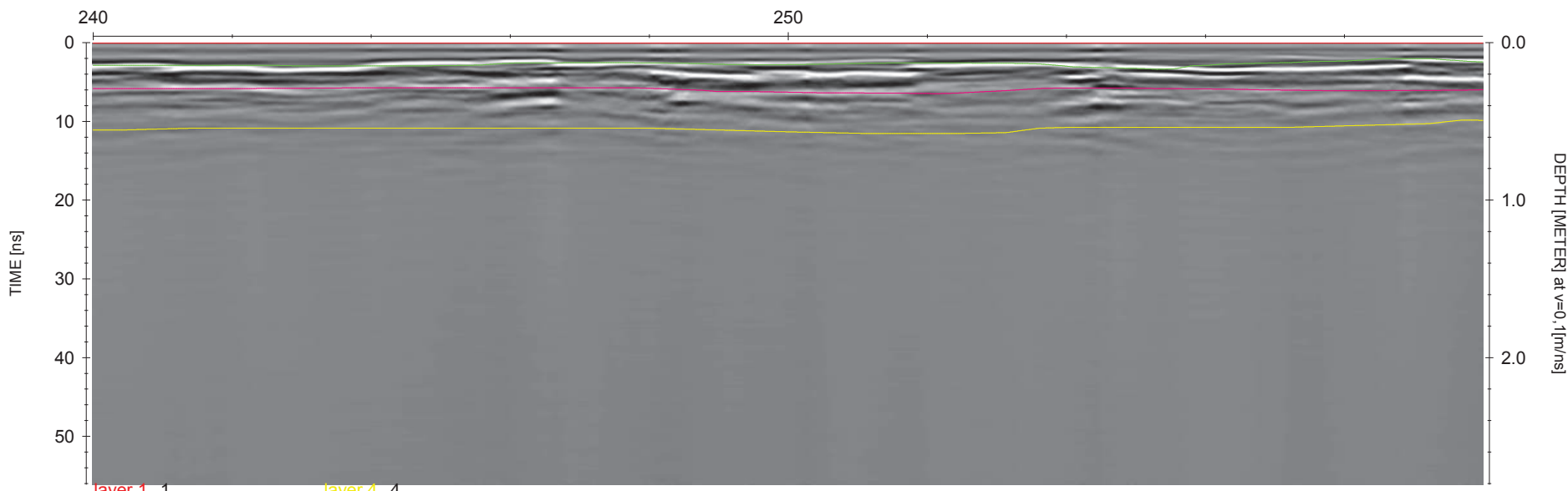
LID10001.04T



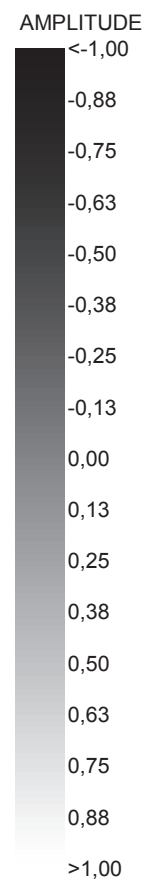
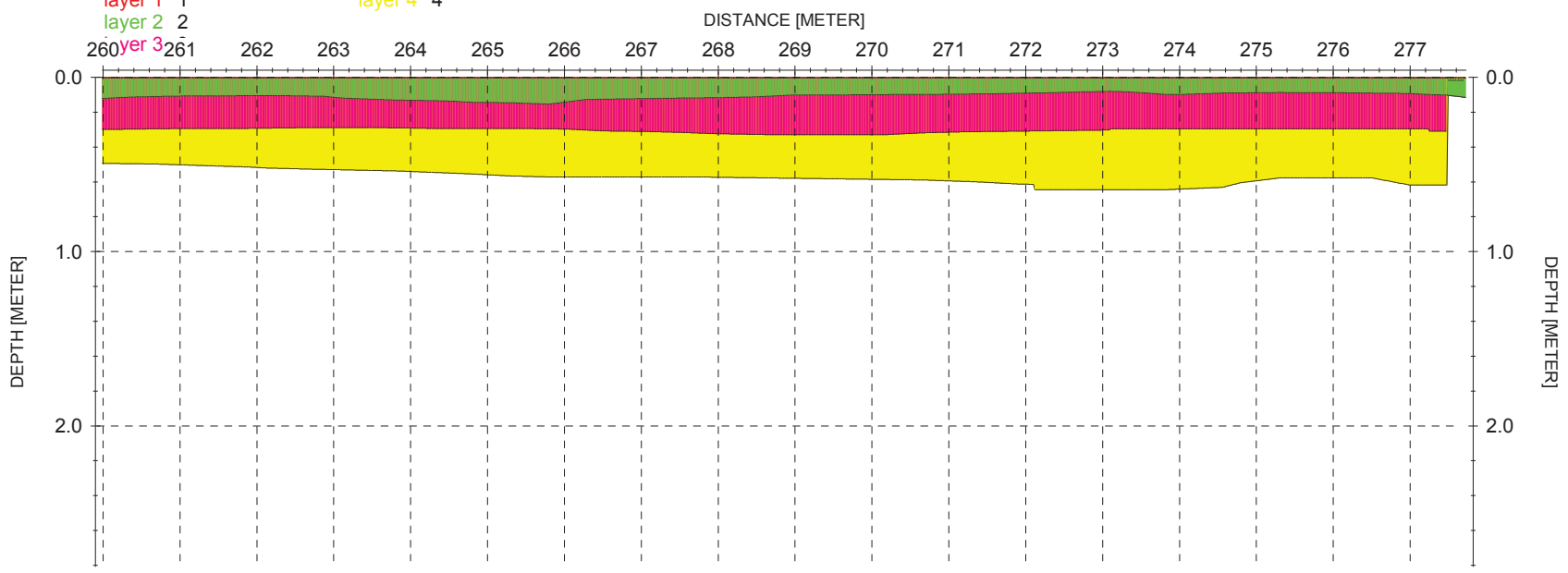
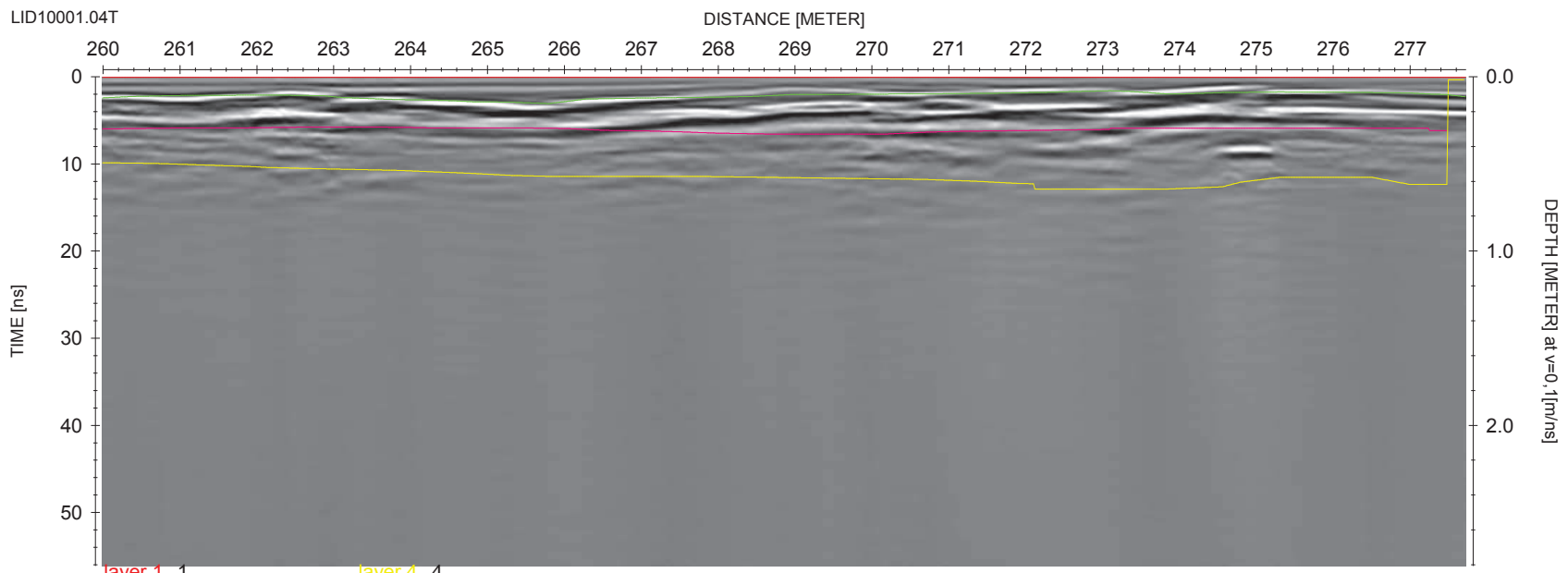
layer 1 1
layer 2 2
layer 3 3
layer 4 4



LID10001.04T



LID10001.04T



PŘÍLOHA C

PŘÍLOHA C – Tloušťky krytových vrstev v obou měřících profilech

	PRVNÍ MĚŘÍCÍ PROFIL	DRUHÝ MĚŘÍCÍ PROFIL
Distance [m]	Krytové vrstvy [m]	Krytové vrstvy [m]
0	0,064	0,110
1	0,074	0,112
2	0,075	0,092
3	0,064	0,100
4	0,072	0,102
5	0,089	0,107
6	0,094	0,112
7	0,081	0,114
8	0,071	0,127
9	0,061	0,130
10	0,068	0,122
11	0,064	0,122
12	0,06	0,123
13	0,059	0,134
14	0,066	0,142
15	0,067	0,151
16	0,065	0,153
17	0,062	0,157
18	0,061	0,173
19	0,063	0,173
20	0,063	0,167
21	0,063	0,156
22	0,063	0,155
23	0,063	0,153
24	0,062	0,150
25	0,058	0,146
26	0,056	0,143
27	0,068	0,143
28	0,083	0,143
29	0,084	0,143
30	0,076	0,135
31	0,068	0,130
32	0,063	0,126
33	0,063	0,118
34	0,086	0,112
35	0,091	0,108
36	0,091	0,104
37	0,087	0,104
38	0,079	0,104
39	0,073	0,104
40	0,069	0,108
41	0,065	0,116
42	0,071	0,125

43	0,07	0,125
44	0,063	0,131
45	0,06	0,137
46	0,074	0,136
47	0,084	0,112
48	0,091	0,107
49	0,107	0,111
50	0,119	0,126
51	0,122	0,133
52	0,122	0,119
53	0,133	0,117
54	0,125	0,122
55	0,121	0,139
56	0,129	0,137
57	0,145	0,126
58	0,148	0,129
59	0,141	0,128
60	0,132	0,132
61	0,129	0,137
62	0,137	0,151
63	0,157	0,156
64	0,157	0,139
65	0,146	0,136
66	0,14	0,136
67	0,134	0,135
68	0,13	0,131
69	0,13	0,129
70	0,129	0,126
71	0,128	0,122
72	0,124	0,118
73	0,123	0,115
74	0,131	0,111
75	0,134	0,111
76	0,133	0,111
77	0,136	0,112
78	0,14	0,114
79	0,138	0,117
80	0,129	0,120
81	0,119	0,123
82	0,114	0,123
83	0,11	0,124
84	0,116	0,123
85	0,125	0,114
86	0,125	0,110
87	0,116	0,103
88	0,116	0,102
89	0,129	0,116
90	0,132	0,117
91	0,126	0,143
92	0,135	0,141
93	0,144	0,116
94	0,131	0,106

95	0,123	0,095
96	0,117	0,088
97	0,113	0,097
98	0,127	0,116
99	0,123	0,123
100	0,116	0,114
101	0,11	0,127
102	0,104	0,144
103	0,096	0,148
104	0,09	0,133
105	0,1	0,113
106	0,143	0,110
107	0,143	0,121
108	0,122	0,117
109	0,112	0,118
110	0,089	0,115
111	0,069	0,111
112	0,06	0,129
113	0,07	0,142
115	0,104	0,142
116	0,129	0,124
117	0,135	0,139
118	0,138	0,148
119	0,131	0,152
120	0,148	0,155
121	0,131	0,151
122	0,135	0,136
123	0,133	0,115
124	0,142	0,108
125	0,14	0,103
126	0,123	0,100
127	0,12	0,104
128	0,117	0,112
129	0,113	0,124
130	0,121	0,130
131	0,128	0,140
132	0,115	0,140
133	0,114	0,131
134	0,122	0,125
135	0,129	0,125
136	0,137	0,123
137	0,136	0,130
138	0,143	0,116
139	0,153	0,105
140	0,153	0,101
141	0,157	0,099
142	0,166	0,094
143	0,169	0,107
144	0,164	0,126
145	0,165	0,125
146	0,174	0,101
147	0,177	0,102

148	0,173	0,111
149	0,173	0,129
150	0,157	0,141
151	0,149	0,126
152	0,14	0,115
153	0,141	0,112
154	0,148	0,120
155	0,153	0,121
156	0,165	0,124
157	0,151	0,139
158	0,138	0,141
159	0,146	0,143
160	0,162	0,142
161	0,162	0,137
162	0,164	0,140
163	0,153	0,144
164	0,146	0,140
165	0,149	0,127
166	0,152	0,118
167	0,141	0,121
168	0,132	0,137
169	0,126	0,140
170	0,131	0,134
171	0,149	0,123
172	0,151	0,120
173	0,15	0,124
174	0,148	0,137
175	0,149	0,145
176	0,156	0,144
177	0,155	0,139
178	0,148	0,140
179	0,149	0,151
180	0,153	0,156
181	0,149	0,146
182	0,162	0,136
183	0,156	0,131
184	0,151	0,125
185	0,153	0,115
186	0,158	0,107
187	0,17	0,102
188	0,17	0,102
189	0,17	0,105
190	0,169	0,112
191	0,163	0,115
192	0,16	0,119
193	0,162	0,122
194	0,16	0,136
195	0,155	0,152
196	0,151	0,162
197	0,139	0,166
198	0,132	0,163
199	0,13	0,159

200	0,126	0,155
201	0,123	0,150
202	0,122	0,146
203	0,124	0,142
204	0,125	0,144
205	0,124	0,150
206	0,118	0,154
207	0,114	0,149
208	0,109	0,149
209	0,103	0,151
210	0,103	0,154
211	0,101	0,164
212	0,111	0,160
213	0,121	0,167
214	0,12	0,177
215	0,117	0,181
216	0,123	0,181
217	0,129	0,159
218	0,131	0,141
219	0,132	0,127
220	0,133	0,124
221	0,134	0,128
222	0,134	0,130
223	0,137	0,121
224	0,135	0,125
225	0,133	0,135
226	0,135	0,142
227	0,14	0,146
228	0,147	0,142
229	0,15	0,146
230	0,151	0,146
231	0,151	0,145
232	0,152	0,149
233	0,152	0,149
234	0,152	0,136
235	0,148	0,134
236	0,142	0,134
237	0,136	0,134
238	0,135	0,135
239	0,134	0,139
240	0,133	0,141
241	0,129	0,141
242	0,135	0,141
243	0,145	0,144
244	0,138	0,144
245	0,141	0,143
246	0,148	0,129
247	0,148	0,125
248	0,143	0,126
249	0,143	0,134
250	0,135	0,136
251	0,138	0,129

252	0,147	0,127
253	0,148	0,129
254	0,143	0,148
255	0,141	0,162
256	0,145	0,138
257	0,144	0,124
258	0,137	0,109
259	0,133	0,101
260	0,13	0,114
261	0,126	0,105
262	0,122	0,103
263	0,124	0,115
264	0,125	0,131
265	0,124	0,143
266	0,125	0,133
267	0,129	0,119
268	0,127	0,112
269	0,135	0,100
270	0,139	0,096
271	0,141	0,093
272	0,14	0,086
273	0,128	0,082
274	0,121	0,092
275	0,123	0,085
276	0,125	0,087
Průměrná tloušťka vrstvy:	0,124	0,128

PŘÍLOHA D

PŘÍLOHA D – Celková tloušťka stmelených vrstev obou měřících profilch

Distance [m]	PRVNÍ MĚŘÍCÍ PROFIL			DRUHÝ MĚŘÍCÍ PROFIL		
	Aktuální data	Převzatá data	Rozdíl mezi daty	Aktuální data	Převzatá data	Rozdíl mezi daty
	Celková tl. stmelené vrstvy [m]	Celková tl. stmelené vrstvy [m]		Celková tl. stmelené vrstvy [m]	Celková tl. stmelené vrstvy [m]	
0	0,217	0,215	0,002	0,312	0,125	0,187
1	0,214	0,213	0,001	0,316	0,125	0,191
2	0,206	0,211	-0,005	0,315	0,123	0,192
3	0,205	0,206	-0,001	0,311	0,137	0,174
4	0,222	0,224	-0,002	0,305	0,136	0,169
5	0,225	0,240	-0,015	0,294	0,137	0,157
6	0,225	0,266	-0,041	0,274	0,176	0,098
7	0,221	0,273	-0,052	0,271	0,177	0,094
8	0,222	0,285	-0,063	0,276	0,193	0,083
9	0,224	0,277	-0,053	0,301	0,224	0,077
10	0,226	0,278	-0,052	0,318	0,237	0,081
11	0,225	0,282	-0,057	0,325	0,238	0,087
12	0,226	0,277	-0,051	0,332	0,212	0,12
13	0,219	0,268	-0,049	0,353	0,209	0,144
14	0,205	0,259	-0,054	0,369	0,216	0,153
15	0,185	0,254	-0,069	0,39	0,207	0,183
16	0,195	0,250	-0,055	0,398	0,206	0,192
17	0,199	0,248	-0,049	0,403	0,209	0,194
18	0,210	0,248	-0,038	0,407	0,203	0,204
19	0,218	0,241	-0,023	0,409	0,205	0,204
20	0,214	0,239	-0,025	0,401	0,25	0,151
21	0,209	0,229	-0,020	0,39	0,246	0,144
22	0,210	0,211	-0,001	0,385	0,234	0,151
23	0,214	0,238	-0,024	0,384	0,227	0,157
24	0,197	0,242	-0,045	0,384	0,238	0,146
25	0,176	0,242	-0,066	0,384	0,228	0,156
26	0,179	0,227	-0,048	0,383	0,213	0,17
27	0,177	0,221	-0,044	0,378	0,227	0,151
28	0,168	0,228	-0,060	0,374	0,233	0,141
29	0,165	0,243	-0,078	0,37	0,255	0,115
30	0,170	0,259	-0,089	0,369	0,256	0,113
31	0,160	0,273	-0,113	0,366	0,252	0,114
32	0,160	0,268	-0,108	0,363	0,238	0,125
33	0,182	0,260	-0,078	0,355	0,23	0,125
34	0,192	0,259	-0,067	0,35	0,232	0,118
35	0,198	0,250	-0,052	0,35	0,232	0,118
36	0,198	0,236	-0,038	0,349	0,212	0,137

37	0,199	0,224	-0,025	0,349	0,209	0,14
38	0,199	0,240	-0,041	0,349	0,225	0,124
39	0,200	0,234	-0,034	0,349	0,23	0,119
40	0,214	0,236	-0,022	0,348	0,235	0,113
41	0,208	0,250	-0,042	0,349	0,245	0,104
42	0,202	0,258	-0,056	0,35	0,239	0,111
43	0,210	0,249	-0,039	0,351	0,238	0,113
44	0,215	0,255	-0,040	0,357	0,235	0,122
45	0,199	0,249	-0,050	0,356	0,214	0,142
46	0,192	0,241	-0,049	0,356	0,218	0,138
47	0,191	0,236	-0,045	0,354	0,206	0,148
48	0,194	0,241	-0,047	0,349	0,228	0,121
49	0,197	0,256	-0,059	0,343	0,25	0,093
50	0,199	0,279	-0,080	0,338	0,245	0,093
51	0,199	0,297	-0,098	0,332	0,226	0,106
52	0,198	0,293	-0,095	0,327	0,22	0,107
53	0,199	0,303	-0,104	0,327	0,229	0,098
54	0,204	0,299	-0,095	0,325	0,234	0,091
55	0,223	0,278	-0,055	0,324	0,229	0,095
56	0,221	0,267	-0,046	0,32	0,211	0,109
57	0,210	0,251	-0,041	0,307	0,206	0,101
58	0,213	0,231	-0,018	0,299	0,197	0,102
59	0,225	0,229	-0,004	0,294	0,185	0,109
60	0,225	0,232	-0,007	0,291	0,189	0,102
61	0,214	0,233	-0,019	0,293	0,192	0,101
62	0,194	0,238	-0,044	0,301	0,181	0,12
63	0,183	0,247	-0,064	0,306	0,177	0,129
64	0,197	0,244	-0,047	0,306	0,174	0,132
65	0,217	0,232	-0,015	0,306	0,173	0,133
66	0,217	0,265	-0,048	0,306	0,172	0,134
67	0,210	0,215	-0,005	0,305	0,177	0,128
68	0,211	0,212	-0,001	0,3	0,182	0,118
69	0,217	0,220	-0,003	0,296	0,184	0,112
70	0,223	0,228	-0,005	0,291	0,197	0,094
71	0,224	0,235	-0,011	0,285	0,203	0,082
72	0,218	0,222	-0,004	0,274	0,195	0,079
73	0,201	0,222	-0,021	0,267	0,193	0,074
74	0,199	0,221	-0,022	0,259	0,192	0,067
75	0,206	0,220	-0,014	0,258	0,203	0,055
76	0,211	0,227	-0,016	0,257	0,221	0,036
77	0,215	0,229	-0,014	0,258	0,203	0,055
78	0,220	0,221	-0,001	0,258	0,218	0,04
79	0,229	0,237	-0,008	0,259	0,224	0,035
80	0,236	0,251	-0,015	0,263	0,225	0,038
81	0,235	0,259	-0,024	0,269	0,224	0,045

82	0,223	0,254	-0,031	0,275	0,181	0,094
83	0,214	0,255	-0,041	0,285	0,179	0,106
84	0,203	0,252	-0,049	0,299	0,186	0,113
85	0,201	0,233	-0,032	0,299	0,191	0,108
86	0,202	0,220	-0,018	0,3	0,182	0,118
87	0,202	0,237	-0,035	0,299	0,181	0,118
88	0,201	0,247	-0,046	0,297	0,185	0,112
89	0,211	0,227	-0,016	0,294	0,188	0,106
90	0,224	0,239	-0,015	0,293	0,195	0,098
91	0,231	0,256	-0,025	0,294	0,199	0,095
92	0,230	0,258	-0,028	0,293	0,201	0,092
93	0,215	0,220	-0,005	0,292	0,215	0,077
94	0,214	0,213	0,001	0,297	0,211	0,086
95	0,195	0,236	-0,041	0,298	0,197	0,101
96	0,197	0,246	-0,049	0,3	0,194	0,106
97	0,208	0,242	-0,034	0,302	0,187	0,115
98	0,210	0,249	-0,039	0,302	0,176	0,126
99	0,211	0,259	-0,048	0,302	0,167	0,135
100	0,222	0,253	-0,031	0,302	0,16	0,142
101	0,217	0,252	-0,035	0,296	0,164	0,132
102	0,216	0,248	-0,032	0,294	0,152	0,142
103	0,220	0,239	-0,019	0,294	0,144	0,15
104	0,224	0,247	-0,023	0,293	0,136	0,157
105	0,228	0,250	-0,022	0,288	0,142	0,146
106	0,230	0,252	-0,022	0,28	0,151	0,129
107	0,231	0,255	-0,024	0,281	0,152	0,129
108	0,231	0,276	-0,045	0,28	0,156	0,124
109	0,231	0,259	-0,028	0,281	0,175	0,106
110	0,229	0,242	-0,013	0,285	0,188	0,097
111	0,219	0,232	-0,013	0,291	0,204	0,087
112	0,215	0,228	-0,013	0,294	0,207	0,087
113	0,218	0,218	0,000	0,297	0,167	0,13
115	0,224	0,213	0,011	0,297	0,151	0,146
116	0,226	0,214	0,012	0,297	0,144	0,153
117	0,226	0,207	0,019	0,295	0,145	0,15
118	0,226	0,203	0,023	0,286	0,153	0,133
119	0,226	0,207	0,019	0,273	0,182	0,091
120	0,224	0,209	0,015	0,276	0,177	0,099
121	0,229	0,195	0,034	0,28	0,182	0,098
122	0,229	0,190	0,039	0,28	0,184	0,096
123	0,236	0,205	0,031	0,285	0,183	0,102
124	0,246	0,199	0,047	0,286	0,189	0,097
125	0,247	0,187	0,060	0,288	0,198	0,09
126	0,230	0,196	0,034	0,29	0,221	0,069
127	0,221	0,196	0,025	0,291	0,243	0,048

128	0,228	0,198	0,030	0,291	0,244	0,047
129	0,234	0,203	0,031	0,286	0,246	0,04
130	0,237	0,202	0,035	0,282	0,248	0,034
131	0,243	0,204	0,039	0,278	0,253	0,025
132	0,255	0,213	0,042	0,275	0,253	0,022
133	0,259	0,210	0,049	0,275	0,253	0,022
134	0,261	0,211	0,050	0,275	0,251	0,024
135	0,261	0,195	0,066	0,278	0,247	0,031
136	0,269	0,207	0,062	0,278	0,246	0,032
137	0,275	0,157	0,118	0,277	0,256	0,021
138	0,275	0,177	0,098	0,278	0,225	0,053
139	0,280	0,154	0,126	0,278	0,22	0,058
140	0,285	0,122	0,163	0,284	0,211	0,073
141	0,289	0,136	0,153	0,297	0,223	0,074
142	0,297	0,117	0,180	0,302	0,217	0,085
143	0,303	0,090	0,213	0,302	0,214	0,088
144	0,304	0,094	0,210	0,302	0,207	0,095
145	0,300	0,105	0,195	0,302	0,208	0,094
146	0,295	0,112	0,183	0,294	0,224	0,07
147	0,294	0,120	0,174	0,28	0,223	0,057
148	0,293	0,119	0,174	0,276	0,155	0,121
149	0,293	0,126	0,167	0,286	0,136	0,15
150	0,293	0,130	0,163	0,291	0,147	0,144
151	0,293	0,137	0,156	0,296	0,135	0,161
152	0,291	0,138	0,153	0,297	0,112	0,185
153	0,288	0,130	0,158	0,299	0,106	0,193
154	0,288	0,120	0,168	0,299	0,106	0,193
155	0,288	0,113	0,175	0,297	0,118	0,179
156	0,285	0,124	0,161	0,292	0,111	0,181
157	0,271	0,127	0,144	0,289	0,104	0,185
158	0,266	0,129	0,137	0,288	0,108	0,18
159	0,272	0,141	0,131	0,288	0,097	0,191
160	0,272	0,139	0,133	0,288	0,104	0,184
161	0,271	0,132	0,139	0,289	0,103	0,186
162	0,272	0,136	0,136	0,294	0,104	0,19
163	0,270	0,128	0,142	0,3	0,109	0,191
164	0,270	0,123	0,147	0,297	0,112	0,185
165	0,269	0,120	0,149	0,281	0,113	0,168
166	0,264	0,114	0,150	0,273	0,109	0,164
167	0,264	0,111	0,153	0,275	0,107	0,168
168	0,264	0,112	0,152	0,277	0,109	0,168
169	0,264	0,121	0,143	0,275	0,115	0,16
170	0,267	0,116	0,151	0,275	0,11	0,165
171	0,284	0,120	0,164	0,273	0,112	0,161
172	0,299	0,120	0,179	0,272	0,116	0,156

173	0,297	0,120	0,177	0,272	0,107	0,165
174	0,285	0,122	0,163	0,272	0,122	0,15
175	0,277	0,134	0,143	0,273	0,106	0,167
176	0,276	0,127	0,149	0,279	0,098	0,181
177	0,272	0,115	0,157	0,284	0,106	0,178
178	0,266	0,112	0,154	0,294	0,105	0,189
179	0,259	0,108	0,151	0,296	0,103	0,193
180	0,268	0,102	0,166	0,283	0,109	0,174
181	0,277	0,098	0,179	0,28	0,116	0,164
182	0,277	0,092	0,185	0,28	0,121	0,159
183	0,277	0,090	0,187	0,283	0,112	0,171
184	0,277	0,091	0,186	0,281	0,112	0,169
185	0,277	0,089	0,188	0,278	0,122	0,156
186	0,277	0,091	0,186	0,271	0,114	0,157
187	0,275	0,090	0,185	0,267	0,115	0,152
188	0,277	0,098	0,179	0,267	0,096	0,171
189	0,291	0,110	0,181	0,267	0,105	0,162
190	0,296	0,110	0,186	0,269	0,106	0,163
191	0,293	0,113	0,180	0,269	0,102	0,167
192	0,291	0,099	0,192	0,273	0,11	0,163
193	0,296	0,097	0,199	0,289	0,123	0,166
194	0,278	0,095	0,183	0,302	0,113	0,189
195	0,269	0,099	0,170	0,313	0,101	0,212
196	0,288	0,113	0,175	0,317	0,101	0,216
197	0,295	0,112	0,183	0,319	0,104	0,215
198	0,278	0,108	0,170	0,309	0,106	0,203
199	0,278	0,109	0,169	0,302	0,107	0,195
200	0,298	0,105	0,193	0,299	0,109	0,19
201	0,307	0,109	0,198	0,301	0,099	0,202
202	0,307	0,110	0,197	0,304	0,101	0,203
203	0,309	0,119	0,190	0,305	0,107	0,198
204	0,311	0,118	0,193	0,305	0,105	0,2
205	0,320	0,125	0,195	0,304	0,106	0,198
206	0,320	0,139	0,181	0,304	0,111	0,193
207	0,321	0,118	0,203	0,305	0,113	0,192
208	0,320	0,115	0,205	0,303	0,116	0,187
209	0,309	0,107	0,202	0,301	0,119	0,182
210	0,289	0,102	0,187	0,299	0,121	0,178
211	0,311	0,102	0,209	0,299	0,128	0,171
212	0,336	0,100	0,236	0,299	0,133	0,166
213	0,321	0,102	0,219	0,296	0,139	0,157
214	0,297	0,117	0,180	0,287	0,145	0,142
215	0,299	0,109	0,190	0,285	0,136	0,149
216	0,297	0,123	0,174	0,283	0,137	0,146
217	0,286	0,128	0,158	0,285	0,137	0,148

218	0,287	0,117	0,170	0,289	0,145	0,144
219	0,296	0,125	0,171	0,286	0,143	0,143
220	0,314	0,124	0,190	0,281	0,133	0,148
221	0,321	0,129	0,192	0,274	0,136	0,138
222	0,321	0,125	0,196	0,27	0,138	0,132
223	0,325	0,131	0,194	0,269	0,137	0,132
224	0,334	0,131	0,203	0,27	0,132	0,138
225	0,342	0,123	0,219	0,275	0,138	0,137
226	0,342	0,112	0,230	0,281	0,145	0,136
227	0,334	0,100	0,234	0,288	0,139	0,149
228	0,325	0,105	0,220	0,295	0,143	0,152
229	0,323	0,110	0,213	0,299	0,136	0,163
230	0,319	0,116	0,203	0,299	0,135	0,164
231	0,315	0,107	0,208	0,299	0,131	0,168
232	0,315	0,094	0,221	0,3	0,117	0,183
233	0,312	0,104	0,208	0,295	0,117	0,178
234	0,302	0,113	0,189	0,285	0,112	0,173
235	0,304	0,115	0,189	0,288	0,11	0,178
236	0,307	0,136	0,171	0,289	0,112	0,177
237	0,307	0,138	0,169	0,289	0,116	0,173
238	0,307	0,153	0,154	0,288	0,108	0,18
239	0,307	0,142	0,165	0,288	0,105	0,183
240	0,311	0,118	0,193	0,289	0,107	0,182
241	0,311	0,125	0,186	0,289	0,111	0,178
242	0,315	0,130	0,185	0,288	0,117	0,171
243	0,301	0,127	0,174	0,287	0,124	0,163
244	0,323	0,136	0,187	0,283	0,126	0,157
245	0,312	0,138	0,174	0,283	0,123	0,16
246	0,301	0,134	0,167	0,283	0,13	0,153
247	0,295	0,126	0,169	0,283	0,122	0,161
248	0,298	0,115	0,183	0,289	0,112	0,177
249	0,298	0,113	0,185	0,305	0,118	0,187
250	0,295	0,119	0,176	0,313	0,12	0,193
251	0,302	0,122	0,180	0,317	0,114	0,203
252	0,319	0,107	0,212	0,319	0,112	0,207
253	0,317	0,111	0,206	0,302	0,104	0,198
254	0,307	0,115	0,192	0,286	0,107	0,179
255	0,328	0,123	0,205	0,288	0,11	0,178
256	0,325	0,108	0,217	0,292	0,12	0,172
257	0,307	0,103	0,204	0,299	0,121	0,178
258	0,297	0,103	0,194	0,302	0,131	0,171
259	0,299	0,104	0,195	0,3	0,133	0,167
260	0,313	0,110	0,203	0,296	0,141	0,155
261	0,313	0,113	0,200	0,292	0,133	0,159
262	0,313	0,107	0,206	0,288	0,131	0,157

263	0,327	0,110	0,217	0,285	0,122	0,163
264	0,301	0,104	0,197	0,29	0,126	0,164
265	0,302	0,096	0,206	0,291	0,126	0,165
266	0,302	0,111	0,191	0,297	0,121	0,176
267	0,302	0,109	0,193	0,31	0,121	0,189
268	0,307	0,105	0,202	0,322	0,121	0,201
269	0,311	0,100	0,211	0,326	0,116	0,21
270	0,302	0,110	0,192	0,323	0,098	0,225
271	0,301	0,116	0,185	0,31	0,085	0,225
272	0,305	0,100	0,205	0,304	0,081	0,223
273	0,313	0,103	0,210	0,299	0,09	0,209
274	0,313	0,094	0,219	0,297	0,078	0,219
275	0,317	0,103	0,214	0,295	0,095	0,2
276	0,316	0,098	0,218	0,296	0,091	0,205
Průměrná tloušťka vrstvy:	0,256	0,176	0,080	0,302	0,163	0,139

PŘÍLOHA E

PŘÍLOHA E – Celková tloušťka konstrukčních vrstev v obou měřících profilech

Distance [m]	PRVNÍ MĚŘÍCÍ PROFIL				PRVNÍ MĚŘÍCÍ PROFIL			
	Aktuální data			Převzatá data	Aktuální data			Převzatá data
	Celková tl. stmelných vrstev [m]	Celková tl. nestmelné vrstvy [m]	Celková tl. kce [m]	Celková tl. kce [m]	Celková tl. stmelných vrstev [m]	Celková tl. nestmelné vrstvy [m]	Celková tl. kce [m]	Celková tl. kce [m]
0	0,217	0,263	0,571	0,47	0,312	0,352	0,469	0,443
1	0,214	0,246	0,489	0,47	0,316	0,219	0,454	0,442
2	0,206	0,225	0,481	0,461	0,315	0,207	0,441	0,485
3	0,205	0,277	0,481	0,394	0,311	0,214	0,425	0,537
4	0,222	0,286	0,481	0,373	0,305	0,211	0,428	0,556
5	0,225	0,258	0,477	0,372	0,294	0,188	0,429	0,55
6	0,225	0,229	0,476	0,387	0,274	0,197	0,437	0,526
7	0,221	0,232	0,469	0,375	0,271	0,219	0,453	0,522
8	0,222	0,234	0,457	0,343	0,276	0,232	0,466	0,544
9	0,224	0,26	0,447	0,343	0,301	0,234	0,474	0,556
10	0,226	0,258	0,453	0,359	0,318	0,222	0,474	0,579
11	0,225	0,258	0,467	0,324	0,325	0,227	0,484	0,571
12	0,226	0,258	0,47	0,329	0,332	0,238	0,484	0,54
13	0,219	0,258	0,47	0,336	0,353	0,205	0,481	0,525
14	0,205	0,267	0,466	0,319	0,369	0,228	0,48	0,522
15	0,185	0,267	0,446	0,35	0,39	0,218	0,499	0,528
16	0,195	0,241	0,422	0,361	0,398	0,257	0,526	0,502
17	0,199	0,228	0,417	0,349	0,403	0,263	0,538	0,498
18	0,210	0,258	0,447	0,376	0,407	0,288	0,558	0,499
19	0,218	0,283	0,481	0,408	0,409	0,275	0,561	0,512
20	0,214	0,284	0,487	0,402	0,401	0,275	0,555	0,522
21	0,209	0,27	0,486	0,385	0,39	0,275	0,555	0,552
22	0,210	0,268	0,485	0,372	0,385	0,291	0,554	0,557
23	0,214	0,275	0,48	0,367	0,384	0,275	0,554	0,522
24	0,197	0,282	0,465	0,38	0,384	0,264	0,547	0,509
25	0,176	0,261	0,435	0,386	0,384	0,221	0,537	0,493
26	0,179	0,257	0,43	0,384	0,383	0,201	0,537	0,465
27	0,177	0,236	0,429	0,393	0,378	0,223	0,535	0,464
28	0,168	0,278	0,466	0,392	0,374	0,272	0,532	0,476
29	0,165	0,329	0,496	0,375	0,37	0,271	0,528	0,5
30	0,170	0,349	0,517	0,46	0,369	0,268	0,53	0,526
31	0,160	0,355	0,527	0,452	0,366	0,261	0,52	0,549
32	0,160	0,355	0,521	0,453	0,363	0,257	0,508	0,601
33	0,182	0,351	0,517	0,463	0,355	0,247	0,499	0,619
34	0,192	0,324	0,485	0,423	0,35	0,244	0,507	0,59
35	0,198	0,327	0,502	0,44	0,35	0,226	0,484	0,644
36	0,198	0,328	0,514	0,478	0,349	0,211	0,456	0,693
37	0,199	0,327	0,517	0,489	0,349	0,194	0,434	0,696
38	0,199	0,326	0,505	0,489	0,349	0,197	0,432	0,685
39	0,200	0,3	0,492	0,489	0,349	0,267	0,502	0,702
40	0,214	0,267	0,472	0,462	0,348	0,271	0,505	0,722
41	0,208	0,256	0,463	0,412	0,349	0,257	0,491	0,748
42	0,202	0,232	0,439	0,412	0,35	0,238	0,472	0,717

43	0,210	0,217	0,424	0,412	0,351	0,227	0,461	0,714
44	0,215	0,209	0,414	0,402	0,357	0,278	0,527	0,683
45	0,199	0,21	0,404	0,415	0,356	0,243	0,53	0,699
46	0,192	0,212	0,407	0,441	0,356	0,222	0,532	0,7
47	0,191	0,228	0,424	0,395	0,354	0,211	0,531	0,708
48	0,194	0,232	0,424	0,39	0,349	0,217	0,537	0,726
49	0,197	0,232	0,422	0,435	0,343	0,252	0,582	0,7
50	0,199	0,226	0,415	0,465	0,338	0,256	0,593	0,683
51	0,199	0,223	0,412	0,462	0,332	0,269	0,606	0,73
52	0,198	0,223	0,412	0,481	0,327	0,273	0,61	0,735
53	0,199	0,221	0,412	0,494	0,327	0,29	0,622	0,712
54	0,204	0,207	0,415	0,476	0,325	0,34	0,665	0,693
55	0,223	0,193	0,418	0,507	0,324	0,344	0,664	0,705
56	0,221	0,195	0,429	0,504	0,32	0,324	0,644	0,715
57	0,210	0,231	0,465	0,478	0,307	0,292	0,612	0,703
58	0,213	0,254	0,487	0,446	0,299	0,295	0,615	0,693
59	0,225	0,286	0,503	0,461	0,294	0,313	0,633	0,717
60	0,225	0,308	0,515	0,473	0,291	0,293	0,613	0,713
61	0,214	0,313	0,52	0,469	0,293	0,247	0,567	0,69
62	0,194	0,319	0,526	0,45	0,301	0,219	0,539	0,682
63	0,183	0,306	0,525	0,401	0,306	0,199	0,524	0,676
64	0,197	0,278	0,511	0,363	0,306	0,189	0,52	0,69
65	0,217	0,247	0,491	0,371	0,306	0,232	0,564	0,727
66	0,217	0,242	0,487	0,39	0,306	0,252	0,584	0,749
67	0,210	0,254	0,49	0,393	0,305	0,252	0,584	0,737
68	0,211	0,276	0,511	0,384	0,3	0,251	0,579	0,736
69	0,217	0,306	0,526	0,373	0,296	0,208	0,525	0,758
70	0,223	0,347	0,539	0,386	0,291	0,204	0,507	0,761
71	0,224	0,338	0,558	0,39	0,285	0,2	0,503	0,731
72	0,218	0,327	0,562	0,407	0,274	0,211	0,503	0,725
73	0,201	0,326	0,561	0,412	0,267	0,217	0,508	0,724
74	0,199	0,314	0,549	0,425	0,259	0,218	0,508	0,699
75	0,206	0,295	0,53	0,425	0,258	0,199	0,479	0,699
76	0,211	0,282	0,516	0,427	0,257	0,189	0,463	0,703
77	0,215	0,265	0,499	0,43	0,258	0,193	0,467	0,656
78	0,220	0,262	0,493	0,418	0,258	0,231	0,497	0,52
79	0,229	0,286	0,492	0,417	0,259	0,253	0,512	0,478
80	0,236	0,276	0,493	0,373	0,263	0,251	0,508	0,478
81	0,235	0,28	0,499	0,393	0,269	0,248	0,502	0,483
82	0,223	0,28	0,505	0,51	0,275	0,243	0,495	0,493
83	0,214	0,276	0,51	0,541	0,285	0,235	0,488	0,489
84	0,203	0,275	0,51	0,549	0,299	0,246	0,508	0,494
85	0,201	0,266	0,5	0,558	0,299	0,272	0,545	0,487
86	0,202	0,253	0,482	0,566	0,3	0,253	0,527	0,484
87	0,202	0,243	0,472	0,567	0,299	0,23	0,51	0,471
88	0,201	0,242	0,471	0,55	0,297	0,212	0,486	0,478
89	0,211	0,25	0,477	0,508	0,294	0,211	0,462	0,471
90	0,224	0,263	0,482	0,489	0,293	0,223	0,474	0,417
91	0,231	0,265	0,483	0,502	0,294	0,231	0,483	0,42
92	0,230	0,268	0,493	0,49	0,293	0,228	0,487	0,355
93	0,215	0,259	0,493	0,487	0,292	0,218	0,486	0,374
94	0,214	0,247	0,491	0,452	0,297	0,195	0,463	0,464

95	0,195	0,241	0,487	0,45	0,298	0,164	0,442	0,553
96	0,197	0,246	0,487	0,445	0,3	0,137	0,431	0,604
97	0,208	0,246	0,486	0,436	0,302	0,122	0,425	0,627
98	0,210	0,246	0,486	0,434	0,302	0,111	0,419	0,62
99	0,211	0,244	0,481	0,434	0,302	0,151	0,429	0,588
100	0,222	0,259	0,493	0,434	0,302	0,171	0,44	0,577
101	0,217	0,292	0,522	0,434	0,296	0,15	0,439	0,598
102	0,216	0,326	0,541	0,445	0,294	0,126	0,429	0,587
103	0,220	0,343	0,55	0,436	0,294	0,129	0,436	0,584
104	0,224	0,341	0,55	0,425	0,293	0,13	0,441	0,612
105	0,228	0,332	0,544	0,425	0,288	0,118	0,455	0,688
106	0,230	0,321	0,539	0,407	0,28	0,155	0,501	0,728
107	0,231	0,316	0,539	0,39	0,281	0,207	0,543	0,722
108	0,231	0,321	0,546	0,381	0,28	0,228	0,546	0,736
109	0,231	0,324	0,559	0,36	0,281	0,25	0,549	0,707
110	0,229	0,323	0,567	0,319	0,285	0,268	0,538	0,72
111	0,219	0,325	0,572	0,283	0,291	0,25	0,521	0,729
112	0,215	0,332	0,577	0,318	0,294	0,229	0,52	0,72
113	0,218	0,341	0,579	0,406	0,297	0,252	0,55	0,728
115	0,224	0,349	0,577	0,461	0,297	0,261	0,558	0,735
116	0,226	0,311	0,536	0,475	0,297	0,269	0,566	0,749
117	0,226	0,219	0,448	0,497	0,295	0,272	0,566	0,71
118	0,226	0,204	0,441	0,52	0,286	0,276	0,57	0,627
119	0,226	0,2	0,441	0,511	0,273	0,295	0,598	0,589
120	0,224	0,196	0,437	0,51	0,276	0,318	0,621	0,572
121	0,229	0,458	0,699	0,632	0,28	0,339	0,636	0,566
122	0,229	0,47	0,711	0,619	0,28	0,372	0,652	0,583
123	0,236	0,473	0,713	0,545	0,285	0,35	0,651	0,6
124	0,246	0,469	0,71	0,506	0,286	0,301	0,619	0,621
125	0,247	0,426	0,667	0,44	0,288	0,287	0,605	0,631
126	0,230	0,369	0,612	0,475	0,29	0,306	0,606	0,611
127	0,221	0,347	0,601	0,515	0,291	0,328	0,606	0,599
128	0,228	0,342	0,6	0,49	0,291	0,339	0,605	0,611
129	0,234	0,341	0,604	0,507	0,286	0,342	0,601	0,626
130	0,237	0,269	0,533	0,499	0,282	0,328	0,596	0,678
131	0,243	0,234	0,508	0,49	0,278	0,268	0,583	0,723
132	0,255	0,235	0,515	0,473	0,275	0,244	0,551	0,746
133	0,259	0,231	0,507	0,504	0,275	0,234	0,521	0,751
134	0,261	0,188	0,457	0,476	0,275	0,245	0,53	0,748
135	0,261	0,19	0,459	0,418	0,278	0,261	0,558	0,768
136	0,269	0,199	0,468	0,41	0,278	0,259	0,549	0,751
137	0,275	0,196	0,468	0,41	0,277	0,268	0,559	0,746
138	0,275	0,196	0,471	0,403	0,278	0,293	0,587	0,763
139	0,280	0,205	0,48	0,421	0,278	0,313	0,599	0,782
140	0,285	0,213	0,479	0,441	0,284	0,317	0,603	0,824
141	0,289	0,208	0,466	0,452	0,297	0,319	0,605	0,832
142	0,297	0,206	0,469	0,448	0,302	0,317	0,589	0,823
143	0,303	0,268	0,542	0,421	0,302	0,311	0,574	0,745
144	0,304	0,299	0,589	0,427	0,302	0,3	0,563	0,735
145	0,300	0,3	0,592	0,428	0,302	0,288	0,56	0,644
146	0,295	0,3	0,592	0,41	0,294	0,271	0,562	0,548
147	0,294	0,306	0,598	0,392	0,28	0,275	0,568	0,508

148	0,293	0,349	0,541	0,487	0,276	0,285	0,573	0,512
149	0,293	0,368	0,555	0,493	0,286	0,309	0,595	0,513
150	0,293	0,386	0,564	0,501	0,291	0,302	0,587	0,506
151	0,293	0,41	0,573	0,501	0,296	0,307	0,573	0,533
152	0,291	0,41	0,56	0,501	0,297	0,283	0,54	0,526
153	0,288	0,36	0,506	0,521	0,299	0,264	0,507	0,563
154	0,288	0,329	0,476	0,445	0,299	0,28	0,52	0,641
155	0,288	0,322	0,473	0,535	0,297	0,293	0,533	0,683
156	0,285	0,315	0,472	0,525	0,292	0,297	0,537	0,684
157	0,271	0,308	0,472	0,524	0,289	0,302	0,542	0,7
158	0,266	0,309	0,48	0,504	0,288	0,293	0,541	0,708
159	0,272	0,332	0,513	0,507	0,288	0,257	0,534	0,703
160	0,272	0,379	0,565	0,511	0,288	0,249	0,542	0,661
161	0,271	0,386	0,572	0,536	0,289	0,258	0,564	0,553
162	0,272	0,386	0,573	0,536	0,294	0,274	0,582	0,491
163	0,270	0,381	0,567	0,542	0,3	0,28	0,589	0,492
164	0,270	0,353	0,539	0,556	0,297	0,292	0,601	0,486
165	0,269	0,381	0,562	0,523	0,281	0,307	0,599	0,474
166	0,264	0,425	0,606	0,501	0,273	0,316	0,596	0,478
167	0,264	0,455	0,627	0,501	0,275	0,306	0,586	0,495
168	0,264	0,478	0,634	0,501	0,277	0,293	0,573	0,485
169	0,264	0,485	0,634	0,5	0,275	0,256	0,551	0,46
170	0,267	0,456	0,598	0,492	0,275	0,203	0,526	0,464
171	0,284	0,433	0,574	0,492	0,273	0,189	0,515	0,456
172	0,299	0,428	0,569	0,492	0,272	0,175	0,501	0,453
173	0,297	0,441	0,587	0,501	0,272	0,172	0,48	0,487
174	0,285	0,477	0,63	0,518	0,272	0,177	0,474	0,493
175	0,277	0,482	0,639	0,494	0,273	0,184	0,477	0,507
176	0,276	0,482	0,639	0,516	0,279	0,209	0,5	0,509
177	0,272	0,482	0,639	0,511	0,284	0,205	0,507	0,487
178	0,266	0,467	0,624	0,502	0,294	0,206	0,509	0,471
179	0,259	0,428	0,586	0,501	0,296	0,21	0,509	0,503
180	0,268	0,415	0,573	0,494	0,283	0,211	0,509	0,494
181	0,277	0,413	0,571	0,499	0,28	0,211	0,508	0,49
182	0,277	0,402	0,562	0,521	0,28	0,211	0,509	0,503
183	0,277	0,394	0,565	0,528	0,283	0,226	0,509	0,499
184	0,277	0,395	0,578	0,51	0,281	0,232	0,509	0,52
185	0,277	0,388	0,579	0,51	0,278	0,234	0,508	0,506
186	0,277	0,393	0,591	0,504	0,271	0,233	0,506	0,52
187	0,275	0,415	0,618	0,49	0,267	0,218	0,492	0,487
188	0,277	0,423	0,626	0,483	0,267	0,204	0,484	0,487
189	0,291	0,429	0,633	0,489	0,267	0,188	0,471	0,496
190	0,296	0,448	0,651	0,487	0,269	0,174	0,454	0,513
191	0,293	0,454	0,646	0,488	0,269	0,161	0,449	0,522
192	0,291	0,453	0,639	0,492	0,273	0,135	0,447	0,522
193	0,296	0,467	0,654	0,497	0,289	0,13	0,447	0,522
194	0,278	0,498	0,7	0,488	0,302	0,124	0,458	0,506
195	0,269	0,509	0,711	0,478	0,313	0,128	0,465	0,489
196	0,288	0,509	0,706	0,483	0,317	0,133	0,47	0,487
197	0,295	0,499	0,696	0,494	0,319	0,145	0,474	0,465
198	0,278	0,5	0,697	0,527	0,309	0,158	0,475	0,467
199	0,278	0,499	0,692	0,544	0,302	0,17	0,471	0,462

200	0,298	0,45	0,637	0,525	0,299	0,181	0,473	0,474
201	0,307	0,424	0,61	0,51	0,301	0,192	0,478	0,511
202	0,307	0,431	0,607	0,49	0,304	0,204	0,484	0,503
203	0,309	0,453	0,623	0,483	0,305	0,209	0,489	0,49
204	0,311	0,478	0,638	0,481	0,305	0,214	0,494	0,493
205	0,320	0,492	0,65	0,474	0,304	0,215	0,495	0,49
206	0,320	0,495	0,655	0,476	0,304	0,205	0,485	0,498
207	0,321	0,504	0,668	0,483	0,305	0,196	0,476	0,499
208	0,320	0,504	0,667	0,483	0,303	0,214	0,494	0,49
209	0,309	0,504	0,668	0,483	0,301	0,231	0,512	0,477
210	0,289	0,504	0,668	0,484	0,299	0,237	0,517	0,464
211	0,311	0,514	0,677	0,492	0,299	0,243	0,523	0,465
212	0,336	0,514	0,666	0,493	0,299	0,249	0,529	0,478
213	0,321	0,432	0,584	0,5	0,296	0,254	0,536	0,509
214	0,297	0,393	0,545	0,484	0,287	0,256	0,544	0,515
215	0,299	0,394	0,546	0,501	0,285	0,25	0,553	0,512
216	0,297	0,399	0,551	0,51	0,283	0,248	0,555	0,558
217	0,286	0,4	0,547	0,501	0,285	0,24	0,554	0,59
218	0,287	0,398	0,544	0,501	0,289	0,235	0,554	0,577
219	0,296	0,388	0,536	0,501	0,286	0,222	0,553	0,541
220	0,314	0,382	0,54	0,493	0,281	0,217	0,548	0,49
221	0,321	0,379	0,542	0,492	0,274	0,215	0,54	0,478
222	0,321	0,372	0,539	0,499	0,27	0,209	0,535	0,478
223	0,325	0,394	0,568	0,501	0,269	0,205	0,531	0,483
224	0,334	0,406	0,581	0,494	0,27	0,201	0,527	0,493
225	0,342	0,425	0,595	0,492	0,275	0,195	0,521	0,491
226	0,342	0,423	0,584	0,492	0,281	0,183	0,519	0,503
227	0,334	0,378	0,54	0,618	0,288	0,136	0,511	0,494
228	0,325	0,35	0,534	0,699	0,295	0,129	0,5	0,487
229	0,323	0,328	0,526	0,702	0,299	0,135	0,493	0,49
230	0,319	0,156	0,464	0,705	0,299	0,148	0,501	0,502
231	0,315	0,152	0,461	0,705	0,299	0,181	0,516	0,486
232	0,315	0,133	0,442	0,699	0,3	0,21	0,531	0,478
233	0,312	0,126	0,435	0,726	0,295	0,211	0,542	0,476
234	0,302	0,123	0,432	0,73	0,285	0,206	0,549	0,453
235	0,304	0,115	0,424	0,718	0,288	0,216	0,548	0,478
236	0,307	0,115	0,424	0,727	0,289	0,247	0,545	0,469
237	0,307	0,116	0,425	0,731	0,289	0,252	0,544	0,452
238	0,307	0,12	0,429	0,731	0,288	0,255	0,547	0,46
239	0,307	0,121	0,43	0,725	0,288	0,256	0,555	0,452
240	0,311	0,136	0,445	0,709	0,289	0,248	0,554	0,451
241	0,311	0,151	0,456	0,671	0,289	0,232	0,547	0,451
242	0,315	0,161	0,465	0,595	0,288	0,223	0,543	0,444
243	0,301	0,178	0,469	0,551	0,287	0,214	0,525	0,45
244	0,323	0,189	0,469	0,56	0,283	0,206	0,509	0,451
245	0,312	0,19	0,467	0,549	0,283	0,206	0,509	0,451
246	0,301	0,183	0,458	0,439	0,283	0,188	0,509	0,451
247	0,295	0,176	0,458	0,45	0,283	0,172	0,509	0,479
248	0,298	0,162	0,454	0,461	0,289	0,173	0,51	0,487
249	0,298	0,155	0,448	0,452	0,305	0,191	0,534	0,493
250	0,295	0,155	0,448	0,445	0,313	0,202	0,545	0,502
251	0,302	0,163	0,447	0,452	0,317	0,222	0,555	0,523

252	0,319	0,175	0,447	0,395	0,319	0,256	0,555	0,525
253	0,317	0,185	0,447	0,361	0,302	0,274	0,56	0,528
254	0,307	0,192	0,447	0,423	0,286	0,24	0,526	0,526
255	0,328	0,189	0,442	0,484	0,288	0,238	0,525	0,522
256	0,325	0,182	0,441	0,513	0,292	0,23	0,525	0,517
257	0,307	0,169	0,442	0,513	0,299	0,217	0,525	0,567
258	0,297	0,176	0,452	0,513	0,302	0,206	0,514	0,649
259	0,299	0,204	0,47	0,435	0,3	0,195	0,504	0,682
260	0,313	0,225	0,476	0,457	0,296	0,174	0,482	0,686
261	0,313	0,229	0,476	0,456	0,292	0,189	0,492	0,695
262	0,313	0,229	0,475	0,444	0,288	0,194	0,51	0,699
263	0,327	0,227	0,476	0,473	0,285	0,188	0,52	0,696
264	0,301	0,223	0,475	0,473	0,29	0,193	0,532	0,694
265	0,302	0,223	0,475	0,473	0,291	0,213	0,551	0,699
266	0,302	0,223	0,475	0,452	0,297	0,242	0,56	0,709
267	0,302	0,224	0,476	0,453	0,31	0,263	0,561	0,726
268	0,307	0,228	0,476	0,472	0,322	0,264	0,56	0,712
269	0,311	0,226	0,472	0,462	0,326	0,266	0,557	0,684
270	0,302	0,192	0,444	0,463	0,323	0,266	0,563	0,693
271	0,301	0,187	0,444	0,32	0,31	0,26	0,575	0,695
272	0,305	0,201	0,458	0,382	0,304	0,273	0,593	0,677
273	0,313	0,19	0,448	0,466	0,299	0,279	0,595	0,666
274	0,313	0,189	0,447	0,475	0,297	0,286	0,591	0,668
275	0,317	0,202	0,46	0,478	0,295	0,281	0,584	0,648
276	0,316	0,262	0,525	0,483	0,296	0,266	0,588	0,639
Průměrná tloušťka vrstvy:	0,256	0,303	0,521	0,471	0,302	0,234	0,527	0,581