

Bibiana Brixová, René Putiška, Roman Pašteka

Georadar – základy merania, spracovania a interpretácie



UNIVERZITA
KOMENSKÉHO
V BRATISLAVE

Bibiana Brixová, René Putiška, Roman Pašteka

Georadar – základy merania, spracovania a interpretácie

2025

Univerzita Komenského v Bratislave

© Autori, 2025

RNDr. Ing. Bibiana Brixová, PhD.

Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky

doc. RNDr. Ing. René Putiška, PhD.

Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky

prof. RNDr. Roman Pašteka, PhD.

Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky

Recenzent

doc. RNDr. Pavel Bláha, DrSc.



Publikácia je šírená pod licenciou Creative Commons CC BY-SA 4.0 (vyžaduje sa: povinnosť uvádzať pôvodného autora, povinnosť odvodené dielo zdieľať pod rovnakou licenciou ako pôvodné dielo). Viac informácií o licencií a použití diela: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



https://stella.uniba.sk/texty/PRIF_BPP_georadar_zaklady.pdf

Vydavateľ

Univerzita Komenského v Bratislave

ISBN 978-80-223-6082-1 (online)

Obsah

Predhovor	5
1 Georadar – stručná história	6
2 Teoretické základy	10
2.1 Elektromagnetické vlnenie	10
2.2 EM vlastnosti horninových materiálov	12
2.3 Rýchlosť šírenia sa EM vlny v prostredí	14
3 Princípy GPR – systém, anténa, rozlíšenie	16
3.1 Riadiaca jednotka	17
3.2 GPR anténne systémy	18
3.2.1 Rozlišovacia schopnosť antény	18
3.2.2 Hĺbkový dosah GPR antén – strata energie signálu	24
3.2.3 Typy GPR antén	26
3.3 Meranie GPR – generovanie a registrovanie vln GPR anténami	32
4 Základné techniky georadarového zberu dát	40
4.1 Meranie GPR – generovanie a registrovanie vln GPR anténami	40
4.2 GPR rýchlostná analýza WARR/CMP	41
4.3 GPR tomografia	42
5 Spracovanie údajov a interpretácia	43
5.1 Kroky základného spracovania	44
5.2 Kroky rozšíreného (pokročilého) spracovania	50
5.3 Príklad 2D procesingu na konkrétnom profile	55
6 Možnosti zobrazenia a interpretácie	70
6.1 Interpretácia obrazu	71
6.1.1 Spojité rozhrania	72
6.1.2 Difrakčné hyperboly – izolované ciele	73
6.1.3 Komplexné štruktúry	75
6.1.4 Podzemné priestory – dutiny	77
6.1.5 Viacnásobné odrazy (multiple)	78
6.2 Efekty nadzemných konštrukcií	79

7 Príklady využitia georadaru	81
7.1 Aplikácia georadaru na zistenie prítomnosti dutín pod betónovými platňami	81
7.2 Aplikácia georadaru na zistenie prítomnosti dutín väčších dutín (krýpt, pivníc)	96
7.3 Aplikácia georadaru na zistenie prítomnosti zvyškov múrov v rámci nedeštruktívneho archeologického prieskumu	106
7.4 Aplikácia georadaru pri inšpekcii vozoviek	116
7.5 Aplikácia georadaru pri detekcii nevybuchnutej munície	130
7.6 Aplikácia georadaru v podzemí	141
Záver	145
Príloha – matematické základy spektrálnej analýzy a filtrácie	146
Použitá literatúra	152

Predhovor

Georadar alebo GPR (Ground Penetrating Radar) je geofyzikálna metóda využívajúca elektromagnetické vlny vysielané georadarovou anténou (radarové impulzy) na zmapovanie štruktúr a objektov pod povrchom. Hoci už James Clerk Maxwell predpovedal existenciu elektromagnetických vĺn, až Heinrich Hertz dokázal, že rádiové vlny existujú a môžu sa prenášať, lámať a odrážať rovnakým spôsobom ako viditeľné svetlo. Odvtedy prešiel výskum georadarových technológií dlhú cestu a dnes sa GPR používa v širokej škále nedeštruktívnych aplikácií v rôznych odvetviach.

Snahou autorov predloženého učebného textu bolo dať k dispozícii ucelený študijný materiál, v ktorom sú zhrnuté teoretické základy, hlavné kroky merania, spracovania a interpretácie spolu s príkladmi využitia georadaru vo vybraných prieskumoch z rôznych odvetví. Je určený študentom magisterského štúdia v rámci študijného programu Aplikovaná geofyzika (študijný odbor Vedy o Zemi) na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Komenského v Bratislave ako učebný text k predmetu Geoelektrické metódy (2). Zároveň môže poslúžiť ako študijný materiál pre ďalšie študijné programy z odborov z oblasti stavebníctva, geotechniky, baníctva, ekológie, archeológie a forenzných vied.

Autori ďakujú všetkým, ktorí akýmkoľvek spôsobom prispeli k vydaniu tohto učebného textu, predovšetkým Ing. Miroslavovi Terrayovi za poskytnutie rôznych podkladov, ako aj odborné konzultácie a technickú podporu. Takisto patrí poďakovanie recenzentovi doc. RNDr. Pavlovi Bláhovi, DrSc., za dôkladné posúdenie rukopisu a cenné pripomienky k textu.

1 Georadar – stručná história

História radaru začína históriou nášho chápania, že svetlo je elektromagnetická vlna. V roku 1826 André-Marie Ampère zistil, že elektrický prúd vytvára magnetické pole. O päť rokov neskôr zistil Michael Faraday, že elektrické pole je produkované meniacim sa magnetickým poľom (Young a Freedman, 2004). V roku 1855 Wilhelm Weber a Rudolf Kohlraush uskutočnili experiment na výpočet pomeru elektromagnetického náboja k elektrostatickému náboju z priamych meraní; pomer bol vypočítaný na $3,107 \times 10^8$ (Keithley, 1999; Maxwell, 1865). Len niekoľko rokov predtým Armand Fizeau a Léon Foucault navrhli experimenty na meranie rýchlosti svetla, pričom získali hodnoty $3,149 \times 10^8$ m/s a $2,980 \times 10^8$ m/s (Keithley, 1999; Maxwell 1865). Význam objavu Webera a Kohlrauscha si hneď neuvedomili a fyzici sa istý čas domnievali, že to nie je nič iné ako náhoda, že tento pomer tak tesne súhlasil s rýchlosťou svetla (Keithley, 1999; Young a Freedman, 2004). V roku 1861 James Clerk Maxwell publikoval opravu Ampérovho zákona medzi jeho súborom elektrodynamických rovníc v knihe *On Physical Lines of Force* (Maxwell, 1861; Young a Freedman, 2004). Amperov zákon vo svojej pôvodnej podobe uvádzal, že magnetické pole bolo generované elektrickým prúdom. S Maxwellovou korekciou uviedol, že magnetické pole bolo generované meniacim sa elektrickým poľom – v podstate to bol dôsledok Faradayovho zákona (Young a Freedman, 2004). Vychádzajúc z rovníc publikovaných predtým v *On Physical Lines of Force*, Maxwell publikoval matematické odvodenie vlnovej rovnice vo svojej *Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (Maxwell, 1865; Young a Freedman, 2004). Toto odvodenie dokázalo, že zrýchľujúce sa elektrické pole by generovalo kolmé magnetické pole (a naopak), ktoré spolu tvoria elektromagnetickú vlnu, ktorá sa môže šíriť prázdny priestorom. Riešenie Maxwellovej rovnice elektromagnetických vln pre rýchlosť vln vo vákuu ukazuje, že takáto vlna by sa pohybovala rýchlosťou svetla (Young a Freedman, 2004). Maxwell (1865) komentoval výsledky svojich odvodení a experimentov Webera a Kohlrauscha, Fizeaua a Foucaulta a uviedol: „Zdá sa, že zhoda výsledkov ukazuje, že svetlo a magnetizmus sú prejavy tej istej látky, a že svetlo je elektromagnetické vlnenie, ktoré sa šíri poľom podľa elektromagnetických zákonov.“ Maxwellove rovnice sú základom nášho súčasného chápania optiky, elektrodynamiky a elektrických obvodov. Maxwellova teória elektromagnetických vln tiež vysvetľuje, prečo sa svetlo pohybuje najrýchlejšie vo vákuu a pri prechode cez médium musí spomaliť. Teória elektromagnetických vln

a Maxwellove rovnice tvoria teoretický základ všetkých radarových aplikácií. Maxwell predpovedal existenciu elektromagnetických vln, ale bol to Heinrich Hertz, ktorý preukázal, že rádiové vlny existujú a môžu sa prenášať, lámať a odrážať rovnakým spôsobom ako viditeľné svetlo. Alexander Popov v roku 1897 pri testovaní svojho radarového prístroja na detekciu úderov blesku spozoroval na zázname interferenciu, keď v blízkosti preplávala loď. Hoci Popov uviedol, že tieto javy by mohli byť zneužitie na detekciu objektov, ďalej to neskúmal. V roku 1904 Christian Hülsmeier použil rádiové vlny na zistenie prítomnosti lodí, nie však ich dosahu alebo azimutu. V septembri 1922 výskumníci amerického námorníctva Albert Taylor a Leo Young, podobne ako predtým Popov, spozorovali, že okoloidúca loď prerušila ich rádiovú komunikáciu. Taylor a Young si uvedomili potenciálnu aplikáciu a navrhli použitie rádiových vysielačov a prijímačov na detekciu lodí pri nízkej viditeľnosti. Avšak až keď Lawrence Hyland v roku 1930 spozoroval, že lietadlo letiace nad hlavou prerušilo rádiovú komunikáciu, sa americká armáda vážne zaujímala o detekciu objektov pomocou rádiových vln. Skratka RADAR, čo znamená RAdio Detection And Ranging, bola vytvorená v roku 1934.

Walter Stern, možno vedomý si práce Hülsmeyera, vyvinul prvý pozemný radar (Ground Penetrating Radar = GPR) a použil ho na prieskum ľadovca v Rakúsku v roku 1929. Na používanie rádiových vln na podpovrchové mapovanie sa na niekoľko rokov v podstate zabudlo, až kým niekoľko lietadiel patriacich americkému letectvu neposkytlo falošné údaje o výške a piloti pri pokuse o pristátie na ľade v Grónsku havarovali. Obnovený záujem vyvolal skúmanie využitia radaru na mapovanie ľadu, hladiny podzemnej vody a vlastností podlažia. Systém GPR, v podstate rovnaký ako ten, ktorý použil Stern v roku 1929, bol vyvinutý na podpovrchový lunárny prieskum pre misiu Apollo 17. GPR sa prvýkrát stal komerčne dostupným v roku 1972 a odvtedy prebehlo veľa výskumov v oblasti vývoju technológie a jej aplikácií.

Pri realizácii metódy GPR vyžaruje špeciálna anténa rádiové vlny s určitou energiou. Po mnoho rokov sa používala bez regulačných obmedzení a do určitej miery by sa mohla považovať za nelegálny rádiový vysielač. Väčšina zariadení GPR mala veľmi nízky výkon a nepovažovala sa za významný zdroj rušenia. No rovnako, ako u všetkých zariadení, ktoré generujú elektromagnetické signály, regulačné orgány videli rastúcu oblasť jeho využitia a iniciovali tvorbu pravidiel dohľadu. GPR je teraz vo väčšine častí sveta regulovaný ako ultraširokopásmové (Ultra WideBand = UWB)

zariadenie so špecifickými obmedzeniami výkonu, frekvencie a použitia. Stupeň pokroku v tvorbe pravidiel a ich presadzovania sa značne líši. Regulačné úrady s jasnými normami sú Federálna komunikačná komisia (FCC), Industry Canada (RSS220) a Európsky inštitút pre telekomunikačné normy (ETSI EN 302-066 V2.1.0) (Wai-Lok Lai et al., 2017).

Na konci prvej štvrtiny 21. storočia môžeme len konštatovať, že georadarové (GPR) technológie sa stále vyvíjajú s veľkým potenciálom do budúcnosti.

Čo si predstaviť pod pojmom georadar a načo sa používa v 21. storočí

Geradar (GPR) je všeobecný termín používaný pre techniky, ktoré prenášajú signály rádiových vln do štruktúr a detegujú ich odrazy spôsobené zmenami vlastností materiálu v rámci týchto štruktúr. Najčastejšie sa signál rádiových vln vytvára ako krátky impulz elektromagnetickej (EM) energie. Signál GPR obsahuje široký rozsah frekvenčných zložiek, zvyčajne je v rozsahu 10–5000 MHz. Z tohto dôvodu sú prístroje GPR označované ako ultraširokopásmové (UWB) rádiové vlnové zariadenia. Signály GPR sú elektromagnetické (EM) vlny vytvorené zo spojených elektrických a magnetických polí, šíriacich sa do materiálu. Zmeny v elektrických a magnetických vlastnostiach materiálu rozptyľujú a odrážajú EM vlny. Prijímač GPR deteguje tieto rozptýlené a odrazené signály a poskytuje základ pre zobrazovanie vnútra štruktúry, ktorá je pre oči nepriehľadná. Vďaka pokročilému spracovaniu signálu a technikám rekonštrukcie obrazu sa tieto prijaté signály transformujú na 2D alebo 3D podpovrchový obraz umožňujúci „vidieť neviditeľné“.

Ako bolo spomenuté vyššie, komerčné využitie GPR začalo v oblasti geovied v 70. rokoch 20. storočia a od polovice 90. rokov sa postupne GPR techniky začali presadzovať v stavebníctve. Po roku 2000 technologický pokrok a obrovské zlepšenie digitálneho výpočtového výkonu viedli k rozkvetu aplikácií GPR. Niet pochýb o tom, že aplikácie GPR v súčasnosti postupujú od tradičného lokalizovania, testovania a hodnotenia objektov v malom meradle k 3D zobrazovaniu a on-line diagnostike. Vývoj vydláždil cestu pre rozsiahle a pravidelné využívanie GPR technológií v budúcich desaťročiach v takmer všetkých typoch infraštruktúr. Pokrok sa odráža popri tradičnom 2D zobrazovaní (B-scan alebo radargram) najmä v širokom využívaní 3D zobrazovania (C-scan alebo slice scan). Tento vývoj otvára dvere relatívne novému horizontu interpretácie a diagnostiky. Interpretácia 2D aj 3D je však stále veľmi

subjektívna a pri získavaní diagnostických informácií do značnej miery závisí od používateľskej skúsenosti a porozumenia získaného georadarového záznamu.

Dnes sa GPR používa v širokej škále nedeštruktívnych, podpovrchových mapovacích aplikácií:

- detekcia nevybuchnutej munície,
- lokalizácia možných archeologických nálezísk,
- lokalizácia zakopaných potrubí,
- polohovanie zapustenej betonárskej ocele,
- kontrola chodníkov a ciest,
- kontrola mostných konštrukcií,
- mapovanie pôdných vrstiev,
- mapovanie oblakov kontaminantov,
- mapovanie hladiny podzemnej vody,
- mapovanie hrúbky ľadu,
- detekcia podpovrchových dutín,
- prieskum pre podzemné stavitel'stvo.

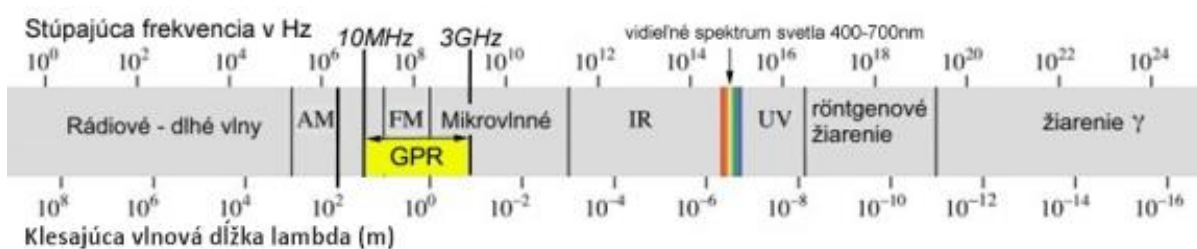
Poprední výrobcovia georadarov (GPR) sú - GSSI, MALA, IDS GeoRadar, Sensors & Software, GEOTECH, SSI, US Radar, Utsi Electronics, Chemring Group, Proceq, Radiodetection, Japan Radio Co, ChinaGPR, Kedian Reed.

2 Teoretické základy

2.1 Elektromagnetické vlnenie

Maxwellove rovnice matematicky opisujú princíp elektromagnetických (EM) vln a súvisiace vlastnosti prostredia. Základné rovnice kvantifikujú tri fyzikálne vlastnosti materiálov, a to: elektrickú vodivosť (σ), elektrickú permitivitu (ϵ) a magnetickú permeabilitu (μ).

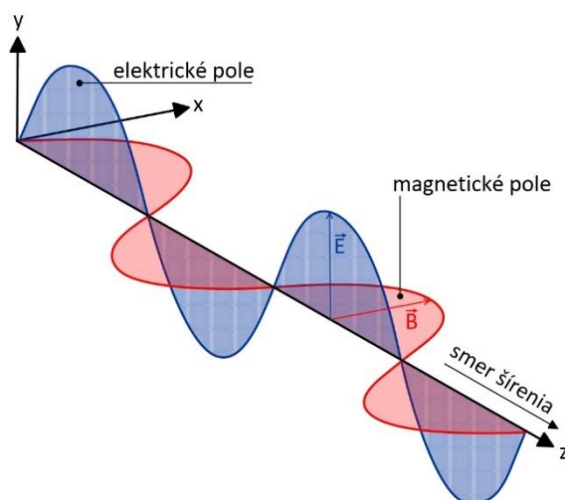
GPR metódy vychádzajú z Maxwellových rovníc a ich základný princíp fungovania je založený na šírení elektromagnetickej (EM) vlny prostredím. Elektromagnetické (EM) vlny zahŕňajú rádiové vlny, mikrovlny, infračervené, (viditeľné) svetlo, ultrafialové, röntgenové lúče a gama lúče, pričom všetky sú súčasťou elektromagnetického spektra. Frekvenčná oblasť, ktorú pokrýva EM vlnenie je teda široká, ako je vidieť na obr. 2.1. GPR využíva frekvencie v mikrovlnnej časti tohto spektra, približne od 1 MHz do 3 GHz (Warren, 2009).



Obr. 2.1 Frekvenčné spektrum elektromagnetického vlnenia s vyznačenou oblasťou využívanou GPR systémami (Terry, 2021).

EM vlnu môžeme definovať ako lokálnu zmenu elektromagnetického poľa. Tvoria ju dve navzájom kolmé zložky, elektrická a magnetická, ktoré sa v čase menia. Pri šírení sa EM vlny prostredím dochádza k priestorovej a časovej zmene vektora intenzity elektrického poľa (E) a súčasne k zmene vektora magnetickej indukcie (B), pričom oba vektory sú kolmé na smer šírenia sa vlny (obr. 2.2), (Reynolds, 2011).

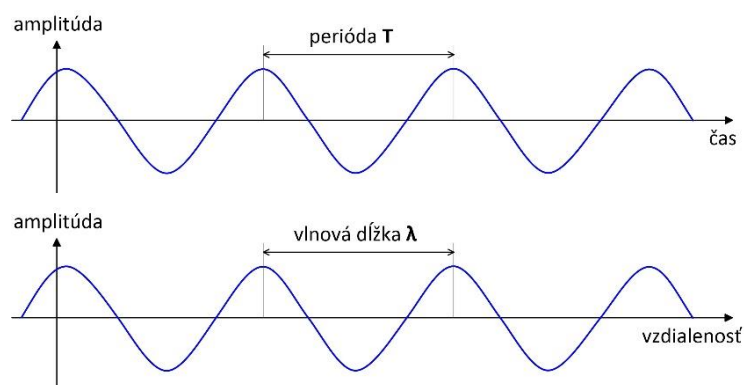
Na vytvorenie EM vlnenia sa využíva striedavý prúd. Keďže zmena polarizácie zdroja sa mení sínusovo, preto aj EM vlna má tvar sínusoidy (Reynolds, 2011).



Obr. 2.2 Elektromagnetická vlna a jej zložky.

Základnými parametrami EM vlnenia sú amplitúda A , vlnová dĺžka λ , perióda T (frekvencia f) a rýchlosť šírenia sa EM vlny vo vákuu c .

Rýchlosť šírenia sa EM vlny vo vákuu je základná fyzikálna konštanta a má hodnotu $299\,792\,458\text{ m/s}$. Pre zjednodušenie sa často používa zaokrúhlená hodnota $300\,000\,000\text{ m/s}$ ($0,3\text{ m/ns}$). Perióda vlnenia T a frekvencia f sú veličiny, ktoré popisujú časové zmeny jednotlivých zložiek pri šírení EM vlny. Perióda je časový úsek medzi dvoma extrémami vlnenia v rovnakej fáze a je udávaná v časových jednotkách. Obrátenou hodnotou k periode je frekvencia vlnenia f , ktorá vyjadruje počet opakovaní periodického javu za jednotku času a je udávaná v jednotkách Hertz (Hz). Zmenu fázy za jednotku času vyjadruje uhlová frekvencia ω . Vlnová dĺžka popisuje priestorové zmeny zložiek elektromagnetického vlnenia. Vyjadruje vzdialenosť dvoch rovnakých fáz vlnenia v metroch (obr. 2.3)



Obr. 2.3 Základné parametre elektromagnetického vlnenia - perióda a vlnová dĺžka.

Medzi uvedenými parametrami EM vlnenia platia nasledujúce vzťahy (2.1, 2.2):

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f} = \frac{2\pi v}{\omega}, \quad (2.1)$$

$$\omega = 2\pi f, \quad (2.2)$$

kde v je rýchlosť šírenia sa vlny v konkrétnom prostredí a ω je uhlová frekvencia.

2.2 EM vlastnosti horninových materiálov

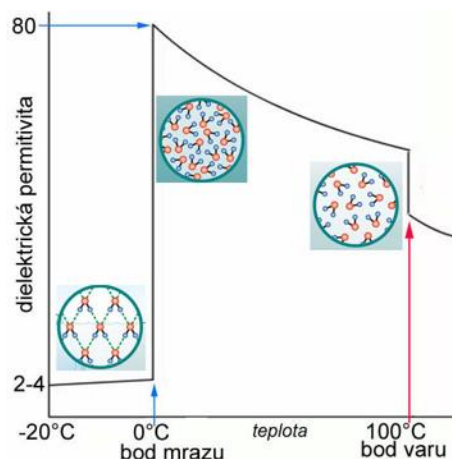
Šírenie EM vlnenia je ovplyvnené EM vlastnosťami prostredia, ktorým sa šíri. Podľa toho, akú majú jednotlivé materiály elektrickú vodivosť, dielektrickú permitivitu a magnetickú permeabilitu, pohlcujú a spätne uvoľňujú prijatú energiu šíriaceho sa vlnenia.

Elektrická vodivosť (konduktivita, σ) vyjadruje schopnosť materiálu viesť elektrický prúd. Je prevrátenou hodnotou elektrického odporu. Čím je prostredie vodivejšie, tým ľahšie vedie elektrickú zložku EM vlny, čo má za následok väčšie zoslabenie signálu a tým zmenšenie penetračnej hĺbky (Dojack, 2012).

Dielektrická permitivita (ε) popisuje schopnosť materiálu ukladať a prenášať elektrický náboj indukovaný EM poľom. Najnižšiu hodnotu permitivity má vákuum, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m, ostatné látky majú permitivitu väčšiu. Permitivitu látok často reprezentuje bezrozmerná veličina tzv. relatívna permitivita (ε_r) vyjadrená vzťahom (2.3), ako pomer absolútnej permitivity (ε) k permitivite vákua (ε_0).

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad (2.3)$$

Zo vzťahu (2.3) je zrejmé, že relatívna permitivita vákua je 1. Hodnoty relatívnej permitivity ostatných látok sa pohybujú v rozpätí od 1 pre vzduch do 81 (Reynolds, 2011) pre vodu pri teplote 20°C. Permitivita vody (i vodivosť) sa mení v závislosti od teploty, postupne klesá so zvyšujúcou sa teplotou. Pri teplotách pod 0°C klesne skokovo, takže relatívna permitivita ľadu má veľmi nízke hodnoty (obr. 2.4), (Terray, 2021).



Obr. 2.4 Graf závislosti relatívnej permitivity vody/ladu od teploty (Terray, 2021).

Magnetická permeabilita (μ) popisuje schopnosť prostredia zmagnetizovať sa v prítomnosti EM poľa (Dojack, 2012). Vyjadruje sa aj ako relatívna magnetická permeabilita (μ_r), čo je pomer permeability materiálu (μ) a permeability vákua (μ_0), pričom hodnota permeability vákua je $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$, (2.4):

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}. \quad (2.4)$$

Predpokladá sa, že väčšina materiálov, s ktorými sa pri GPR prieskume stretávame nie sú magnetické (majú permeabilitu blízku μ_0), a preto ich relatívna permitivita $\mu_r = 1$. Ak však materiály obsahujú viac ako 10–20 % objemu magnetických minerálov (magnetit, hematit alebo maghemit), napr. piesok bohatý na železo, hrdzavejúce ocelové výstuže, treba ich permeabilitu brať do úvahy (Goodwin a Cassidy, 2008 in Warren 2009). Materiály s vyššou magnetickou permeabilitou ľahko interferujú s magnetickou zložkou EM vlnenia, čím sa zníži je hĺbkový dosah (Dojack, 2012).

Horninové prostredie, ktorým sa EM vlna vysielaná GPR systémom šíri nie je jednoduchý materiál. Predstavuje komplex tvorený jednak pevnými zrnami (matrix) a jednak pórovým priestorom, ktorý môže byť vyplnený kvapalinou (voda, pôdna vlhkosť) alebo plynom (väčšinou pôdnym vzduchom) (Gajdoš, 2013). Permitivita, permeabilita a vodivosť horninového prostredia závisí teda od typu horniny, zeminy alebo sedimentu, ich minerálneho zloženia, kompaktie, zastúpenia jemnozrnných častíc, či obsahu pórového priestoru (Tábořík, 2022). Práve voda obsiahnutá

v pórovom priestore výrazne ovplyvňuje EM vlastnosti prostredia. Horninový skelet je v prevažnej miere elektricky nevodivý, s nízkymi hodnotami permitivity (ak neobsahujú rudné minerály). Permitivita prostredia je preto väčšinou určovaná obsahom vody v pórovom priestore a tá je daná pórovitosťou a mierou nasýtenia (Gajdoš, 2013). Voda je tiež dobré rozpúšťadlo iónových zlúčenín (aj vďaka vysokej permitivite). Rozpúšťa soli a vytvára vodivé ionové roztoky, čím jej prítomnosť zvyšuje vodivosť prostredia (napr. vplyvom vlhkosti sa zvyšuje vodivosť v kyslých a zásaditých pôdach), (Terray, 2021). Okrem vody permitivitu a vodivosť horninového prostredia výrazne ovplyvňuje aj prítomnosť ílovitých minerálov. Hodnoty oboch veličín sa zvyšujú s rastúcim obsahom ílovitej zložky (Gajdoš, 2013) a menia sa aj v závislosti od teploty a tlaku.

V tabuľke 2.1 sú uvedené orientačné hodnoty relatívnej permitivity a vodivosti pre jednotlivé typy horninového prostredia a stavebných materiálov. Treba však mať na pamäti, že fyzikálne vlastnosti prostredia na konkrétnych lokalitách sa aj pri rovnakom litologickom zložení môžu výrazne líšiť (Gajdoš, 2013).

2.3 Rýchlosť šírenia sa EM vlny v prostredí

Rýchlosť šírenia sa EM vlnenia závisí od elektromagnetických vlastností prostredia, ktorým sa vlna šíri (permitivity, vodivosti a permeability) a je daná nasledujúcim vzťahom (2.5), (Reynolds, 2011):

$$v_m = c / \sqrt{(\varepsilon_r \mu_r / 2) \left[\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\varepsilon \omega} \right)^2 \right) + 1 \right]}, \quad (2.5)$$

kde c je rýchlosť šírenia sa EM vlny vo vákuu, σ je vodivosť, ω je uhlová frekvencia, ε je permitivita, ε_r je relatívna permitivita a μ_r je relatívna permeabilita (pre nemagnetické látky $\mu_r = 1$).

Pre látky so zanedbateľnou vodivosťou a permeabilitou blížiacou sa permeabilite vákua môže byť rovnica zjednodušená na (2.6), (Warren, 2009):

$$v = c / \sqrt{\varepsilon_r} = 0,3 / \sqrt{\varepsilon_r}. \quad (2.6)$$

Prehľad teoretických hodnôt rýchlosti šírenia sa rádiových vln pre rôzne prostredia je uvedený v tabuľke 2.1.

Tabuľka 2.1: Hodnoty relatívnej permitivity, vodivosti a rýchlosti šírenia sa rádiových vln pre rôzne horninové prostredia (Reynolds, 2011).

Materiál	relatívna permitivita	vodivosť	rýchlosť
		[mS/m]	[mm/ns]
Vzduch	1	0	300
voda morská	81-88	3000	33
voda sladká	81	0,5	33
ľad - morský	2,5 - 8	10 - 100	78 - 157
ľad - sladkovodný	4	1 - 0,000001	150
štrk	5	10	134
piesok - suchý	4 - 6	0,0001 - 1	123 - 173
piesok - mokrý	10 - 32	0,1 - 10	53 - 95
íl - suchý	2 - 5	2 - 100	134 - 212
íl - mokrý	8 - 40	20 -1000	47 - 106
silt - nenasýtený	2,5 - 5	1 - 100	134 - 190
silt - nasýtený	22 - 30	≤ 100	55 - 64
jemnozrná pôda	41 - 49	40	43 - 47
priemerná pôda	16	5	75
granit	5 - 8	0,001 - 0,00001	106 - 120
vápenec - suchý	4 - 8		100 - 113
vápenec - mokrý	6 - 15	10 - 100	77 - 122
pieskovec - suchý	4 - 7		113 - 150
pieskovec - mokrý	6	0,01 - 0,001	122
bridlice	6 - 9	10 - 100	100 - 122
uhlie	4 - 5		134 - 150
betón	4 - 30	55 - 150	1 - 100
asfalt	3 - 5		134 - 173

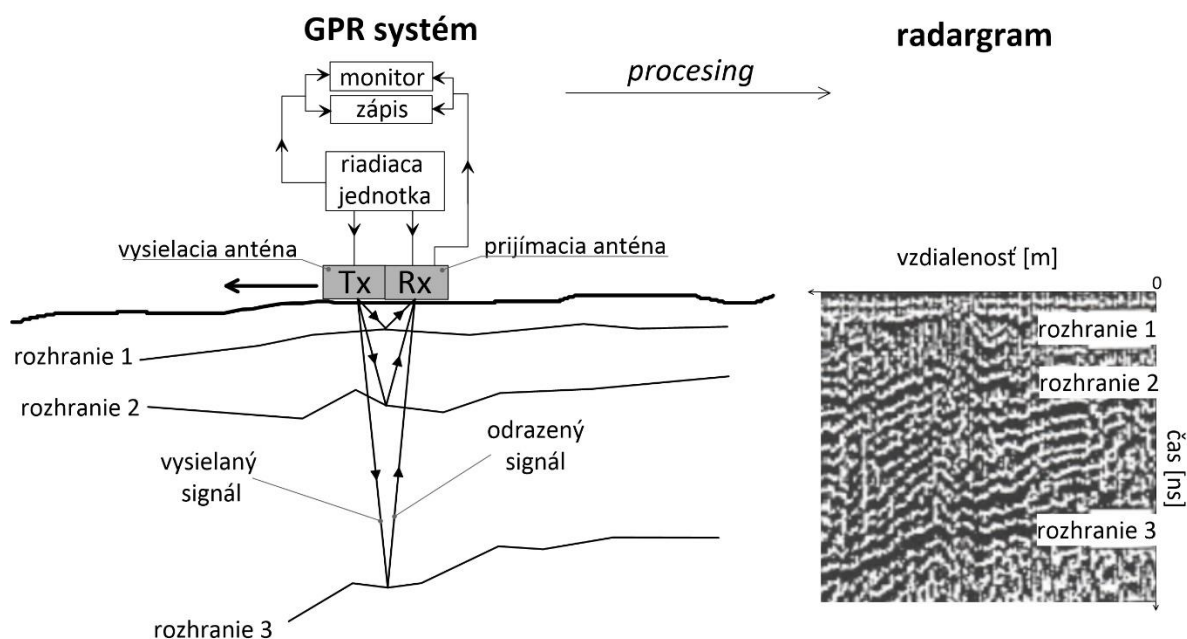
3 Princípy GPR – systém, anténa, rozlíšenie

Anglický názov GPR – ground penetrating radar – vystihuje základný princíp týchto meracích prístrojov (v slovenčine: pozemný radar). GPR penetruje (preniká) podložie vysokofrekvenčnou elektromagnetickou energiou, ktorú vo forme impulzov budí vysielacia anténa (transmitter – Tx). Podľa toho, aké majú jednotlivé materiály elektrické vlastnosti – dielektrickú permitivitu a vodivosť, pohlcujú a spätne uvoľňujú prijatú budiacu energiu. Vyžiarené impulzy sa v dôsledku toho buď odrážajú alebo lámu od objektov v podloží. Výsledkom tohto procesu je modulovaný signál prijatý prijímacou anténou (receiver - Rx), ktorý je následne digitálne spracovaný v riadiacej jednotke GPR.

Pri tomto základnom cykle činnosti GPR sa vytvorí jeden záznam alebo stopa (po anglicky trace), čo sa dá prirovnať výstupu, ktorý vidíme na digitálnych osciloskopoch. Pre vizualizáciu informácií, ktoré nesie GPR stopa sa však nepoužíva klasické analógové zobrazenie krivky signálu ale zobrazenie vo farebnej škále. Ak by sme použili sivú paletu, tak maximum pozitívneho signálu je priradená biela farba, minimum záporného signálu čierna a všetkým ostatným úrovniam zodpovedajúci odtieň sivej farby.

Pri pohybe antén po povrchu sa postupne spúšťajú ďalšie merania a spracované stopy sa radia na displeji GPR jedna vedľa druhej. Vzniká tak súvislý záznam merania – tzv. radargram, ktorý predstavuje 2D profil prostredia pod povrchom (nazývaný tiež ako tzv. B-scan). 2D profil preto, lebo v sebe obsahuje informáciu o vzdialenosti stopy na profile v smere pohybu x a tiež časovú os v zmysle hĺbky merania t (obr. 3.1). Nie je to však röntgenový snímok, kde vidíme objekty také aké sú. Je to pohľad do fyzikálnych vlastností podložia.

GPR systém pozostáva z jednej alebo viacerých vysielacích a prijímacích antén (v závislosti od použitého systému a metódy), riadiacej jednotky a zdroja energie. Základný princíp GPR je znázornený na obr. 3.1 a opísaný v nasledujúcich podkapitolách.



Obr. 3.1 Základný princíp GPR - schéma radarového systému a merania, výsledný záznam po spracovaní - radargram; Tx - vysielateľ, Rx - prijímač (upravené podľa Reynolds 2011).

3.1 Riadiaca jednotka

Riadiaca jednotka obsahuje elektroniku, ktorá spúšťa impulz radarovej energie, vysielaný anténou do zeme a tiež má vstavaný počítač a pevný disk (pevná pamäť) na ukladanie nameraných údajov k ďalšiemu spracovaniu. Väčšina riadiacich jednotiek má aj displej, ktorý okrem možnosti nastavenia meracích parametrov slúži aj na mapovanie a trasovanie detegovaných objektov priamo v terénne (in-situ).

Niektoré systémy, ako napríklad GSSI SIR 30, sú ovládané pripojeným prenosným počítačom so systémom Windows s predinštalovaným ovládacím softvérom, iné - ako napríklad riadiace jednotka Mala (GX kontrolér) používa Linux.

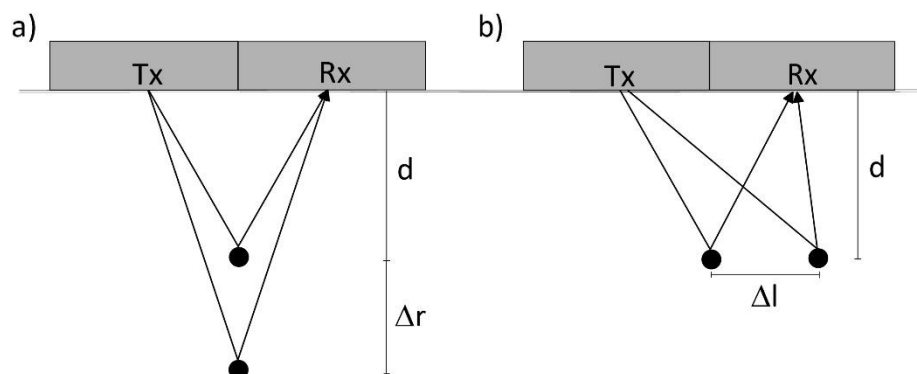
Najnovším trendom sú aplikácie pre mobilné zariadenia, ktoré umožnia pripojenie GPR antény k vášmu mobilnému zariadeniu (telefón, tablet) a po skončení merania môžete údaje poslať do online systému na spracovanie a výsledky zdieľať s kolegami všade tam, kde je dostupný internet alebo mobilný signál. Príklad takéhoto riešenia je aplikácia Mala Controller App s online riešením Mala Vision.

3.2 GPR anténne systémy

GPR anténa je srdcom georadarového systému a preto si pred každým meraním, ak chceme úspešne splniť cieľ, treba položiť dve otázky: „Koľko GPR antén budem potrebovať?“ a „Akú majú mať frekvenciu?“ Získanie vhodného súboru údajov je mimoriadne dôležité, takže výber správnej radarovej antény je v každom prípade nevyhnutnosťou. V literatúre a na internete je možné nájsť nespočetné množstvo tabuliek, ktoré vypisujú kontroverzné informácie a nechávajú nezasvätených v totálnom zmätku a s pocitom zúfalstva. V tejto kapitole si v tom skúsime urobiť trocha poriadok. V pozemných radaroch existujú dva typy rozlíšení: vertikálne, čo je to, ktoré sa „pozerá“ priamo do zeme, a horizontálne, ktoré je rovnobežné s rovinou povrchu realizovaného merania. Inými slovami, mali by sme byť schopní vypočítať, alebo aspoň odhadnúť, minimálnu vzájomnú vzdialenosť a veľkosť objektov, ktoré sa pokúšame preskúmať, vo vertikálnom a v horizontálnom smere. Poďme sa teda pozrieť na trochu teórie a v ďalších podkapitolách sa zoznámim s každým z týchto pojmov oddelene.

3.2.1 Rozlišovacia schopnosť antény

Rozlišovacia schopnosť GPR antény určuje ako presne sa dajú lokalizovať ciele a koľko geometrických detailov môže byť z prichádzajúceho signálu extrahovaných. Udáva **minimálnu vzdialenosť objektov (vzdialenosť rozhraní, veľkosť objektov)**, ktoré sa snažíme skúmať, aby sme ich zaregistrovali ako samostatné objekty. Celková rozlišovacia schopnosť systému je daná vertikálnou (hĺbkovou, obr. 3.2a) a horizontálnou (laterálnou, obr. 3.2b) rozlíšiteľnosťou (Warren, 2009).

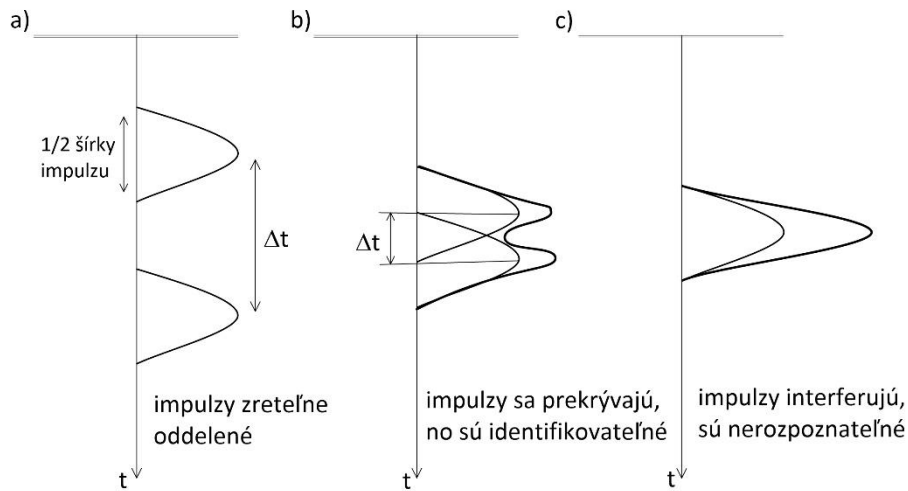


Obr. 3.2 Rozlíšenie GPR systémov: a) vertikálne a b) horizontálne (podľa Warren, 2009).

Vertikálne rozlíšenie

Vertikálne rozlíšenie je vlastne schopnosť rozlíšiť dva susediace signály v čase (Reynolds, 2011). Aby dva rovnaké objekty, ktorých vertikálna vzdialenosť v prostredí je Δr (obr. 3.2a), boli na GPR zázname zachytené ako dve samostatné odozvy, časové oneskorenie Δt medzi nimi musí byť väčšie ako $\frac{1}{2}$ šírky šíriaceho sa impulzu (obr. 3.3) (Warren, 2009), teda $\frac{1}{2}$ periódy signálu (3.1):

$$\Delta t \geq \frac{T}{2}. \quad (3.1)$$



Obr. 3.3 Rozlíšiteľnosť dvoch impulzov na časovom zázname keď je ich vzdialenosť Δt a) väčšia ako $\frac{1}{2}$ šírky impulzu, b) rovná $\frac{1}{2}$ šírky impulzu, c) menšia ako $\frac{1}{4}$ šírky impulzu. Ak je vzdialenosť medzi dvoma odozvami menšia ako $\frac{1}{2}$ šírky impulzu dochádza na zázname registrovanom prijímacou anténou k ich vzájomnému prekrytiu (upravené podľa Reynolds 2011).

Ak čas príchodu zaznamenaného signálu odrazeného od prvého objektu (t_1) a od druhého objektu (t_2), vyjadríme pomocou vzťahov (3.2) a (3.3) a rozdiel medzi nimi (Δt) ako (3.4), zo vzťahov (3.1), (3.4) a (2.1) môžeme potom odvodiť vzťah (3.5), podľa ktorého minimálna vertikálna vzdialenosť objektov (Δr) musí byť väčšia ako $\frac{1}{4}$ vlnovej dĺžky šíriaceho sa signálu.

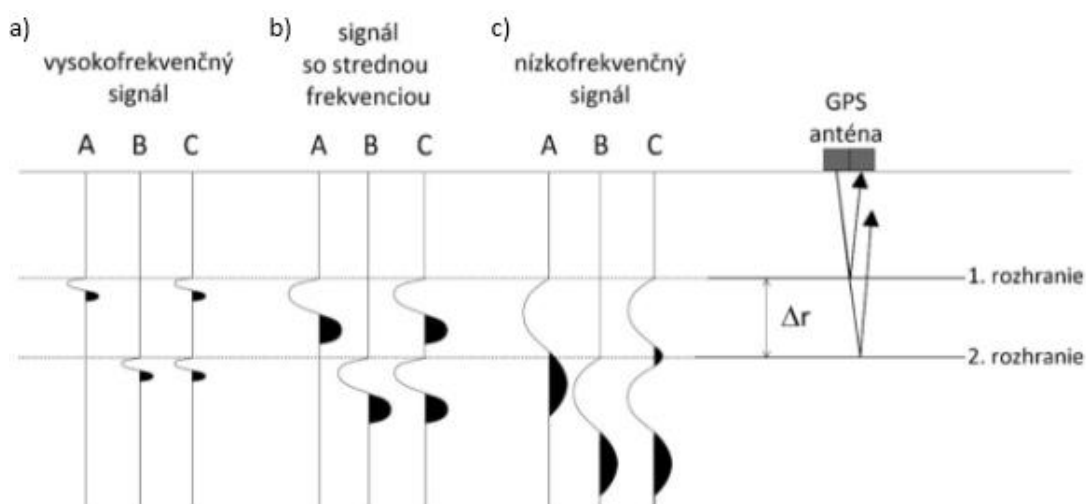
$$t_1 = \frac{2d}{v}, \quad (3.2)$$

$$t_2 = \frac{2d+2\Delta r}{v}, \quad (3.3)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2\Delta r}{v}, \quad (3.4)$$

$$\Delta r \geq \frac{vT}{4} \Rightarrow \Delta r \geq \frac{\lambda}{4}. \quad (3.5)$$

Vertikálne rozlíšenie je funkcia šírky impulzu (vlnovej dĺžky). Vzhľadom na vzťahy medzi základnými parametrami vlnenia (2.1) bude vertikálne rozlíšenie závisieť od frekvencie (obr. 3.4) a rýchlosti signálu. Teoretické vertikálne rozlíšenie GPR systému v konkrétnom prostredí bude teda určovať frekvencia použitej vysielacej antény a rýchlosť šírenia sa vysielaného signálu. Napríklad vlnová dĺžka impulzu zo 100 MHz antény (perióda signálu je $T = 1/(100 \cdot 10^6 \text{ s}) = 10 \text{ ns}$ vysielaného cez vlhkú pôdu, kde rýchlosť šírenia sa signálu je cca 0,06 m/ns, bude $\lambda = 0,06 \text{ m/ns} \cdot 10 \text{ ns} = 0,6 \text{ m}$. Vertikálne rozlíšenie podľa vzťahu (3.5) je $\frac{1}{4} \lambda$, v tomto prípade 15 cm. To znamená, že systém je schopný zaregistrovať samostatne dva objekty (rozhrania), ak budú vzdialené vo vertikálnom smere minimálne 15 cm (Reynolds, 2011).



Obr. 3.4 Schematické znázornenie závislosti vertikálneho rozlíšenia od frekvencie: a) na zázname sú oba odrazy zreteľne oddelené, b) rozhrania na zázname sú ešte stále identifikovateľné ako samostatné udalosti, c) odrazy sa prekrývajú, 2. rozhranie je nerozpoznateľné; A - záznam odrazu od 1. rozhrania, B - záznam odrazu od 2. rozhrania, C - výsledná stopa vzniká sumáciou záznamu A a B.

Príklady teoretického minimálneho rozlíšenia pre dve konkrétne prostredia, pri troch frekvenciách sú v tabuľke 3.1. Treba si uvedomiť, že uvedené hodnoty sú iba teoretické. V skutočnosti je hodnota rozlíšenia menšia ako vypočítaná, pretože je v dôsledku povahy signálu zdrojovej vlny spojennej s odozvou zeme ešte ovplyvnená ďalšími faktormi, napr. energetickými stratami pri šírení signálu alebo materiálovými charakteristikami dvoch blízkych objektov. Pri plánovaní prieskumu i pri interpretácii spracovaných dát treba počítať s tým, že vertikálne rozlíšenie pri objektoch, ktoré sa nachádzajú ďalej od povrchu bude iné ako tých, ktoré sú bližšie k zdroju signálu.

A objekty tvorené materiálmi, ktoré vytvárajú silné odrazy môžu zatieniť odozvu od objektov v ich blízkosti, ktorých odraz je menej výrazný (Cabrera, 2007; Reynolds 2011).

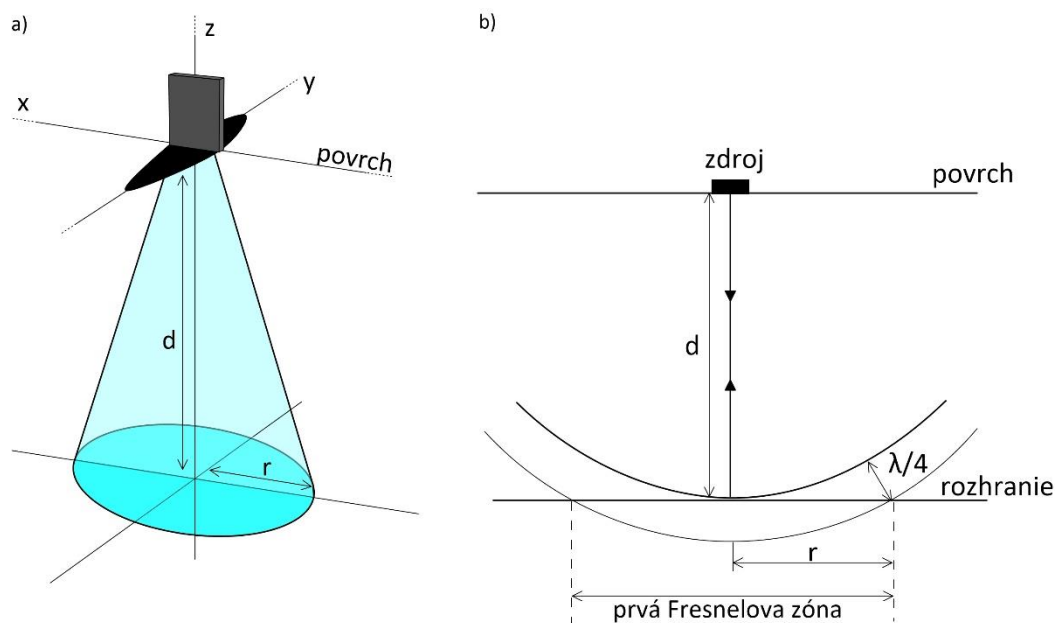
Tabuľka 3.1 Vertikálne rozlíšenie pre dva základné typy horninového prostredia pri rôznych frekvenciách signálu (Reynolds, 2011).

typ horninového prostredia		frekvencia vysielačnej antény		
		120 MHz	500 MHz	900 MHz
pôda	vlnová dĺžka [cm]	62,5	15	8
	rozlíšenie [cm]	15,6	3,75	2
podložie	vlnová dĺžka [cm]	92	22	12
	rozlíšenie [cm]	23	5,5	3

Trochu máťúce, však? Ale v skutočnosti nie. Keď to celé zhrnieme, tak z toho všetkého vychádza, že georadar meria čas a prepočet na hĺbku sa robí až neskôr, na základe znalosti dielektrickej konštanty média. Ak však z dôvodu prehľadnosti vezmeme do úvahy, že radar meria vzdialenosť, potom môžeme povedať, že vertikálne rozlíšenie je najmenšia vzájomná vzdialenosť dvoch cieľov v smere kolmom na povrch, v ktorej môžu byť, aby sme ich videli a rozlíšili ako oddelené objekty, tak ako je to znázornené na obr. 3.2a.

Horizontálne rozlíšenie

Horizontálne rozlíšenie Δl (obr. 3.2b) je ovplyvnené kužeľovitým tvarom šíriaceho sa signálu (obr. 3.5a), (Cabrera, 2007). Závisí od polomeru tzv. prvej Fresnelovej zóny (FZ). Prvú Fresnelovú zónu si môžeme predstaviť ako otláčok vlny dopadajúcej na rozhranie (obr. 3.5b). Vymedzuje minimálnu oblasť, v ktorej predmety s menšími rozmermi ako má táto zóna nebudú zobrazené. To znamená, že minimálna vzdialenosť objektov Δl , aby ich systém zaregistroval ako samostatné objekty, musí byť väčšia ako polomer prvej Fresnelovej zóny (Reynolds, 2011).

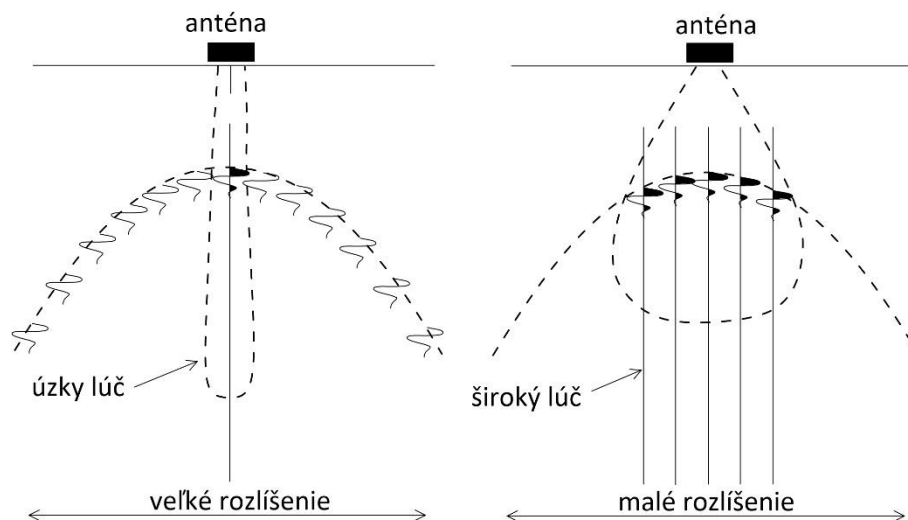


Obr. 3.5 Geometrická charakteristika GPR signálu: a) kuželovitý tvar, b) zjednodušený koncept jeho „otlačku“ - prvá Fresnelova zóna (Terry, 2021; Annan, 2004; Reynolds, 2011).

Polomer Fresnelovej zóny (r) je funkciou šírky impulzu (vlnovej dĺžky), rýchlosti jeho šírenia sa prostredím a vzdialenosti objektov od antén (d). Potom horizontálne rozlíšenie Δl môžeme vyjadriť ako (3.6), (Warren 2009):

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{vd\lambda}{2}}. \quad (3.6)$$

Čím väčšia je prvá FZ, tým menšia bude rozlišovacia schopnosť pri rozlišovaní medzi susednými objektami (Reynolds, 2011). A vzhľadom na to, že lúč antény je kvôli svojmu kónickému tvaru pri povrchu užší (je bližšie pri zdroji) a smerom do hĺbky sa rozširuje, bude horizontálne rozlíšenie pri povrchu lepšie ako pri hlbších objektoch a to nezávisle od vysielačnej frekvencie použitej antény (obr. 3.6)



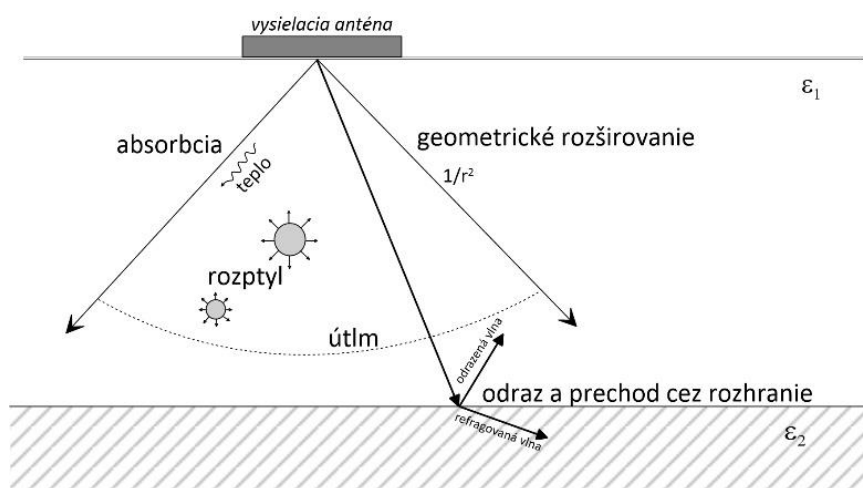
Obr. 3.6 Horizontálne rozlíšenie v závislosti na šírke lúča (Reynolds, 2011).

Okrem toho je horizontálne rozlíšenie nepriamo úmerné $\sqrt{\alpha}$, kde α je koeficient útlmu (Daniels et al. 1988 in Reynolds 2011). V dôsledku toho je horizontálne rozlíšenie v skutočnosti lepšie v prostredí s vyššou stratou energie ako s nízkou stratou energie (Reynolds, 2011). Ďalším parametrom, ktorý má vplyv na horizontálne rozlíšenie GPR systému, je počet zaznamenaných stôp na jednotku vzdialenosti (napr.: ak systém zaznamenáva 10 stôp na 1 m, nie je možné rozlíšiť predmety vzdialené od seba 50 mm), (Cabrera, 2007). To môže byť problém pri GPR systémoch umožňujúcich horizontálny stacking (sumáciu) stôp pre zlepšenie pomeru signál/šum (pri spočítaní niekoľkých stôp sa šum potlačí, nakoľko má náhodný charakter – raz dosahuje kladné, raz záporné hodnoty). Stackingom sa totiž horizontálne rozlíšenie zníži. V takých prípadoch treba zvoliť vhodný kompromis medzi optimalizáciou intenzity odrazeného signálu a znížením horizontálneho rozlíšenia (Reynolds, 2011).

Zdá sa, že horizontálne rozlíšenie je o niečo zrozumiteľnejšie ako vertikálne, pretože vzdialenosť v horizontálnom smere sa meria v jednotkách dĺžky a nie v jednotkách času ako vo vertikálnom smere. Keď to znovu zhrnieme, tak horizontálne rozlíšenie je teda minimálna vzdialenosť medzi dvoma objektmi v rovnakej horizontálnej rovine rovnobežnej s povrchom, keď radar ešte „vidí“ oba objekty ako samostatné. Zjednodušene povedané, je to minimálna horizontálna vzdialenosť medzi dvoma cieľmi v rovnakej hĺbke, potrebná na to aby ich radar nezlúčil a nezaznamenal ako jeden objekt.

3.2.2 Hĺbkový dosah GPR antén – strata energie signálu

Pri šírení sa EM vlnenia prostredím dochádza k strate energie šíriaceho sa signálu (obr. 3.7), čo výrazne ovplyvňuje hĺbkový dosah GPR systému (Warren, 2009). K takýmto stratám dochádza z viacerých dôvodov. Šíriaca sa vlna stráca energiu pri každom odraze (reflexii) a prechode (transmisii, refrakcii) cez rozhranie dvoch médií s rôznymi EM vlastnosťami, pretože energia dopadajúcej vlny sa delí medzi vlny vznikajúce na rozhraní (odrazenú, refragovanú). V prípade, že sa v prostredí nachádzajú nehomogenity s rozmermi porovnateľnými s vlnovou dĺžkou šíriaceho sa signálu, dochádza k stratám v dôsledku jeho rozptylu. Ďalšie straty sú spôsobené absorpciou (premenou EM energie na teplo) a geometrickým rozširovaním sa signálu od vysielača. Pri stratách geometrickým rozširovaním signálu sa energia vlnenia rozkladá na povrchu stále väčšej gule pričom veľkosť energie klesá s faktorom $1/r^2$, kde r je vzdialenosť od zdroja.



Obr. 3.7 Straty energie pri šírení sa GPR signálu prostredím (podľa Reynolds 2011).

Hlavným dôsledkom energetických strát pri šírení sa signálu prostredím je útlm jeho celkovej energie. Pokles energie pri útlme (3.7) je daný pomerom energie vysiadaného signálu (E_0) k energii signálu vo vzdialenosti x od zdroja (E_x) a závisí od hodnoty koeficienta útlmu (α):

$$\frac{E_0}{E_x} = e^{-\alpha x} . \quad (3.7)$$

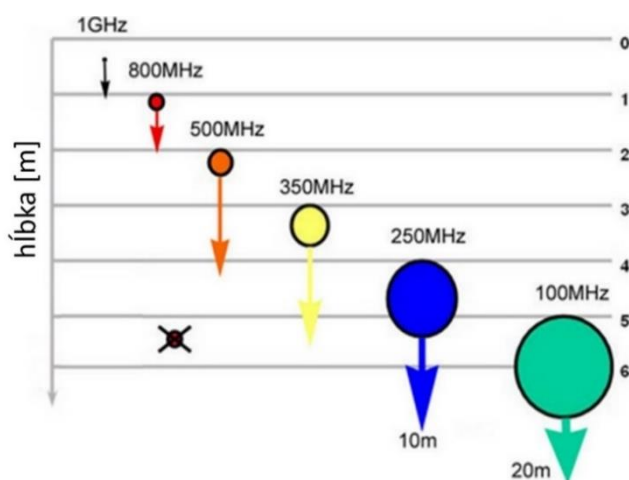
Koeficient útlmu (α) je komplexnou funkciou vlastností média (permitivity, permeability, vodivosti), ktorým sa signál šíri a frekvencie šíriaceho sa signálu (3.8):

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}} - 1 \right)}, \quad (3.8)$$

kde ω je uhlová frekvencia, σ je vodivosť, ϵ je dielektrická permitivita a μ je magnetická permeabilita. Tento vzťah platí síce iba pre nemagnetické materiály (Reynolds, 2011), no Everett (2013 v Tábořík 2022) uvádza, že pri frekvenciách, s ktorými radar najčastejšie pracuje (10 MHz - 1 GHz) sa EM vlna šíri nemagneticky.

Energetické straty pri šírení EM vlny prostredím spôsobujú, že niektoré materiály sa správajú ako transparentné, majú teda minimálny útlm (napr. polárny ľad). Iné materiály EM vlnenie absorbujú alebo odrážajú natoľko, že sa správajú ako nepriehľadné (napr. saturovaný íl, morská voda). Hĺbka, pri ktorej energia signálu klesne na $1/e$ pôvodnej amplitúdy (e je Eulerovo číslo), t.j. na 37%, sa označuje ako „skinová“ - hĺbka (δ) a je nepriamo úmerná koeficientu útlmu (α), (Reynolds, 2011).

Vo všeobecnosti vysoká permitivita a vodivosť zvyšujú útlm EM signálu. To znamená, že prostredie s vysokými hodnotami týchto parametrov znižuje hĺbkový dosah GPR meraní (Gajdoš, 2013). Hĺbkový dosah meracieho GPR systému je však výsledkom kombinácie fyzikálnych vlastností prostredia, ktorým sa signál šíri a frekvencie vysielaného signálu, teda energie počiatočného impulzu. Zjednodušený pohľad na hĺbkový dosah vo vzťahu k frekvencii antén GPR je na obr. 3.8.



Obr. 3.8 Hĺbkový dosah a rozlišovaciu schopnosť vo vzťahu k frekvencii antén GPR (prečiarknutý objekt v hĺbke 5,5 m vyjadruje skutočnosť, že je pre vyššie frekvencie nečitateľný).

Ako už bolo povedané, zásadným faktorom, ktorý ovplyvňuje hĺbku dosahu antén je exponenciálny útlm elektromagnetickej energie v materiáloch. Preto na otázku zväčšenia dosahu antén zvýšením výkonu vyžarovania, majú seriózne GPR technológie jednoduchú exponenciálnu odpoveď. Preto keby sme chceli touto cestou zvýšiť dosah antény na dvojnásobok museli by sme zvýšiť výkon antén stonásobne. Výkon antén GPR býva rádovo do 1 W. Enormné zvyšovanie výkonu by okrem technických problémov nieslo aj zdravotné a ekologické riziká. Okrem toho musia GPR systémy spĺňať prísne emisné kritériá pre elektromagnetické žiarenie stanovené pre Európu alebo iné časti sveta (prísne pravidlá platia napr. v USA), inak by sa nemohli komerčne používať.

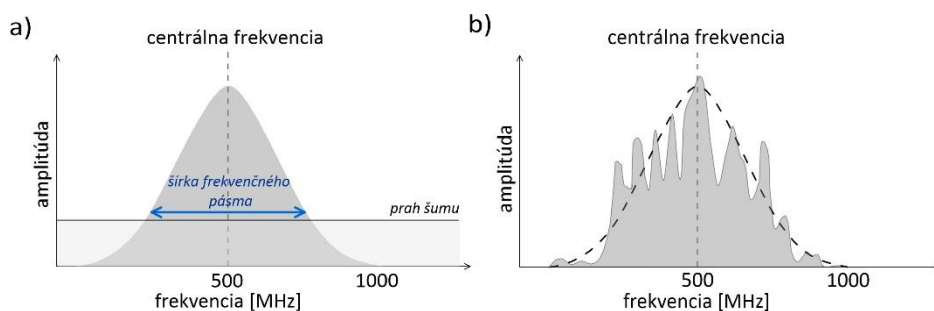
3.2.3 Typy GPR antén

Antény, vo všeobecnosti, možno považovať za prevodníky, ktoré premieňajú elektrický prúd prechádzajúci kovovými prvkami antény na EM vlnu (Daniels, 2000). Anténa je elektromagnetický dipól umožňujúci vyžarovať do priestoru EM vlnenie, ktoré vzniká pri prechode striedavého prúdu vodičmi dipólu. Najviac energie sa pritom vyžaruje v smere kolmom k pozdĺžnej osi dipólu (v pozdĺžnom smere sa nevyžaruje) a vyžarovaná vlna má vlnovú dĺžku rovnú dvojnásobku dĺžky dipólu (internetový zdroj 1).

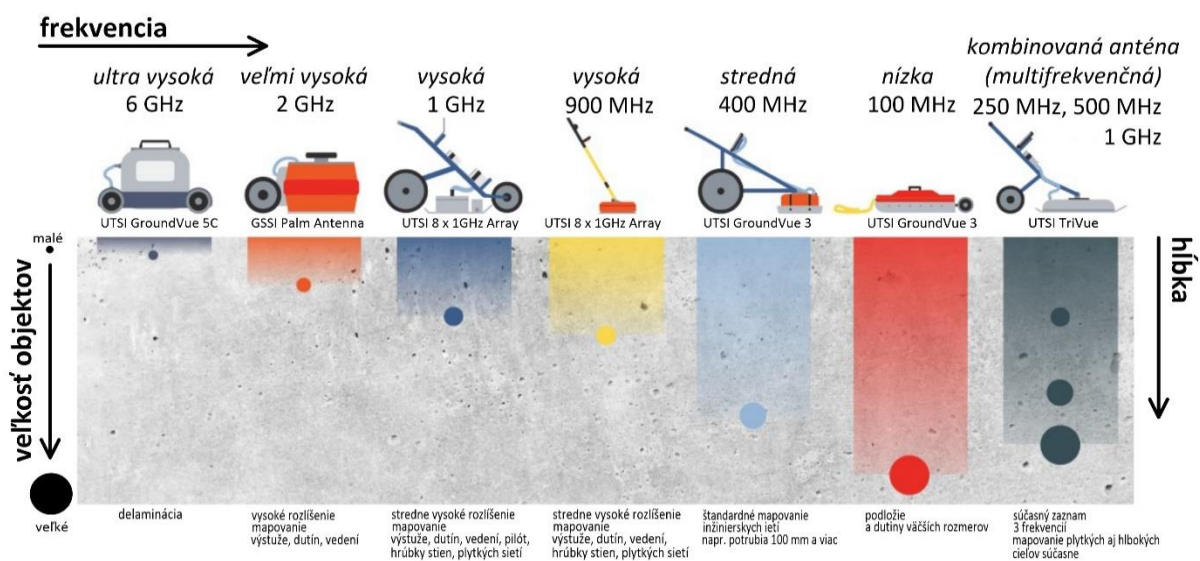
Vlnová dĺžka vysielaného vlnenia, resp. frekvencia antény je jedným zo základných parametrov, ktoré ovplyvňujú hĺbkový dosah a rozlíšenie GPR systému. Kým vysokofrekvenčné antény majú vysokú rozlišovaciu schopnosť ale malú hĺbku penetrácie, tak nízko frekvenčné impulzy majú síce veľkú penetračnú hĺbku ale malé rozlíšenie. Preto jednou zo základných charakteristík GPR systému je frekvenčná charakteristika antény. Bežné monofrekvenčné antény pracujú v určitom frekvenčnom rozsahu (šírka frekvenčného pásma), pričom väčšinu energie vyžarujú v oblasti centrálnej frekvencie, podľa ktorej je anténa označená, napr. 500 Hz anténa má centrálnu frekvenciu 500 Hz (obr. 3.9) (Reynolds, 2011). Názorné zobrazenie rozlišovacej schopnosti a hĺbkového dosahu v závislosti od frekvencie antény je na obr. 3.10. Teoretický hĺbkový dosah a rozlišovacia schopnosť antén s konkrétnymi centrálnymi frekvenciami sú uvedené v tabuľke 3.2. Pri výbere antény s vhodnou centrálnou frekvenciou je treba zvoliť kompromis medzi hĺbkou penetrácie signálu

a jeho rozlišovacou schopnosťou, preto výber antény bude vždy závisieť od zamerania prieskumu a parametrov očakávaných cieľov.

Okrem klasických monofrekvenčných systémov sa používajú HDR a multifrekvenčné systémy so širokospektrálnou charakteristikou. HDR antény majú oproti klasickým anténam širšie frekvenčné pásmo (rozsah prijímaných frekvencií okolo centrálnej frekvencie do určitej hladiny útlmu signálu) a súčasne je znížený prah šumu, čím sa zvyšuje hĺbkový dosah a rozlišovacia schopnosť týchto antén (Terray, 2021). Ďalšiu možnosť predstavujú duálne systémy tvorené dvoma párami dipólov (antén) pracujúcich na dvoch frekvenciách, pričom výsledné dáta môžu byť separované alebo zmixované (Terray, 2021).



Obr. 3.9 Frekvenčná charakteristika antény - centrálna frekvencia 500 MHz: a) teoretická krivka, b) reálna frekvenčná charakteristika (internetový zdroj 2).

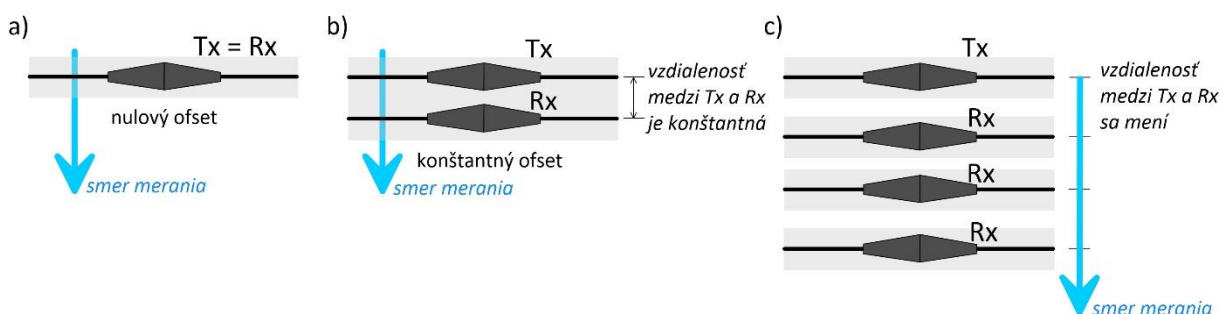


Obr. 3.10 Príklady rozlišovacej schopnosti a hĺbkového dosahu antén s rôznymi frekvenciami (upravené podľa internetový zdroj 3).

Tabuľka 3.2 Predpokladaný hĺbkový dosah a rozlišovacia schopnosť antén s konkrétnymi centrálnymi frekvenciami.

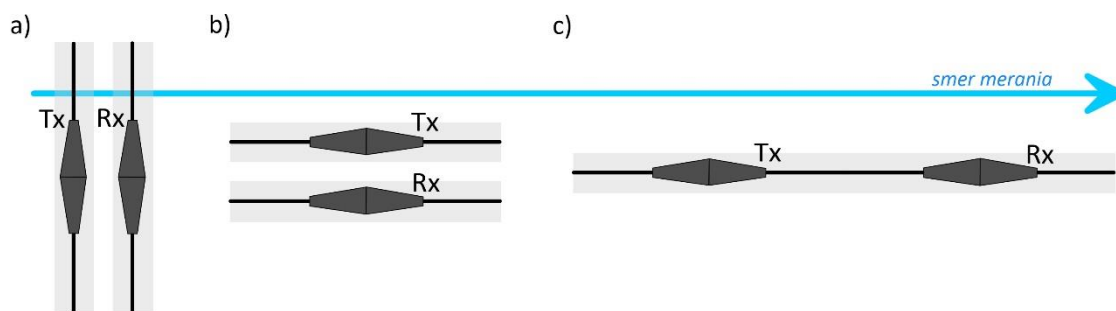
centrálna frekvencia antény [MHz]	predpokladaná hĺbka penetrácie [m]	približná minimálna veľkosť cieľových objektov [m]
1500	0,3	0,03
1000	1	0,1
500	2	0,2
250	3	0,3
100	5	0,5
50	10	1

Prijímacia a vysielačia anténa môžu byť v rámci GPR systému rôzne usporiadané, čo umožňuje prispôbiť techniku merania špecifickým úlohám. GPR systém môže mať jednu anténu, ktorá striedavo funguje ako vysielač a prijímač, alebo dve samostatné antény, jednu vysielačiu a druhú prijímaciu. Systém s jednou anténou sa označuje ako anténa monostatická (obr. 3.11a), v prípade dvoch samostatných antén hovoríme o bistatickej anténe (obr. 3.11b). Pri bistatických anténach môžu byť vysielačia a prijímacia anténa v rámci GPR systému umiestnené samostatne (obr. 3.11c), alebo v jednom spoločnom púzdre (Obr. 3.11b) (Daniels, 2000). Vzdialenosť medzi prijímacou a vysielačou anténou v rámci GPR systému sa nazýva ofset. Ak sú antény umiestnené v jednom púzdre, majú konštantný ofset. Pri samostatne umiestnených anténach umožňuje nezávislosť pohybu prijímacej a vysielačej antény väčšiu flexibilitu v teréne ako napríklad zmenu ofsetu alebo orientácie antén (Daniels, 2000).



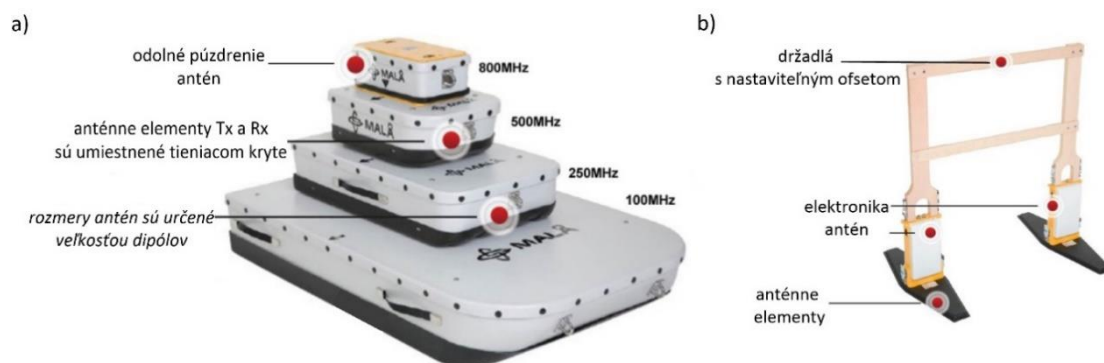
Obr. 3.11 Anténne systémy: a) monostatický, b) bistatický s konštantným ofsetom, c) samostatne umiestnená vysielačia a prijímacia anténa; Tx - vysielač, Rx - prijímač (podľa Terray, 2021).

Orientácie antén GPR systému môžu výrazne zvýšiť odozvy určitých typov objektov, pretože vyžarovanie antén nie je všesmerové. V niektorých smeroch je efektívnejšie ako v iných (Daniels, 2000), v závislosti od orientácie dipólu. Rôzne možnosti orientácie antén a ich zoradenia v rámci GPR systému sú znázornené na obr. 3.12. Prvé dve možnosti orientácie (obe horizontálne - boardside a obe vertikálne - end-fire) sa využíva na detekciu objektov orientovaných paralelene s anténami (napr. potrubia alebo iné líniové objekty či rozhrania). Cross polarised orientácia antén (keď jedna je orientovaná horizontálne a druhá vertikálne) sa používa na detekciu náhodne orientovaných objektov (Cassidy, 2008 in Warren 2009), napr. na detekciu trhlín na letiskových dráhach (Birtswile a Utsi, 2008 in Warren 2009).



Obr. 3.12 Možnosti orientácie antén vzhľadom na smer merania: a) board side, b) end-fire, c) in-line; Tx - vysielateľ, Rx – prijímač (podľa Terray, 2021).

Antény GPR systému môžu byť tzv. fokusované pre merania kolmo do hĺbky odroviny merania. Takéto antény sa označujú ako tienené. Tienené sú väčšinou antény pracujúce pri frekvenciách 80 - 1000 MHz a vyšších. Netienené bývajú antény pracujúce pri nízkych frekvenciách, 20 - 50 MHz, pri ktorých sú vysielateľ a prijímač vzdialené aj niekoľko metrov, takže prijímacia a vysielacia antény nebývajú integrované do jedného prístroja (vo všeobecnosti platí, že čím nižšia frekvencia, tým väčšia anténa). Netienené antény majú obmedzené možnosti využitia, hlavne vmiestach so zdrojmi rušenia EM signálu (Tábořík, 2022). Tiež si treba uvedomiť, že netienené antény môžu vo väčšej miere registrovať vlny odrazené od povrchových objektov ako sú napr. budovy, stromy, rôzne konštrukcie a pod. Príklad tienených a netienených anténnych systémov je na obr. 3.13.



Obr. 3.13 Príklad anténnych systémov MALA: a) tienené antény - vysielateľ a prijímač uložené v tieniacom puzdre, b) netienené antény; Tx - vysielateľ, Rx – prijímač (internetový zdroj 4).

Klasický jednokanálový GPR systém obsahuje jeden pár dipólov (antén). Výsledkom merania jednokanálovým systémom na jednej trase (línií) je jeden GPR profil. Viackanálové systémy sú tvorené viacerými párami dipólov, takže pri meraní na jednej trase sa získajú viacero paralelných profilov. Takéto systémy sú schopné pri jednom meraní pokryť väčšiu plochu, čím výrazne skráti čas merania hlavne pri prieskume veľkých plôch a 3D meraniach. Jednotlivé dipóly môžu navyše pracovať pri rôznych frekvenciách a tak umožňujú súčasne získať detailnejší záznam plytších častí ako i záznam z väčších hĺbok. Ukážka systémov firmy MALA je na obr. 3.14.



Obr. 3.14 Príklad anténnych systémov MALA: a) multikanálový s paralelným radením tienených antén rovnakej frekvencie (internetový zdroj 4), b) zostava cestného radaru merajúca naraz s viacerými anténami s rôznou frekvenciou s nezávislou systémovou konfiguráciou jednotlivých kanálov.

V poslednej dekáde sa okrem klasických analógových antén dostávajú na trh digitálne antény, HDR antény (High Dynamic Range – antény s vysokým dynamickým rozsahom) a multistackingové antény. Tieto antény umožňujú dosiahnuť čistejší obraz vo väčších hĺbkach a pri vyšších rýchlostiach merania, vďaka rozšíreným možnostiam sumácie (stackingu) dát priamo pri meraní. Stacking bol prvýkrát použitý pri seizmických údajoch ako proces na zníženie náhodného šumu a tým zlepšenie pomeru signál vs. šum (signal-to-noise ratio). Namiesto merania a ukladania jednej stopy sa merajú viaceré stopy, ktoré sa sčítavajú (sumujú, stackujú) do jednej výstupnej stopy. Pri tomto procese sa automaticky potláča náhodný šum a opakujúce sa signály sa zosilujú. Operácia sumácie je popísaná v kapitole 5 (Spracovanie údajov a ich interpretácia) pretože sa používa aj v rámci základného procesingu po zbere dát. Na obr. 3.15 sú porovnané parametre digitálnej a analógovej antény od firmy GSSI.

a)



Parametre udávané výrobcom:

stredná frekvencia	350 MHz
typický hĺbkový dosah	7 m
maximálny hĺbkový dosah	12 m

b)



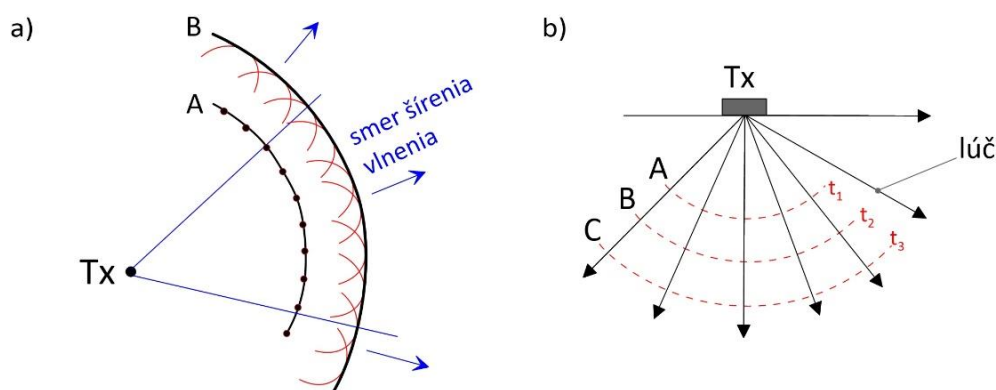
Parametre udávané výrobcom:

stredná frekvencia	400 MHz
hĺbkový dosah	4 m

Obr. 3.15 a) Digitálna anténa GSSI 350HS s technológiou HyperStacking, ktorá výrazne zlepšuje hĺbku a výkon rozlíšenia dát v porovnaní s tradičnými analógovými anténami; b) klasická analógová 400 MHz anténa od firmy GSSI.

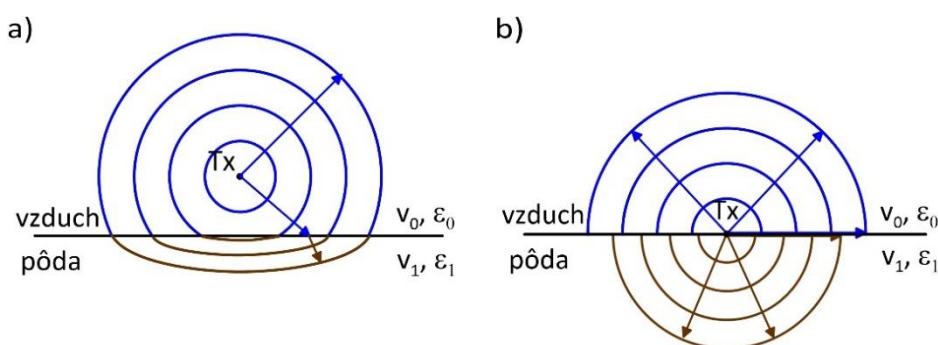
3.3 Meranie GPR – generovanie a registrovanie vln GPR anténami

Vysielacia anténa GPS systému (Tx) generuje EM vlnu. Povrch postupujúcej vlny sa označuje ako vlnoplocha alebo čelo vlny. Šírenie sa vlny prostredím popisuje Huygensov princíp (obr. 3.16a), podľa ktorého sa všetky body priestoru, do ktorého sa vlnenie v určitom okamžiku dostane, stávajú sa bodovými zdrojmi vlnenia a elementárných vlnoplôch. Výsledná vlnoplocha je obálkou takýchto elementárných vlnoplôch. Smer šírenia vlnenia charakterizuje lúč. Lúč je priama čiara vedená odvysielača k okraju čela vlny a je v každom mieste kolmý na vlnoplochu (obr. 3.16b). Lúče sa využívajú na zobrazenie smeru pohybu čela vlny v akomkoľvek smere od vysielacej antény (Daniels, 2000).



Obr. 3.16 Šírenia sa vlnenia prostredím: a) Huygensov princíp, b) grafické znázornenie čela vlny v čase t_1 , t_2 a t_3 a lúčov; Tx - vysielateľ (zdroj vlnenia), A,B,C - čelo vlny v danom čase.

Vlna šíriaca sa priamo zo zdroja sa označuje ako priama vlna. Priama vlna sa šíri jednak vzduchom nad rozhraním vzduch/horninové prostredie ako „air wave“ a jednak horninovým prostredím pod týmto rozhraním ako „ground wave“ (obr. 3.17).



Obr. 3.17 Priama vlna šíriaca sa zo zdroja umiestneného a) nad povrchom, b) priamo na rozhraní vzduch/pôda; Tx - vysielateľ (zdroj vlnenia) (upravené podľa Annan, 2004).

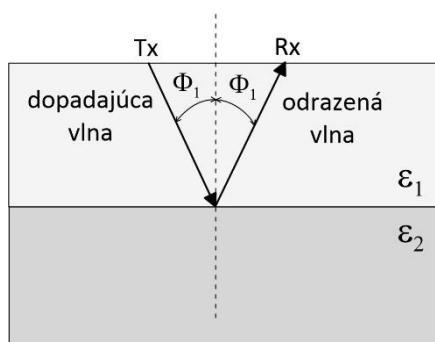
Keď čelo postupujúcej priamej vlny narazí na prostredie (objekt) s odlišnými elektrickými a magnetickými vlastnosťami ako okolité prostredie, dochádza k rozptylu energie dopadajúcej vlny (incident wave) a to formou 1) odrazu a 2) lomu, alebo 3) difrakcie či 4) „rezonančným rozptylom“ energie.

1) Pri odraze vzniká odrazená vlna (obr. 3.18) pričom platí Snellov zákon odrazu, podľa ktorého sa uhol odrazu rovná uhlu dopadu. Množstvo energie odrazenej od rozhrania dvoch prostredí závisí od kontrastu ich relatívnych dielektrických konštánt a je vyjadrené tzv. reflexným koeficientom R (3.9) (Reynolds, 2011) (vzorec platí pre nemagnetické prostredia, $\mu_r = 1$):

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}}, \quad (3.9)$$

kde ε_1 a ε_2 sú relatívne dielektrické konštanty susediacich prostredí (ε zvyčajne s hĺbkou narastá, takže $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$). Hodnoty R sa pohybujú v rozmedzí ± 1 (Reynolds, 2011). Čím väčší je kontrast na rozhraní, tým vyššia je absolútna hodnota R , pričom ak sa signál šíri z prostredia pomalšieho do prostredia rýchlejšieho (t.j. $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$) je hodnota R kladná, v opačnom prípade je záporná.

Poznámka: Pre magnetické prostredia platí pre výpočet reflexného koeficientu R namiesto (3.9) zložitejší vzorec, využívajúci komplexný tvar tzv. impedancie.



Obr. 3.18 Odraz vlny dopadajúcej na rozhranie - vznik odrazenej vlny; Φ_1 - uhol dopadu = uhol odrazu, Tx - vysielač, Rx - prijímač (podľa Daniels, 2000).

2) Energia, ktorá sa na rozhraní neodrazí späť k povrchu, sa šíri ďalej vo forme vlny lomenej - refragovanej (obr. 3.19a). Množstvo energie prechádzajúce

cez rozhranie je dané vzťahom 1-R (Reynolds, 2011), kde R je reflexný koeficient uvedený vo vzorci (3.9). Uhol, pod ktorým vlna cez rozhranie prechádza, je určený Snellovým zákonom lomu (3.10):

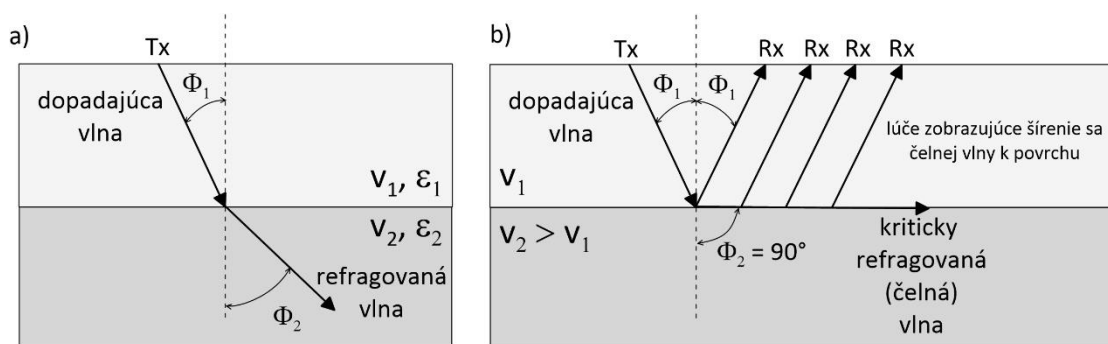
$$\frac{\sin\Phi_1}{\sin\Phi_2} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (3.10)$$

kde v_1 je rýchlosť šírenia sa vlny dopadajúcej na rozhranie, v_2 je rýchlosť šírenia sa vlny refragovanej (prechádzajúcej cez rozhranie), Φ_1 je uhol dopadu a Φ_2 je uhol lomu (Daniels, 2000).

Pri hladkých a súvislých rozhraniach, keď rýchlosť šírenia vlny nad rozhraním (v_1) je menšia ako pod rozhraním (v_2), môže dôjsť k tzv. úplnému odrazu. Dopadajúca vlna sa láme pod uhlom 90° , takže refragovaná vlna sa šíri v podloží paralelne s rozhraním, na ktorom vznikla (obr. 3.19b). Túto vlnu nazývame čelná vlna (kriticky refragovaná). Vzdialenosť, ktorú musí mať prijímač od vysielачa, aby túto vlnu zaregistroval sa označuje ako kritická vzdialenosť. Uhol dopadu, pri ktorom dochádza k vzniku čelnej vlny sa označuje ako kritický uhol a je ho možné vyjadriť zo vzťahu (3.11) odvodeného zo (3.10), (Daniels, 2000):

$$\sin\phi_1 = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2}}, \quad (3.11)$$

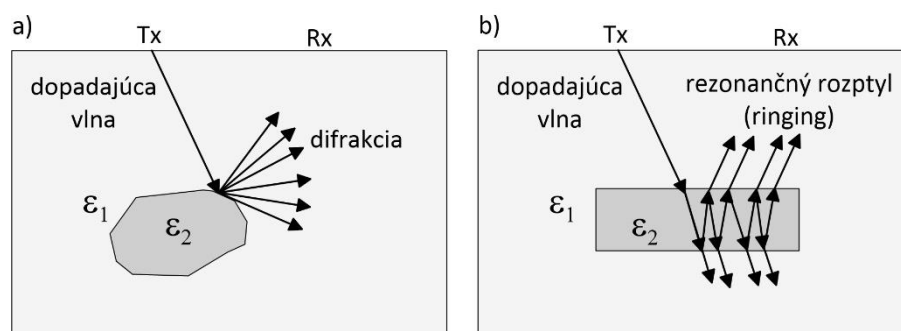
Vznik lomenej vlny nie je pre GPR systém bežný, vzhľadom na to, že rýchlosť EM vln má tendenciu s hĺbkou klesať (Daniels, 2000). Ale vzniká, aj keď kriticky refragovaná vlna dopadne pod kritickým uhlom na rozhranie povrch/vzduch, pričom pokračuje v šírení po rozhraní ako vzdušná vlna.



Obr. 3.19 Lom vlny dopadajúcej na rozhranie a) vznik lomenej (refragovanej) vlny, b) vznik čelnej (kriticky refragovanej) vlny; Φ_1 - uhol dopadu, Φ_2 - uhol lomu, Tx - vysielateľ, Rx - prijímač (podľa Daniels, 2000).

3) Ak vlna narazí na rozhranie, ktorého rozmery sú porovnateľné s vlnovou dĺžkou šíriacej sa vlny, dochádza ku difrakcii, ohybu EM vln (obr. 3.20a). Vzniká potom tzv. difragovaná vlna, ktorá sa využíva pri detekcii izolovaných objektov, ako sú napr. potrubia, vedenia, ostré okraje štruktúr a pod.

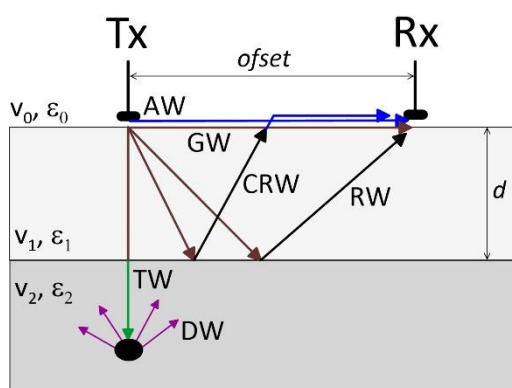
4) Ak vlna dopadne na uzavretý objekt (napr. tenká vodivá vrstva alebo valec) a odráža sa tam a späť medzi hranicami tohto objektu, dochádza k rezonančnému rozptylu (obr. 3.20b). Zakaždým keď vlna narazí na hranicu objektu, energia sa odráža späť do objektu, čo spôsobuje že energia rezonuje v objekte (niekedy sa tento jav označuje ako „ringing“). Uzavreté objekty majú rezonančnú frekvenciu, ktorá závisí od veľkosti objektu a elektrických vlastností objektu a jeho okolia. Schopnosť objektu rezonovať ale závisí od vlnovej dĺžky vlnenia vzhľadom na rozmery objektu. Ako dlho bude objekt rezonovať je dané kontrastom permitivity objektu a okolia (Daniels, 2000).



Obr. 3.20 Rozptyl vlny dopadajúcej na rozhranie a) difrakciou, b) rezonančným rozptylom (ringing), Tx - vysielateľ, Rx - prijímač (podľa Daniels, 2000).

Komplexné znázornenie vln šíriacich sa od vysielateľa k prijímaču je na obr. 3.21. GPR systémy s dipólovými anténami generujú signál vo forme krátkeho impulzu - vlnky (wavelet), ktorý má tvar mexického klobúku: tzv. Ricker wavelet. Vlnenie, ktoré sa odrazí späť na povrch je potom výsledkom konvolúcie vysielaného signálu s prostredím. Horninové prostredie je charakterizované reflexnými koeficientami jednotlivých rozhraní (obr. 3.22a). Hodnota reflexného koeficientu ovplyvňuje fázu/polaritu a veľkosť amplitúdy odrazeného vlnenia. Polarita nesie informáciu o tom, ako sa mení rýchlosť šírenia sa EM vlnenia na rozhraní a veľkosť amplitúdy zas o veľkosti rýchlostného kontrastu.

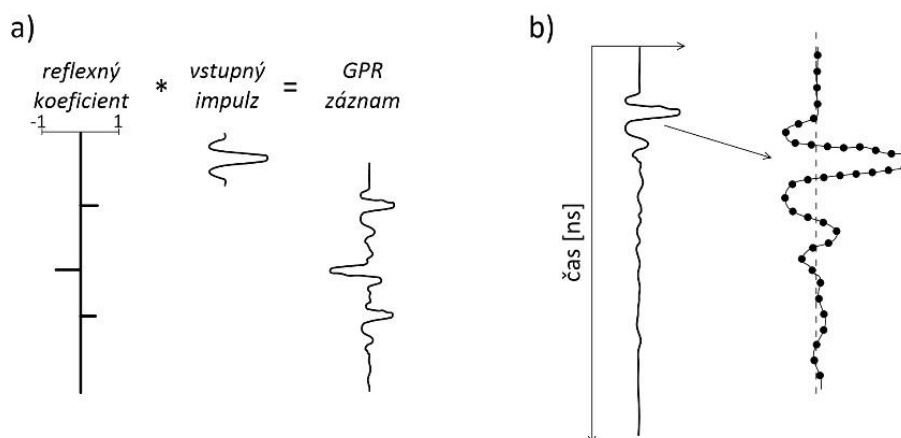
Na povrchu je prichádzajúci signál zachytávaný prijímacou anténou, pričom meraný je čas, za ktorý vlna prejde z vysielačnej antény do prijímacej antény. Tento časový interval sa označuje ako čas príchodu (travel time) a je udávaný v ns ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$). Travel time a je vždy väčší ako 3,3333 ns, pretože rýchlosť elektromagnetickej vlny vo vzduchu je 0,3 m/ns a rýchlosť šírenia sa EM vlny prostredím je úmerná prevrátenej hodnote odmocniny permitivity prostredia (vid. podkapitola 2.3), pričom permitivita horninového prostredia je vždy väčšia ako permitivita vzduchu. Rádovo sa čas príchodu (travel time) pohybuje v hodnotách niekoľko desiatok až niekoľko tisíc nanosekúnd (Daniels, 2000; Reynolds, 2011). Z hľadiska interpretácie sa čas príchodu (travel time) označuje pojmom TWT (Two-Way-Traveltime) – uvedený pojem bude vysvetlený ku koncu tejto podkapitoly.



Obr. 3.21 Šírenie sa vln od vysielača k prijímaču. AW - priama vlna šíriaca sa vzduchom nad rozhraním vzduch/povrch (air wave), GW - priama vlna šíriaca sa horninovým prostredím (ground wave), TW - vlna prechádzajúca cez rozhranie do nového prostredia (transmitted wave, refracted wave), RW - odrazená vlna (reflected wave), CRW - kriticky refragovaná (čelná vlna), ktorá pri dopade na rozhranie povrch/vzduch pokračuje ako vzdušná vlna, DW - difragovaná vlna, Tx - vysielač, Rx - prijímač, d – hĺbka rozhrania (podľa Terray, 2021).

Základný impulz, resp. vlnka (v tvare Ricker waveletu, obr. 3.22a, v strede) sa odrazí od tých miest, kde reflexný koeficient R vykazuje dominantné hodnoty – blízke -1 alebo +1 (obr. 3.22a, vľavo). Vznikne tak komplexný odrazený signál, ktorý sa vytvorí spojením viacerých odrazených vlniek do jedného GPR záznamu (obr. 3.22a, vpravo). Výsledné vlnenie (impulzy) prichádzajúce do prijímacej antény sa zvyčajne digitálne zaznamenáva pre účely následného spracovania a zobrazenia (záznam, stopa). Pri digitalizácii je zaznamenaný spojitý signál vzorkovaný (obr. 3.22b) a ukladaný vo forme binárneho kódu, pričom vzorkovacia frekvencia (time sampling)

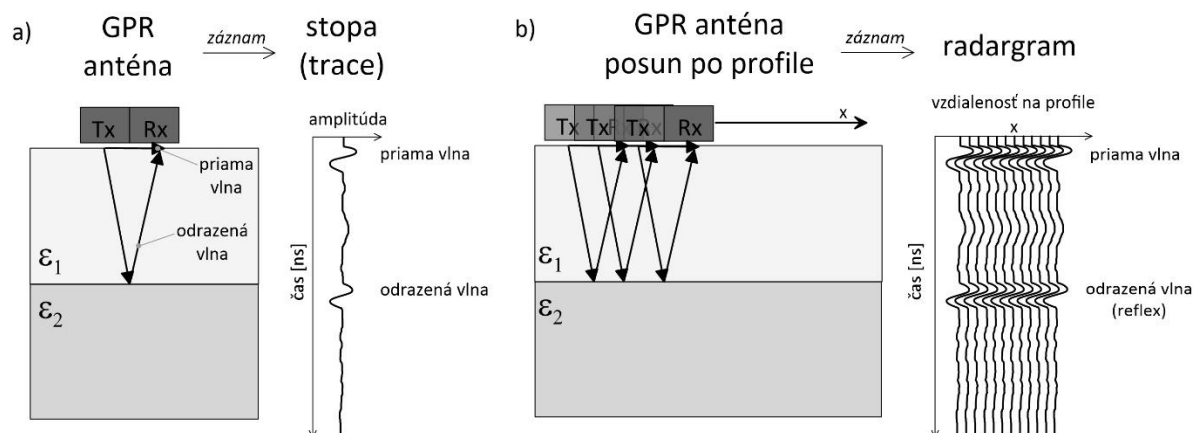
ovplyvňuje kvalitu zrekonštruovaného signálu pri zobrazení. Udáva sa, že vzorkovacia frekvencia by mala byť minimálne 10x väčšia ako frekvencia antény (Terray, 2021).



Obr. 3.22 GPR záznam a) princíp vzniku záznamu (stopy), b) vzorkovanie spojitého signálu (Terray, 2021).

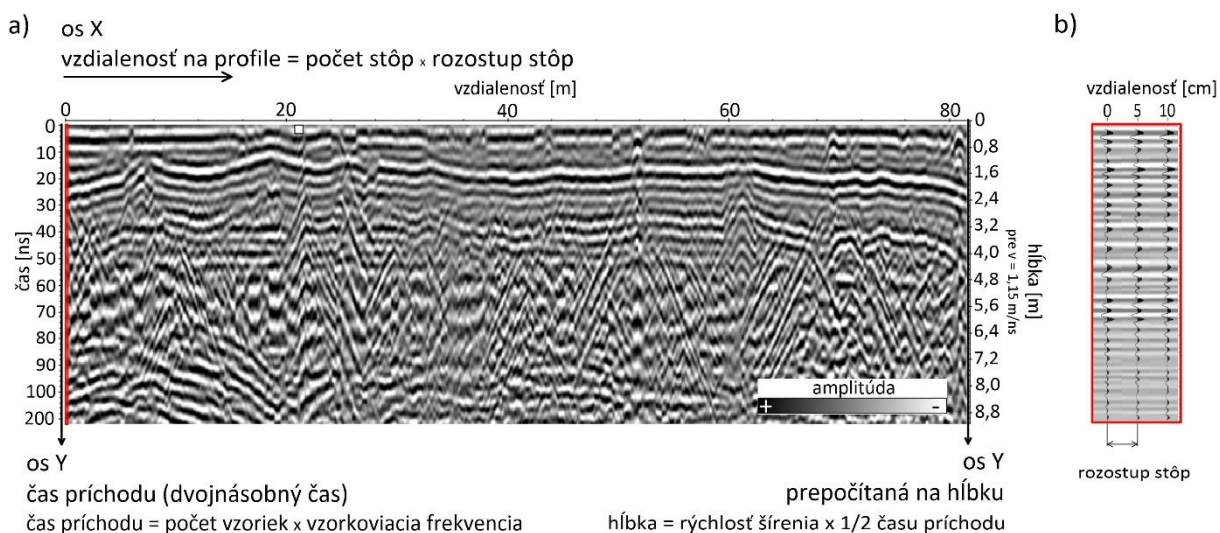
Zobrazený časový záznam zachytený prijímacou anténou sa nazýva „stopa“ alebo „trace“ a je základom všetkých GPR meraní (Daniels, 2000). V idealizovanom prípade s jedným reflexným rozhraním, aký je znázornený na obr. 3.23a, zaznamená prijímacia anténa dva impulzy. Prvým je záznam vlny, ktorá sa šíri priamo vzduchom (pretože rýchlosť EM vlny vo vzduchu je väčšia ako rýchlosť v akomkoľvek inom materiáli) a označuje sa ako priama vlna. Druhý impulz je záznam vlny, ktorá prešla prostredím a odrazila sa späť k povrchu (táto vlna sa šíri rýchlosťou, ktorú určuje elektrická permitivita a magnetická permabilita prostredia). Výsledný záznam oboch impulzov je znázornený na obr. 3.23a ako stopa (v pravej časti obrázku a)).

Pri pohyblivom (kontinuálnom) režime merania, keď sa GPR systém radaru pohybuje po profile na povrchu a radarová vlna vysiela-prijíma-zaznamenáva signály pri každom posune antén o určitú vzdialenosť, sa stopy z jednotlivých meracích bodov zoradujú vedľa seba a tvoria tak kontinuálny GPS záznam - radargram (obr. 3.23b).



Obr. 3.23 Časový záznam prijímacej antény a) pri bodovom meraní - stopa, b) pri kontinuálnom meraní - radargram; Tx - vysielateľ, Rx - prijímač (podľa Daniels, 2000).

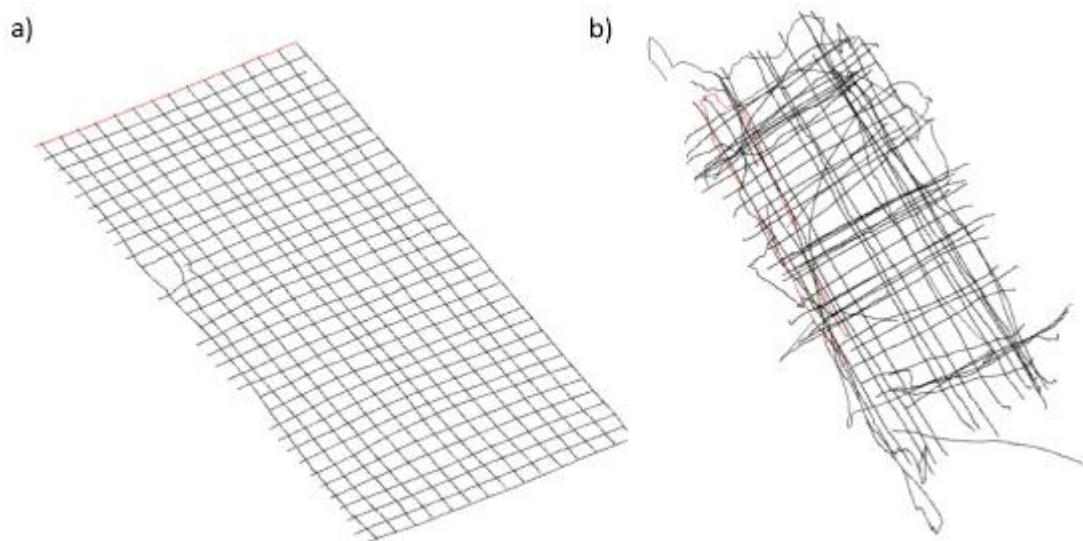
Radargram poskytuje dvojrozmerný obraz fyzikálnych vlastností prostredia pod povrchom. Na horizontálnej osi je zachytená vzdialenosť medzi meracími bodmi na povrchu, ktorá sa označuje ako rozostup stôp (trace spacing, trace interval). Určuje sa a zadáva do systému pred meraním, na základe veľkosti a povahy objektov prieskumu. Na vertikálnej osi je dvojnásobný čas prechodu vlny prostredím (TWT Two-Way-Traveltime). To je čas, za ktorý vlna prejde trasu od Tx k rozhraniu a späť do Rx. Radargram je veľmi podobný seizmickému reflexnému rezu (seizmogramu). Základný opis radargramu je na obr. 3.24 (Daniels, 2000).



Obr. 3.24 Radargram a) opis x-ovej a y-osi, b) detail radargramu v úseku 0 - 0,01 m, prvé tri stopy radargramu), (upravené podľa Terray, 2021).

Pre stanovenie polohy meraného záznamu v teréne je potrebné presne určiť polohu georadarových stop na meranom profile, to znamená, že je potrebné presne

registrovať pozíciu GPR antény počas merania. Vzdialenosť, ktorú prejde anténa po profile je možné určiť rôznymi metódami. Medzi najbežnejšie metódy zaznamenávania vzdialenosti, patria rôzne typy meračov vzdialenosti tzv. odometre. Zvyčajne ide o kalibrované koliesko, ktoré sa pripojí k anténe a po spustení záznamu meria dĺžku prejdeného úseku. Alebo sa používajú značkovače: tzv. markery, ktorými sa zaznamenáva prejdená vzdialenosť v pravidelných intervaloch (napr. každý meter). V poslednom čase sa stále viac do popredia dostávajú geodetické techniky merania vzdialenosti. Tieto techniky zahŕňajú predovšetkým GPS (GNSS) merania alebo robotické totálne stanice. Treba si však uvedomiť, že pri meraní polohy prostredníctvom GPS je dôležité použiť diferenciálne GPS prijímače napojené na národnú observačnú službu alebo na pevne inštalované pomocné zariadenie. Na území Slovenska je to Slovenská priestorová observačná služba (skr. SKPOS), ktorá využíva globálne navigačné družicové systémy (GNSS, Galileo, GLONASS, BeiDou) na presné priestorové určovanie polohy objektov v reálnom čase. Použitie GPS (GNSS) bez opráv v reálnom čase neposkytuje vo väčšine prípadov dostatočnú presnosť merania polohy a musí byť kombinované inou technikou merania vzdialenosti, napr. odometrom. Od presnosti určenia polohy GPR antény závisí presnosť určenia polohy objektov a rozhraní detegovaných na spracovaných radargrmoch. Na obr. 3.25 je ukážka merania polohy GPR na tej istej lokalite s použitím GPS (GNSS) s pripojením na službu SKPOS (obr. 3.25a) a bez observačnej služby SKPOS (obr. 3.25b).



Obr. 3.25 Ukážka zaznamenávania polohy antény GPR s použitím GPS (GNSS): a) s pripojením na observačnú službu SKPOS, b) bez observačnej služby SKPOS.

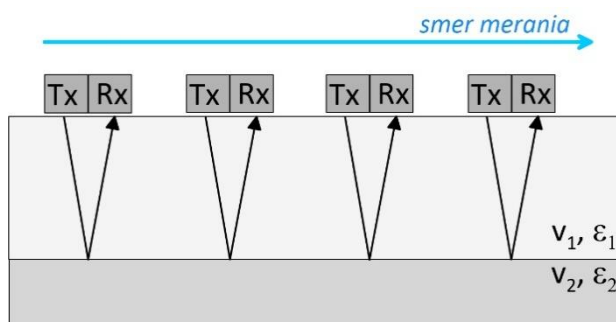
4 Základné techniky georadarového zberu dát

Existujú tri základné konfigurácie antén pri GPR meraní:

1. GPR reflexné profilovanie (common offset),
2. GPR rýchlostná analýza WARR/CMP (WARP – Wide Angle Reflection and Refraction - širokohlý odraz a lom; CMP - Common Midpoint - spoločný reflexný bod),
3. GPR tomografia alebo presvecovanie (transillumination).

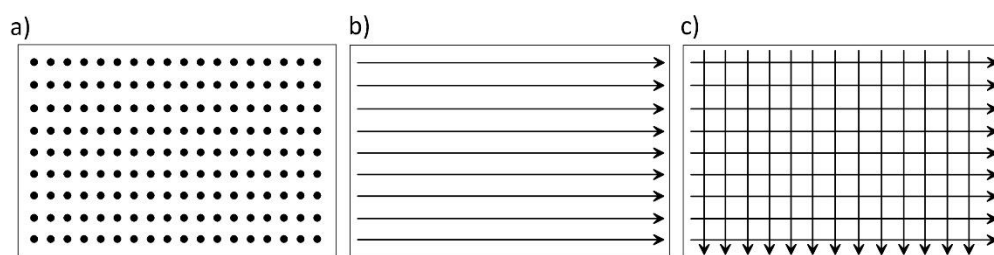
4.1 Meranie GPR – generovanie a registrovanie vln GPR anténami

Reflexné profilovanie alebo usporiadanie s konštantným offsetom (common-offset) je v praxi najčastejšie používanou metódou. Pri tomto usporiadaní sa zachováva stála vzdialenosť medzi vysielacou a prijímacou anténou (obr. 4.1). Georadarový systém sa posúva po profile, pričom sa zaznamenáva čas príchodu vlny odrazenej od reflektorov v podloží antény (TWT). Ak sú k dispozícii informácie o rýchlosti šírenia sa rádiových vln (z nezávislých meraní alebo korelovaním reflexov s údajmi z vrtov či z rýchlostnej analýzy pri spracovaní), potom je možné konvertovať časový záznam na hĺbkový a určiť tak hĺbku reflektorov. Táto metóda je veľmi podobná reflexnému seizmickému profilovaniu (Reynolds, 2011; Warren, 2009).



Obr. 4.1 Reflexné profilovanie, usporiadanie antén s konštantným offsetom (common offset); Tx - vysielateľ, Rx - prijímač (podľa Warren, 2009).

Reflexné profilovanie je typickou konfiguráciou aj pri 3D georadarovom prieskume, pričom meranie môže prebiehať kontinuálne, pozdĺž paralelných profilov alebo bodovo na gride diskretných bodov (obr. 4.2). V každom prípade je prevytvorenie 3D obrazu dôležitá presná poloha každej zaznamenatej stopy, či už na profile alebo v gride (Daniels, 2000).



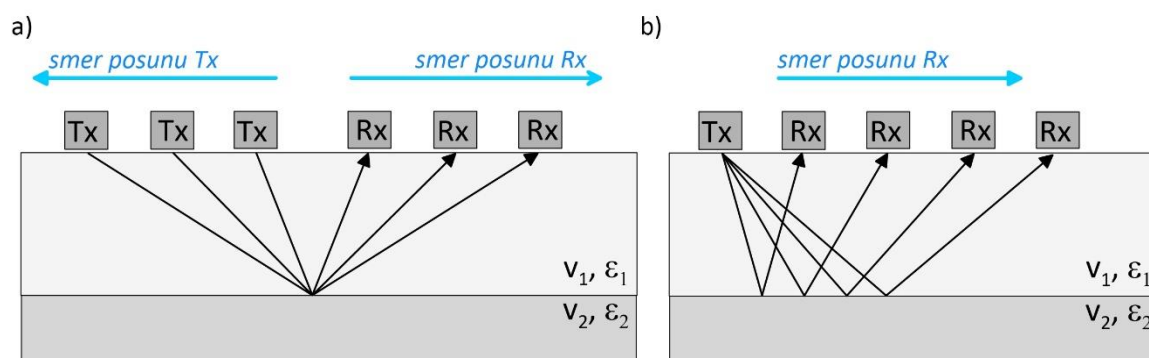
Obr. 4.2 Možnosti meracích režimov v konfigurácii common-offset pri 3D prieskume a) bodové meranie na gride pevných bodov, b) kontinuálne meranie na paralelných profiloch, c) kontinuálne meranie na paralelných profiloch v dvoch kolmých smeroch (Daniels, 2000).

4.2 GPR rýchlostná analýza WARR/CMP

Usporiadania WARR a CMP patria medzi špeciálne techniky merania, ktoré slúžia na presné určenie rýchlosti šírenia sa signálu v podloží. Pri usporiadaní WARR a CMP sa pri meraní mení vzdialenosť medzi vysielacou a prijímacou anténou. Konfigurácia antén pri týchto usporiadaníach je zobrazená na obr. 4.3. Je zrejmé, že tieto usporiadania vyžadujú oddelenú vysielaciu a prijímaciu anténu.

Pri usporiadaní CMP sa vysielacia a prijímacia anténa od seba vzdďaľujú súčasne, pričom stred medzi nimi (CMP) zostáva v nemennej pozícii ako je znázornené na obr. 4.3a (Reynolds, 2011).

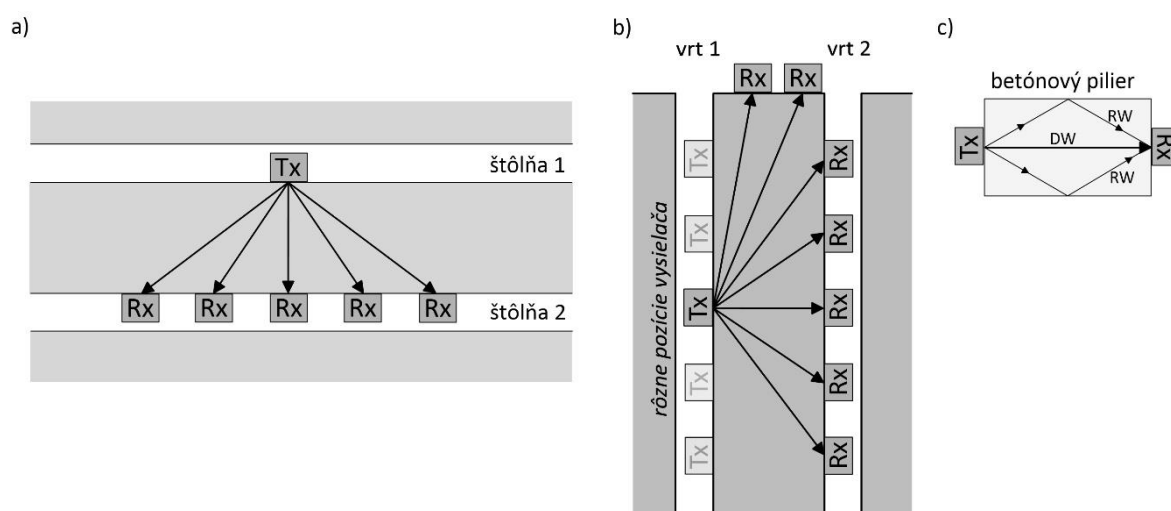
Pri usporiadaní WARR má vysielacia anténa fixnú pozíciu a prijímacia anténa sa pohybuje pozdĺž profilu, pričom ofset antén sa zväčšuje ako je znázornené na obr. 4.3b. Túto konfiguráciu je možné použiť v oblasti, kde sú hlavné reflektory rovinné a horizontálne, prípadne mierne uklonené, pričom sa predpokladá jednotné materiálové zloženie a nemenné vlastnosti reflektora po celej dĺžke. Tento predpoklad nemusí byť splnený pri použití usporiadania CMP (Reynolds 2011).



Obr. 4.3 Rýchlostné metódy GPR a) usporiadanie antén CMP, b) WARR; Tx - vysielateľ, Rx - prijímač (podľa Warren, 2009).

4.3 GPR tomografia

Pri presvecovaní a tomografii sú vysielacia a prijímacia anténa umiestnené na opačných stranách skúmaného média. Táto metóda sa používa napr. v podzemných baniach, kedy je vysielacia anténa umiestnená v jednej štôlni a prijímacia v druhej štôlni (obr. 4.4 a). Antény môžu byť umiestnené aj vo vrtoch a signál sa šíri prostredím medzi nimi (obr. 4.4 b). Tomografia sa taktiež používa pri nedeštruktívnom testovaní stavebných konštrukcií (betónové stĺpy, murované piliere) vysokofrekvenčnými anténami (obr. 4.4 c).



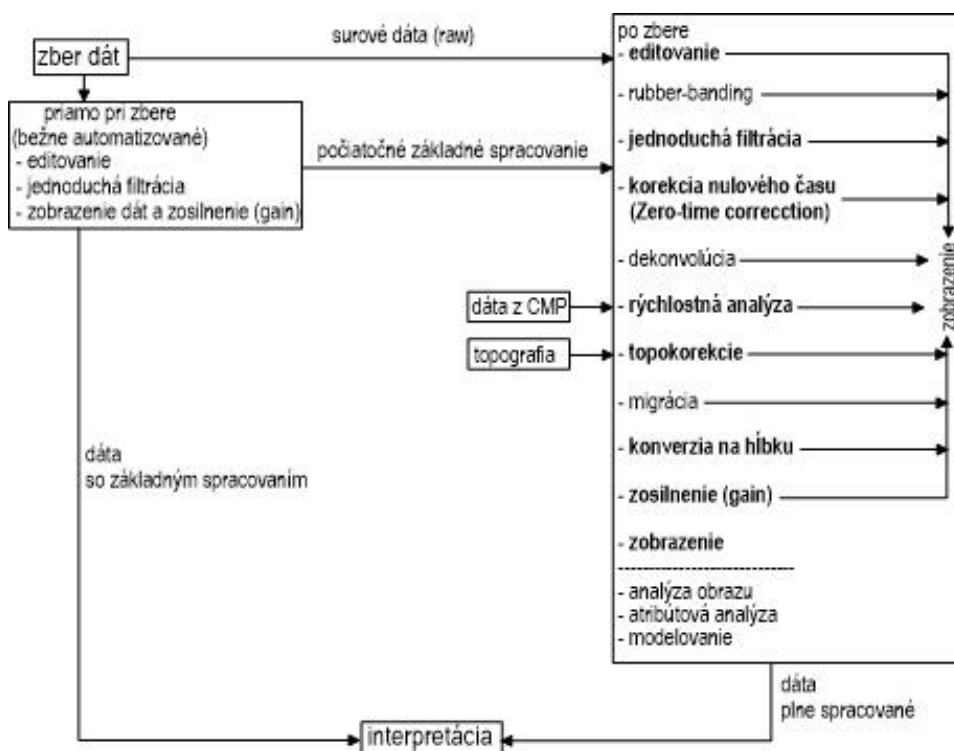
Obr. 4.4 a) umiestnenie antén v štôľňach, b) umiestnenie antén vo vrtoch, c) tomografia stavebných konštrukcií; Tx - vysielateľ, Rx - prijímač (podľa Reynolds, 2011).

Vzhľadom na to, že pri tomto usporiadaní je známa vzdialenosť medzi vysielacou a prijímacou anténou je možné z meraní vypočítať priemernú rýchlosť šírenia sa rádiových vĺn v prostredí, ktorým prechádzajú. Z veľkosti amplitúd je tiež možné určiť útlm. Výsledkom spracovania GPR presvecovania sú tomografy, ktoré sú analogické ich seizmickým ekvivalentom (Reynolds, 2011).

5 Spracovanie údajov a interpretácia

Spracovanie údajov (processing) z georadarového merania a ich následná interpretácia nie je vôbec jednoduchá a často trvá oveľa dlhšie než samotné meranie. Aby to bolo ešte trochu komplikovanejšie každý výrobca georadarových systémov má svoje špecifiká, poprípade svoj vlastný spracovateľský program. Napríklad georadary od firmy Geophysical Survey System Inc. (GSSI) používajú program RADAN, georadary do firmy MALA majú program Mala Vision, ďalej je na internete dostupných viacero „open-source“ programov napr. GPRPy, GPRlab, gprMax, MultichannelGPR. Potom sú tu komerčné programy na spracovanie georadarových dát, ktoré sú schopné importovať a spracovať georadarové údaje rôznych georadarových systémov a výrobcov ako sú napr. programy GPR-SLICE, Screening Eagle's alebo ReflexW. V tejto a nasledujúcich podkapitolách bol pri spracovaní dát použitý program ReflexW.

Vzhľadom na to, že väčšina GPR dát je meraná profilovaním (common offset), je táto kapitola zameraná na spracovanie údajov získaných práve reflexným profilovaním. Všeobecná schéma spracovania je znázornená na diagrame na obr. 5.1.



Obr. 5.1 Všeobecná schéma spracovania GPR dát (podľa Annan, 2004).

Mnohé z techník používaných na spracovanie údajov GPR vychádzajú z analýzy seizmických dát, ktorých komplexné spracovanie je uvedené napr. v Yilmaz (2001). Nie všetky kroky seizmického procesingu je možné aplikovať na GPR dáta, ale prevažnú väčšinu možno priamo použiť (Warren 2009, Annan 2004).

Je dôležité si uvedomiť, že pri neopatrnom spracovaní môžu byť zo záznamu odstránené dôležité informácie, alebo zavedené falošné údaje (Warren 2009). Pri väčšine nameraných údajov je postačujúce iba základné spracovanie. Pri základnom procesingu by malo v súbore dát dochádzať iba k malým zmenám, aby nedochádzalo k výraznému skresleniu nameraných dát. Preto sú do základného procesingu zaradené iba jednoduché základné kroky spracovania, ako editovanie, jednoduchá filtrácia, zosilnenie, korekcia nulového času, odstránenie pozadia (Annan 2004). Rozšírené spracovanie dát zahŕňa kroky, pri ktorých sa uplatňuje viac-menej subjektívny pohľad spracovateľa a výsledné informácie sa potom môžu výrazne líšiť od pôvodných. Medzi takéto operácie patrí napr. selektívny muting, dekonvolúcia, sumácia alebo priemerovanie (stacking/averaging), migrácia, rýchlostná analýza, topokorekcie, atribútová analýza, spájanie záznamu z viacfrekvenčných antén (Annan 2004, internetový zdroj 5)

5.1 Kroky základného spracovania

Editovanie

Editovanie je prvým krokom základného spracovania. Rieši problémy, ktoré vznikli pri zbere dát ako je vynechanie alebo redundancia dát. V rámci editovania sa vykonáva reorganizácia dát, zlučovanie súborov, aktualizáciu hlavičky alebo korekcie geometrie meraných profilov, korekcie topografie a doplnenie lokalizačných údajov.

Subtract-mean (dewow)

Dewow je označenie hornopriepustnej frekvenčnej filtrácie signálu (dewow high-pass filter). Odstraňuje nízkofrekvenčné zmeny (fluktuácie) v centrálnej frekvencii nosnej vlny tzv. low frequency wow, preto sa volá dewow. Poruchy typu dewow sa vo vertikálnych radargramoch prejavujú ako dominantné sub-horizontálne

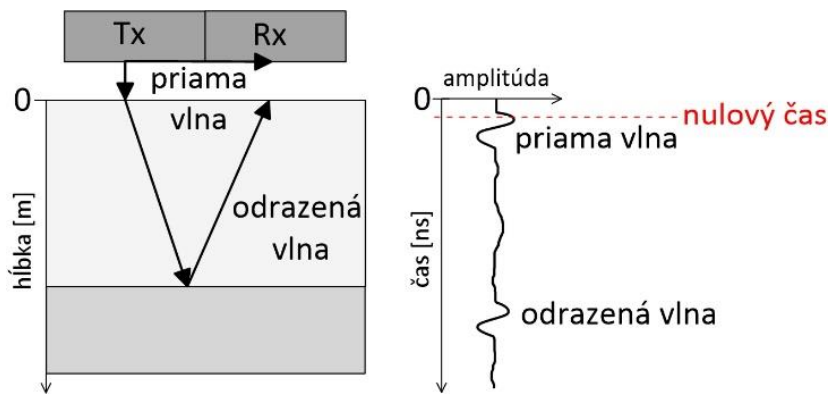
usporiadané umelé „šmuhy“. Odpočítaním (subtract) priemernej hodnoty (mean) amplitúd v malom posúvajúcom sa okne pozdĺž každého záznamu (stopy) sa tieto nízkofrekvenčné príspevky potlačia. Filter je povinný pre staršie georadary MALA (X3M,CX12) a GSSI. Aj keď jeho výsledok nie je na prvý pohľad vidieť, jeho nepoužitie bude mať za následok nesprávne spracované súbory, kde napr. budeme zosilovať okrem užitočného signálu aj parazitné signály. Filter vyžaduje informáciu o centrálnej frekvencii v hlavičkovom súbore.

Odstránenie konštantného posunu - Subtract DC-shift

DC-shift je posun „jednosmerného prúdu“ (jednosmerný alebo konštantný posun) a predstavuje konštantnú odchýlku, ktorá mierne posúva amplitúdu signálu. Filter subtract DC-shift pôsobí na každú stopu nezávisle a umožňuje odčítanie existujúceho posunu časovej konštanty. Filter je pre staršie georadary MALA a GSSI povinný. Porucha typu DC-shift sa prejavuje drobným amplitúdovým posunom medzi záznamami v oblasti „zero-time“ (časť stopy, kde ešte nie sú zaznamenané amplitúdy od prichádzajúcich vĺn – radarový záznam „beží naprázdno“). Uvedený posun sa korekciou DC-shift odstráni pre každú stopu zvlášť a záznamy sa tak lepšie prispôbia na rovnakú úroveň amplitúd (amplitúdy všetkých stôp budú začínať od rovnakej úrovne). Tento spracovateľský krok je potrebné nutne vykonať pred tzv. opravou na nulový čas (nasledujúci krok).

Oprava na nulový čas - time-zero correction

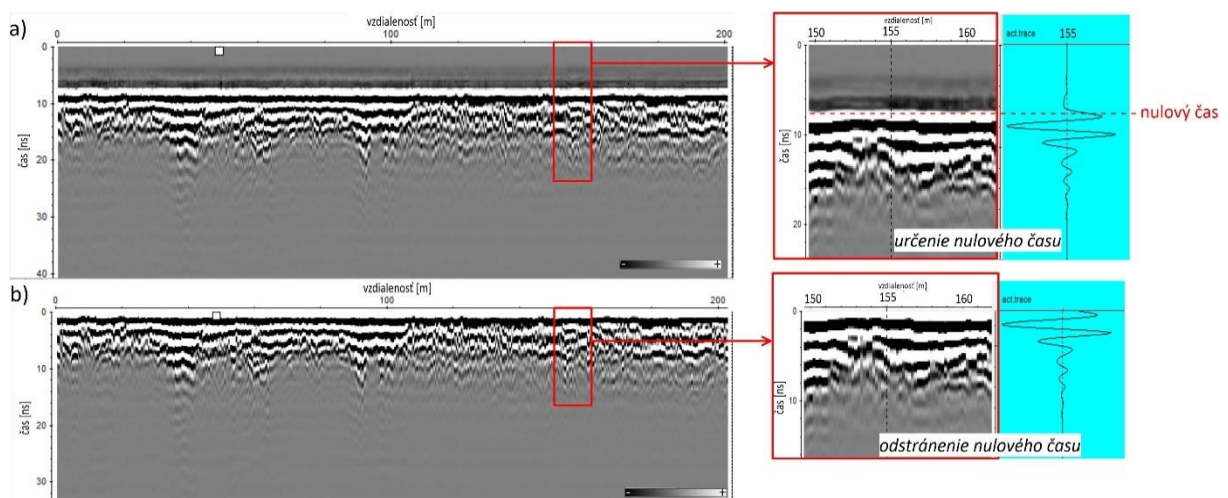
Pri oprave na nulový čas (time-zero corection) sa zo záznamu odstráni časové oneskorenie medzi začiatkom vysielania a prvým príjmom signálu. Presný okamih, kedy signál opustí anténu totiž nie je možné zaznamenať. Kým vysielaný signál narazí na povrch terénu a odrazí sa, musí prejsť určitý nepatrný úsek. Preto $t = 0$ ns na zázname nezodpovedá nulovej hĺbke. Na určenie tzv. nulového času, ktorý zodpovedá zaznamenanému odrazu od povrchu zeme alebo konštrukcie, s ktorou je anténa v kontakte (Warren, 2009), sa používa záznam priamej vlny (obr. 5.2). Priama vlna predstavuje časť signálu prechádzajúceho priamo z vysielача do prijímača bez toho, aby opustil anténu a je zaznamenaný takmer v rovnakom okamihu ako odraz od povrchu terénu (internetový zdroj 6).



Obr. 5.2 Časové oneskorenie medzi začiatkom vysielania a prvým príjmom signálu.

Určenie nulového času (Time-zero) alebo skutočného povrchu zeme je veľmi dôležitým krokom a rozhodujúcim faktorom pre správne stanovenie hĺbky cieľových objektov, hlavne pre ciele v blízkosti povrchu. Nulový čas nie je konštantná hodnota, ale musí sa určiť pre každý typ povrchového materiálu a konfiguráciu nastavenia antény. Presné nastavenie nulovej polohy v teréne je náročná úloha. Väčšinou sa vyberie relatívne stabilné a ľahko identifikovateľné miesto záznamu (napr. prvý negatívny alebo prvý pozitívny vrchol priamej vlny) a presná oprava sa aplikuje až v rámci procesingu po meraní na pôvodné neupravené dáta. Na uvedený spracovateľský krok neexistuje exaktný návod. Ak je anténa pri meraní priamo v kontakte s povrchom, väčšinou sa ako hodnota nulového času určí časový údaj zaznamenania 1/3 prvej kladnej amplitúdy záznamu (Yelf a Yelf, 2004).

Príklad záznamu pred a po aplikovaní opravy o nulový čas (Time-zero correction) je uvedený na obr. 5.3.

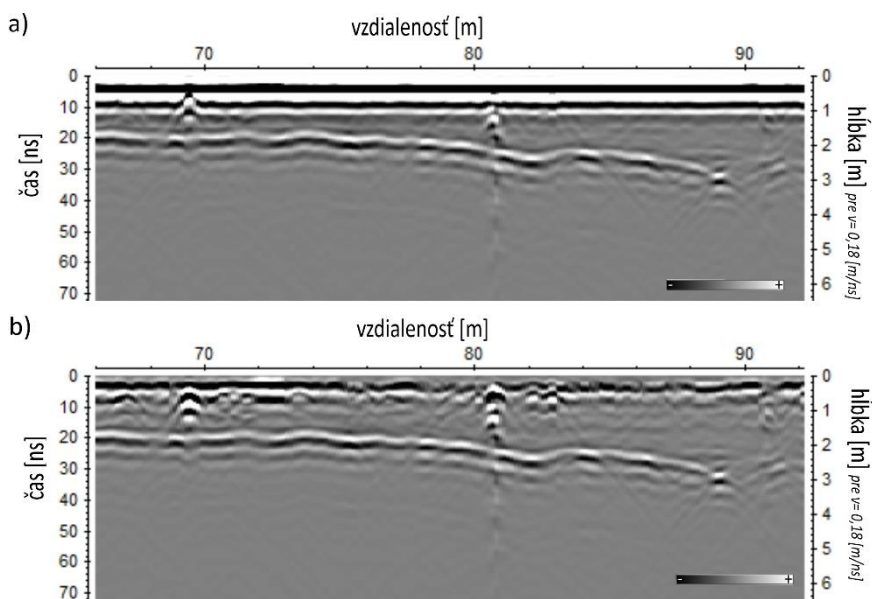


Obr. 5.3 Time-zero korekcia: a) radargram pred opravou o nulový čas, b) radargram po oprave.

Odstránenie pozadia - background removal

Background removal sa používa na potlačenie prejavu vln so silnou energiou vo vrchných vrstvách záznamu (napr. priama vlna, systémové artefakty, dozvuky vysielača), ktoré môžu maskovať odozvy plytkých cieľov. Použitím filtra môžeme eliminovať dočasne konzistentný šum z celého profilu a tým prípadne zviditeľniť signály, ktoré boli predtým týmto šumom pokryté. Táto metóda filtrovania tiež potláča horizontálne koherentnú energiu. Jeho účinkom je aj zdôraznenie signálov, ktoré sa laterálne menia (napr. difrakcie).

Najčastejšie má formu hornopriepustného filtra alebo odstránenia hodnôt priemernej stopy (average trace removal) priestorovou filtráciou (Annan 2004). Background removal by sa mal používať veľmi opatrne hlavne tam, kde sú predmetom záujmu rovinné rozhrania, pretože tieto odozvy môžu byť týmto typom filtrovania odstránené (Daniels, 2004 in Warren 2009). Obr. 5.4 zobrazuje príklad pred a po odstránení pozadia.



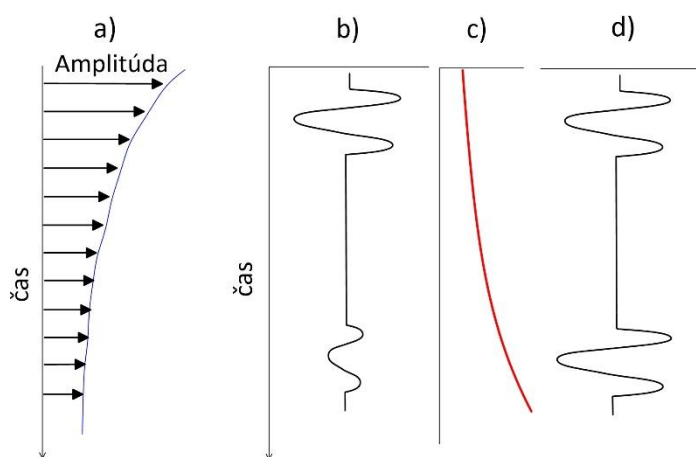
Obr. 5.4 Odstránenie pozadia - background removal: a) radargram pred odstránením pozadia, b) radargram po odstránení pozadia.

GAIN - zosilnenie amplitúd

Gain je krok procesingu vedúci k zosilneniu alebo vyrovnaníu amplitúd. Pri šírení radarového signálu prostredím totiž dochádza k stratám energie a tým k jeho útlmu (obr. 5.5 a). V dôsledku toho majú odozvy z menších hĺbok (zaznamenané

na menších časoch) väčšie amplitúdy ako tie z hlbších častí záznamu (zaznamenané na väčších časoch). Tým sa znižuje rozpoznateľnosť hlbších reflektorov. Zoslabenie amplitúd registrovaných na väčších časoch sa ale môže kompenzovať tzv. vyrovnaním amplitúd pomocou časovo závislej zosilovacej funkcie označovanej v procesingu ako gain (gainová funkcia) (Annan, 2004).

Zoslabovanie signálu s rastúcim časom je možné popísať funkciou (krivka útlmu, obr. 5.5 a). Z tejto závislosti sa určí krivka zosilnenia - nárast zosilnenia je prispôsobený poklesu amplitúdy signálu v závislosti od času. Táto zosilovacia funkcia sa potom ako filter aplikuje na záznam (obr. 5.5 b) (Annan, 2004).



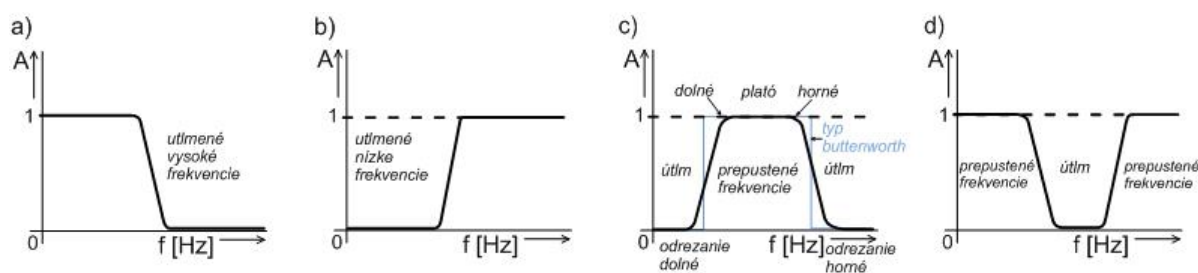
Obr. 5.5 Koncept časovo závislého vyrovnania amplitúd: a) pokles amplitúd s rastúcim časom - krivka útlmu, b) pôvodná stopa pred vyrovnaním amplitúd c) krivka zosilnenia - nárast zosilnenia s rastúcim časom, d) stopa po vyrovnaní (upravené podľa Annan, 2004).

Časová a frekvenčná filtrácia

Časová a frekvenčná filtrácia je bežnou technikou spracovania signálu a ak je správne aplikovaná, môže výrazne zlepšiť vlastnosti GPR údajov. Pri časovej filtrácii sú dáta filtrované pozdĺž časovej osi. V prípade frekvenčnej filtrácie je najprv záznam stopy prevedený do spektrálnej oblasti – pomocou priamej Fourierovej transformácie (väčšinou sa používa algoritmus rýchlej Fourierovej transformácie, FFT = Fast Fourier Transform). Následne je v tejto oblasti aplikovaný filter určitého typu a výsledok je prevedený späť do časovej oblasti pomocou inverznej Fourierovej transformácie (detailný popis dôležitých pojmov z oblasti spektrálnej analýzy sa nachádza v Prílohe ku skriptám). Je možné použiť celý rad rôznych typov časovej a frekvenčnej filtrácie: od frekvenčných filtrov až po rôzne typy operátorov lineárnych a nelineárnych konvolučných filtrov (Annan, 2004; Warner, 2009).

Filtrácia ako krok procesingu môže byť aplikovaná na dáta pred alebo po zosilnení signálu. Bežne sa používajú jednoduché dolnopriepustné a hornopriepustné filtre alebo pásmové filtre (obr. 5.6). Dolnopriepustné filtre prepúšťajú zložky zo spektra pre nižšie frekvencie (obr. 5.6a, zložky pre vyššie frekvencie sú utlmené). Pri hornopriepustných filtroch je tomu presne naopak (obr. 5.6b). Pásmové filtre sa využívajú na zlepšenie pomeru signál-šum, pretože väčšina energie užitočného signálu býva obmedzená na určitú šírku frekvenčného pásma. Podobne sa dolnopriepustné filtre využívajú na zníženie vysokofrekvenčného šumu (Annan, 2004).

Na odfiltrovanie jednej konkrétnej frekvenčnej oblasti (napr. pri monofrekvenčnom rušení spôsobenom vysielaczkou) sa používajú filtre typu pásmovej zdrže (Notch filter). Mediánové alebo priemerové dátové filtre môžu byť zas použité na eliminovanie amplitúdových špičiek zo zašumeného signálu.



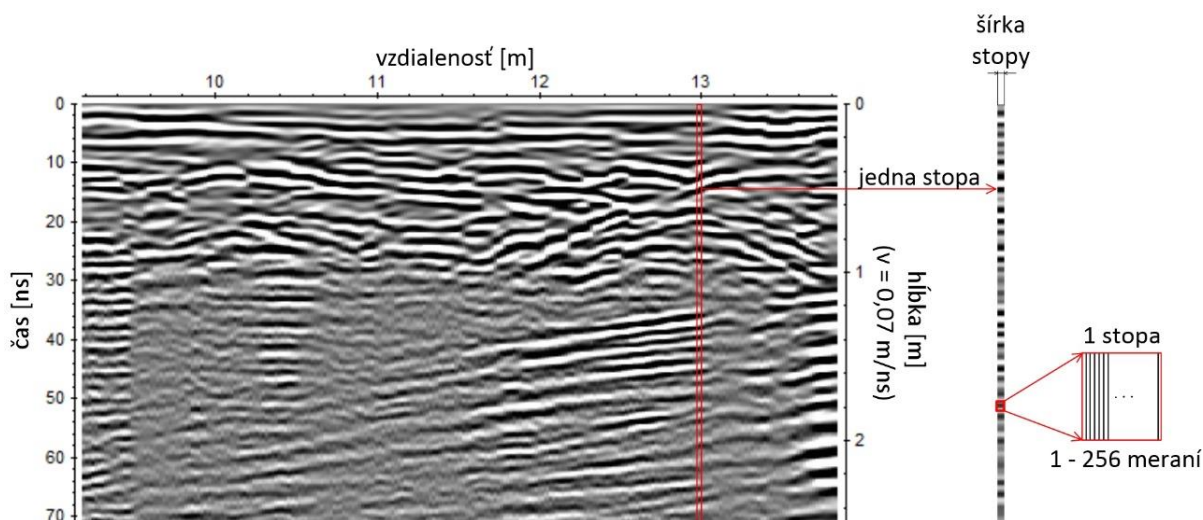
Obr. 5.6 Typy frekvenčných filtrov: a) dolnopriepustný, b) hornopriepustný, c) pásmová priepust, d) pásmová zdrž. Podobné charakteristiky filtrov sú uvedené aj na obr. A.3 v Prílohe týchto skrípt.

Podobné operácie ako pri časovej filtrácii je možné použiť aj v priestorovej doméne. Hornopriepustný priestorový filter potláča prejavy rovinných a zachováva odozvu uklonených rozhraní. Nízkofrekvenčné priestorové filtre majú opačný účinok. Zvýrazňujú rovinné (horizontálne) rozhrania, kým prejavy uklonených sú potláčané (Annan, 2004).

Sumácia stôp - Stacking/Averaging

Pri tejto operácii sa spočítavajú alebo priemerujú viaceré stopy (trace) do jednej výslednej. Takže jedna stopa zobrazená na výslednom radargrame mohla vzniknúť

spriemerovaním napr. 256 reálne vykonaných meraní (obr. 5.7). Sumácia stôp alebo ich priemerovanie sa používa na zníženie náhodného šumu (Warren, 2009).

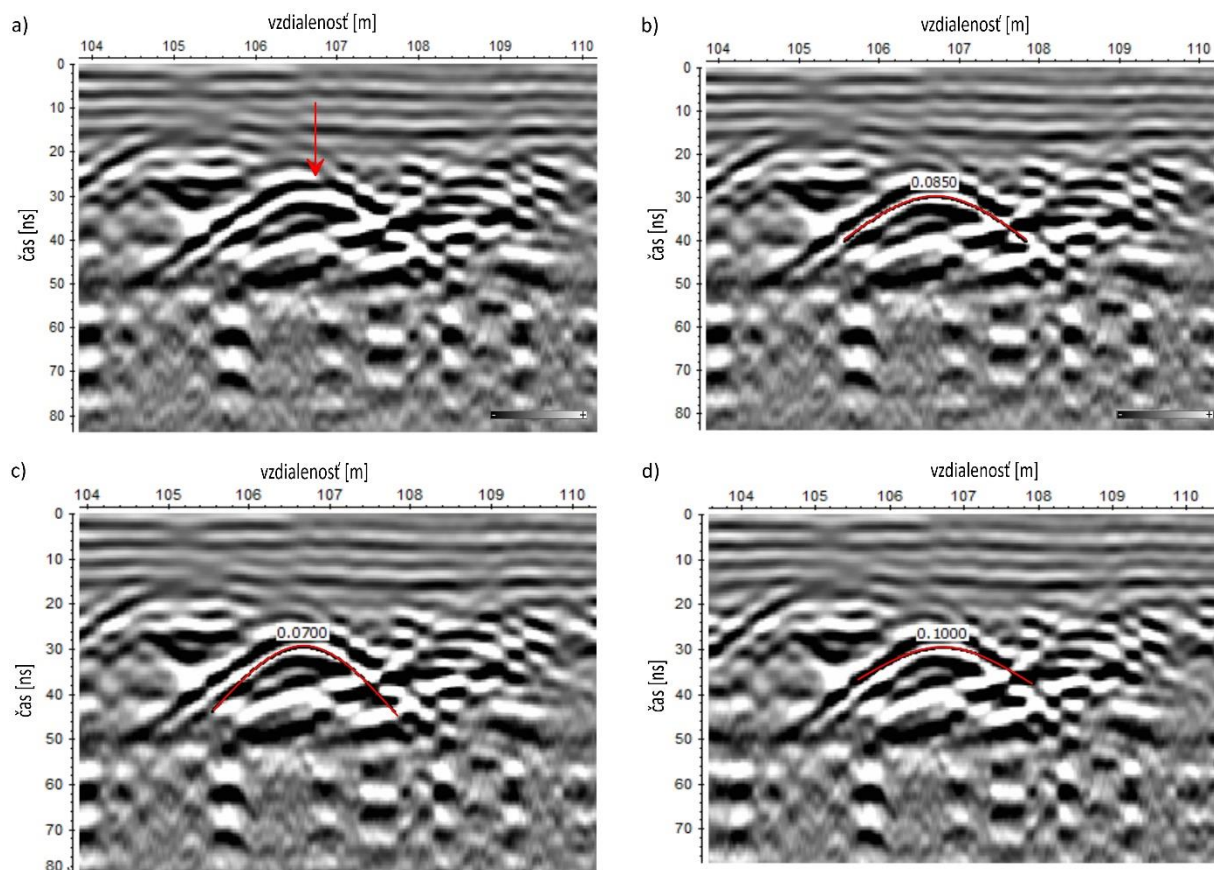


Obr. 5.7 Sumácia stôp radargramu (podľa Terray, 2021).

5.2 Kroky rozšíreného (pokročilého) spracovania

Rýchlostná analýza

GPR systém meria čas príchodu odrazenej vlny, to znamená, že vertikálna os záznamu je v ns ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$, čiže 1 sekunda = 1000 000 000 ns). Pre konverziu časovej osi na hĺbkovú je potrebné poznať rýchlostné pomery prostredia. Najpresnejšie údaje o rýchlostných pomeroch v podloží poskytujú rýchlostné merania (CMP, WARR) alebo tomografia. Nie vždy je takéto meranie k dispozícii. Odhad rýchlostí možno získať aj analýzou tvaru (zakrivenia) difrakčných hyperbol (obr. 5.8). Najmenej presnou možnosťou je použiť pri konverzii tabuľkové rýchlosti pre prostredie určené na základe údajov z vrtov či iných zdrojov. Od presnosti odhadu rýchlosti šírenia sa EM vlny závisí presnosť stanovenia hĺbky interpretovaných objektov a rozhraní (rýchlosti charakteristické pre jednotlivé typy prostredí sú uvedené v tabuľke 2.1 v podkapitole 2.3).

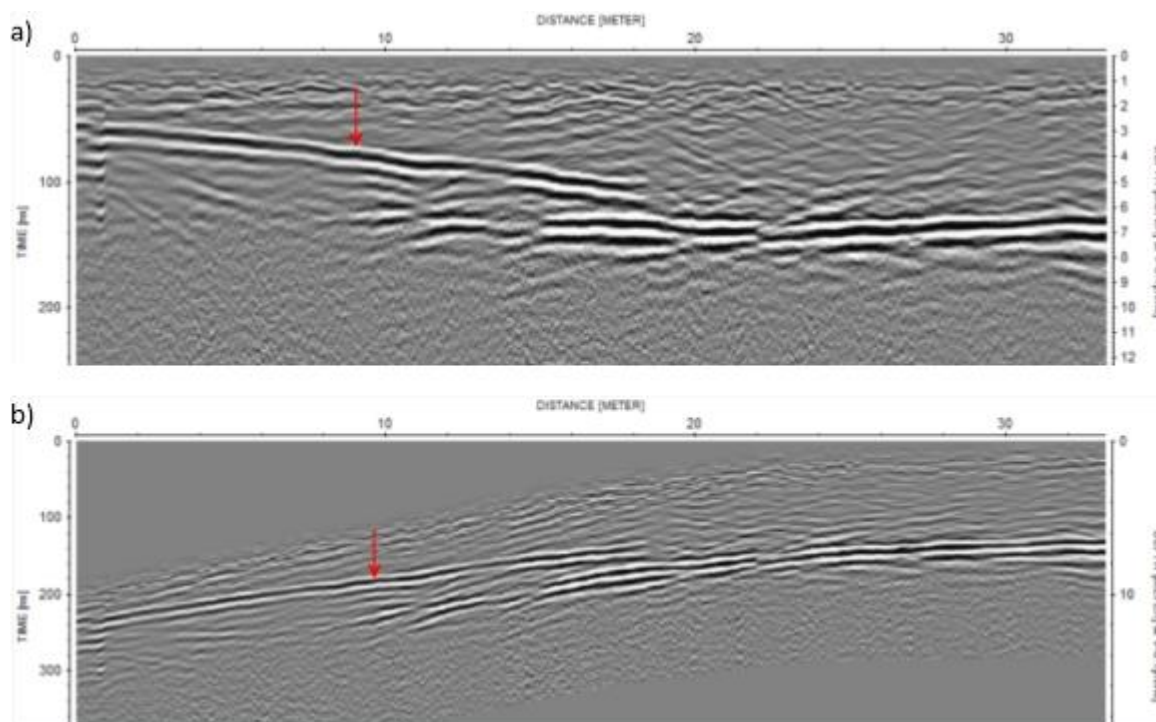


Obr. 5.8 Určenie rýchlosti z tvaru difrakčnej hyperboly - korelácia tvaru difrakčnej hyperboly s teoretickými krivkami pre konkrétnu rýchlosť: a) difrakčná hyperbola na radargrame, b) správne zvolená rýchlosť teoretickej krivky (0,085 m/ns), c) nízka rýchlosť teoretickej krivky (0,07 m/ns), d) vysoká rýchlosť teoretickej krivky (0,1 m/ns).

Topokorekcie

Povrch, na ktorom sa realizuje GPR meranie býva málokedy rovinný. Plytký hĺbkový dosah GPR prieskumu spôsobuje, že sklon terénu a terénne nerovnosti môžu ovplyvniť namerané údaje a výrazne sa prenášajú do zobrazenia priebehu zaznamenaných rozhraní. Preto je často dôležitým krokom pri spracovaní kompenzácia topografie. Na obr. 5.9 je vidieť dve výrazné rozhrania zachytené vo vnútornej stavbe starodávnej mohyly (Newgrange, Írsko). Poloha rozhrania na originálnom zázname bez topokorekcie (obr. 5.9a, ľavá časť radargramu) je nesprávna, jeho úklon je výrazne zdeformovaný vplyvom výraznej topografie mohyly (prevýšenie od päty mohyly smerom ku jej vrcholu bolo až 10 m). Po zavedení topokorekcií sú namerané hodnoty kompenzované časovým (hĺbkovým) posunom o nadmorskú výšku, vďaka čomu je zachytený priebeh rozhraní uvedený do správnej

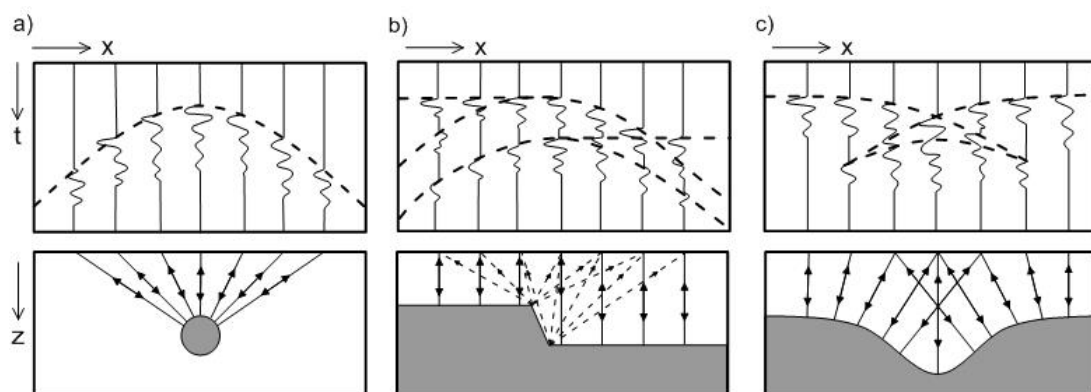
polohy (Joll 2009). Po zavedení topografických opráv (obr. 5.9b, ľavá časť radargramu) je uvedené rozhranie uklonené správnym (skutočným) spôsobom.



Obr. 5.9 Radargram: a) s originálnym záznamom, b) po zavedení topografických korekcií.

Migrácia

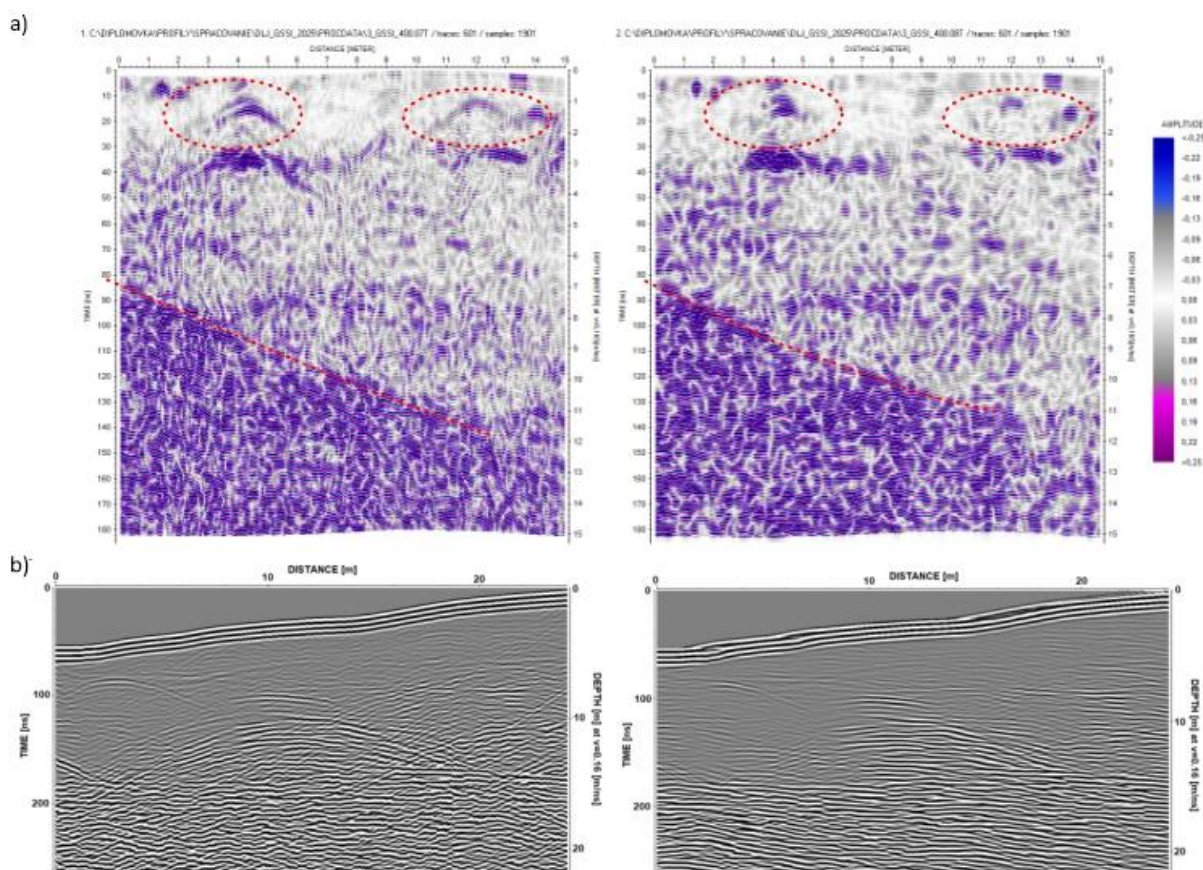
Migrácia je proces, pri ktorom dochádza k obnove správnych geometrických vzťahov medzi reflexami. Niektoré objekty (rozhrania) sa totiž na nemigrovanom radargrame nezobrazujú správne. Izolované objekty vytvárajú na radargramoch tzv. difrakčné hyperboly pretože, keď EM vlna narazí v prostredí na izolovanú nehomogenitu (ako napr. balvan, potrubie, dutina, korene) alebo ostré rozhranie (napr. zlomy, hrany múrov, steny...) dochádza k difrakcii vlnenia a odozva zaznamenaná na radargrame má tvar hyperboly (obr. 5.10 a, b). Tvar (šírka) difrakčnej hyperboly závisí od rýchlosti šírenia sa EM vlny prostredím, v ktorom vznikla (čím vyššia rýchlosť, tým širšia hyperbola). Taktiež výrazné synklinály (depresie) majú odozvu špecifického tvaru (obr. 5.10 c) a strmo uklonené rozhranie nie je na nemigrovaných radargramoch zobrazené v správnej pozícii vzhľadom k povrchu zeme.



Obr. 5.10 Model prostredia (dole) a jeho obraz na nemigrovanom radargrame (hore): a) izolovaný objekt – difrakčná hyperbola, b) terénny skok (zlom, strmé rozhranie) – difrakčné hyperboly na ostrých ukončeníach, c) synklinála (depresia, priekopa) – záznam tzv. motýlik (bowtie).

Existuje mnoho migračných postupov, ktoré umožňujú korekciu týchto zobrazení a kolaps difrakčných hyperbol do reálneho miesta ich vzniku, ktorým je vrchol hyperboly. Všetky migračné algoritmy však vyžadujú znalosť rýchlostných pomerov v skúmanom prostredí. To býva často dosť problematické, pretože nie vždy sú k dispozícii presné rýchlostné informácie a použitie nesprávnych rýchlostí môže do migrovaného zobrazenia zaviesť veľké chyby.

Na obr. 5.11 sú zobrazené dve ukážky ako migrácia ovplyvnila zobrazenie na radargramoch.



Obr. 5.11 Ukážky vplyvu migrácie na radargramový záznam: a) nemigrovaný radargram (vľavo) a radargram po migrácii (vpravo) - na radargramoch sú označené objekty, ktorých zobrazenie migrácia najviac ovplyvnila; b) nemigrovaný radargram (vľavo) a radargram po migrácii (vpravo) - migrácia odstránila, resp. zredukovala viaceré difrakčné hyperboly.

Dekonvolúcia

Proces dekonvolúcie je určitým typom filtrácie, ktorá vedie ku kompresii impulzov. Cieľom dekonvolúcie je odstrániť zo záznamu odozvu antény a tým zvýšiť časové rozlíšenia údajov (Warren, 2009).

Pri spracovaní seizmických reflexných dát je dekonvolúcia jedným z podstatných krokov procesingu. Dekonvolúcia GPR dát nie je tak priamočiara a nie vždy prináša dostatočné množstvo výhod, aby bola bežne zaradená do procesingu GPR dát. Jedným z dôvodov je to, že radarový impulz je často už aj tak krátky a stlačený natoľko, koľko umožňuje šírka pásma a pomer signál-šum (Annan, 2004). Ďalším faktorom je, že niektoré klasické dekonvolučné postupy pracujú s predpokladom, že wavelet (krátky impulz, vlnka) pri seizmických dátach je stacionárny a v minimálnej fáze, čo nie vždy GPR dáta spĺňajú. Rýchly pokles amplitúdy na GPR zázname pred zosilnením signálu môže byť dôvodom,

že pri dekonvolúcií budú slabšie hlbšie odozvy zatienené artefaktami po dekonvolúcii. Ak je GPR záznam pred dekonvolúciou zosilnený, nelineárny charakter zosilnenia môže podstatne zmeniť charakter waveletu. Takže systematicky aplikovať dekonvolúciu na GPR dáta je obtiažné (Annan, 2004).

Pre spracovanie GPR dát bolo navrhnutých niekoľko postupov, ktoré berú do úvahy špecifiká GPR signálu (napr. že GPR wavelet nie je v minimálnej fáze ale má charakter zmiešanej fázy). Väčšina týchto postupov je však zvyčajne prácna alebo výpočtovo náročná, prípadne má iné obmedzenia zabraňujúce ich všeobecnému využitiu (Schmelzbach a Huber, 2015).

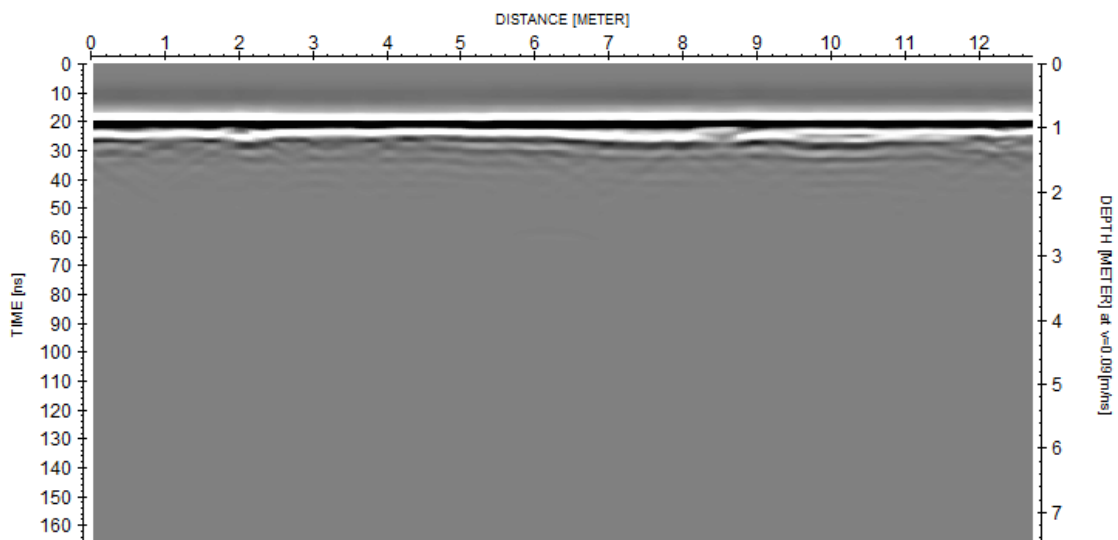
Napriek tomu má dekonvolúcia pri spracovaní GPR dát svoje využitie. Okrem možného zlepšenia vertikálneho rozlíšenia môže slúžiť aj na potlačenie viacnásobných odrazov (multiples).

5.3 Príklad 2D procesingu na konkrétnom profile

V tejto kapitole je uvedený príklad postupu pri spracovaní merania. Prezentované meranie bolo realizované za účelom určenia polohy a hĺbky uloženia potrubia. Pri meraní bola použitá aparátúra MALÅ Ground Explorer s anténou HDR (High Dynamic Range) 160 MHz. Merania boli realizované v kontinuálnom móde (common-offset), na meranie vzdialenosti bol použitý odometer a poloha merania bola zaznamenaná pomocou diferenciálneho GPS prijímača prepojeného s aparátúrou. Namerané údaje boli spracované v programe ReflexW.

Pri spracovaní profilu boli použité nasledujúce kroky:

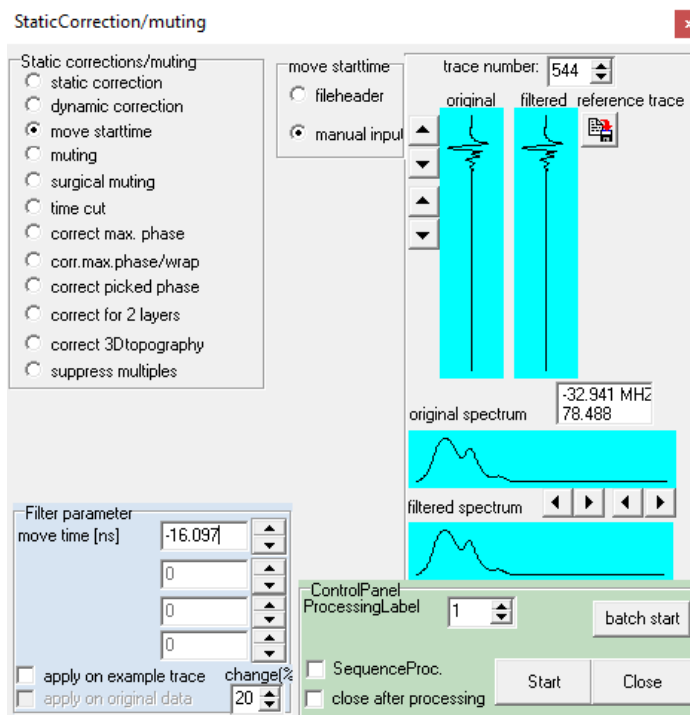
1. **Zobrazenie radargramu.** Georadary Mala si do hlavičky neukladajú žiadne nastavenia merania, pri načítaní do spracovateľského programu vidíme nespracovaný radargram bez procesingu (obr. 5.12).



Obr. 5.12 Nespracovaný radargram.

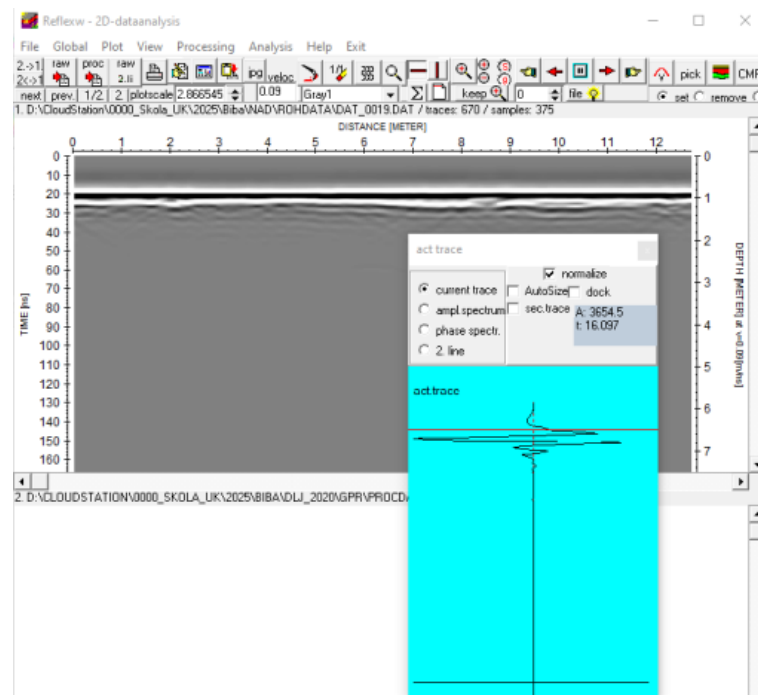
2. Static Corection/Muting – Static correction alebo Move start time.

V prípade nestabilného merania, povrch na profiloch nebude rovná línia ako na obr. 5.12, ale postupne klesajúca krivka. V takom prípade sa použije voľba Static correction. Pre stabilné meranie, čo je aj tento uvedený prípad, z menu „Static Corection/Muting“ vyberieme položku „move starttime“ (obr. 5.13).



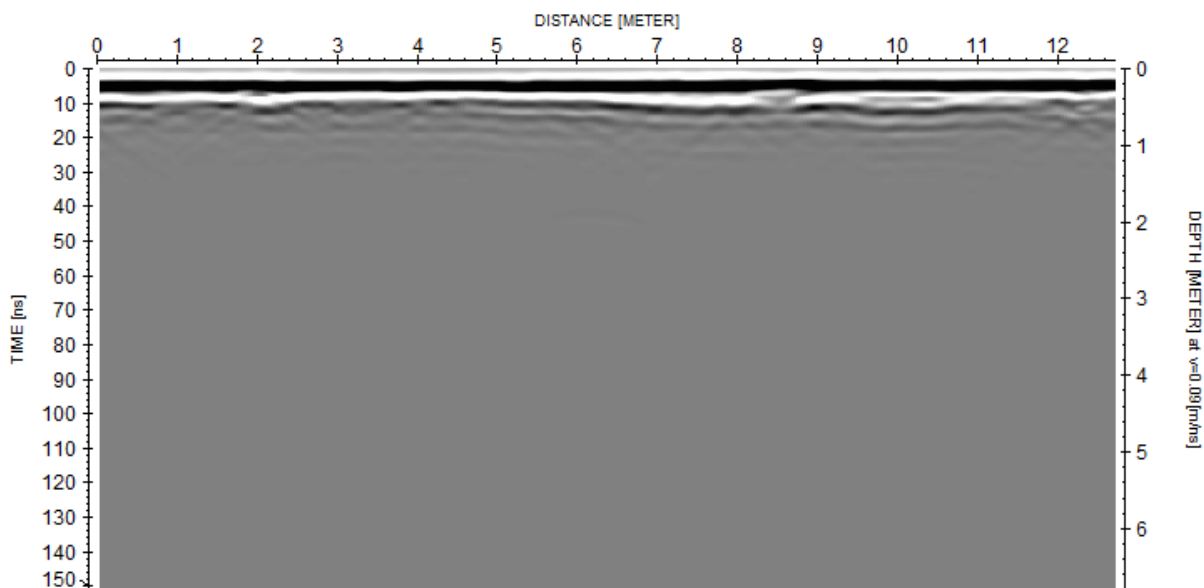
Obr. 5.13 Move start time - nastavenie nulového času.

V tomto kroku je potrebné zadať hodnotu nulového času. Ak je anténa pri meraní priamo v kontakte s povrchom, väčšinou sa ako hodnota nulového času určí časový údaj zaznamenania 1/3 prvej kladnej amplitúdy záznamu (obr. 5.14). Na základe toho bola v tomto prípade určená hodnota na opravu nulového času na -16,097 ns.



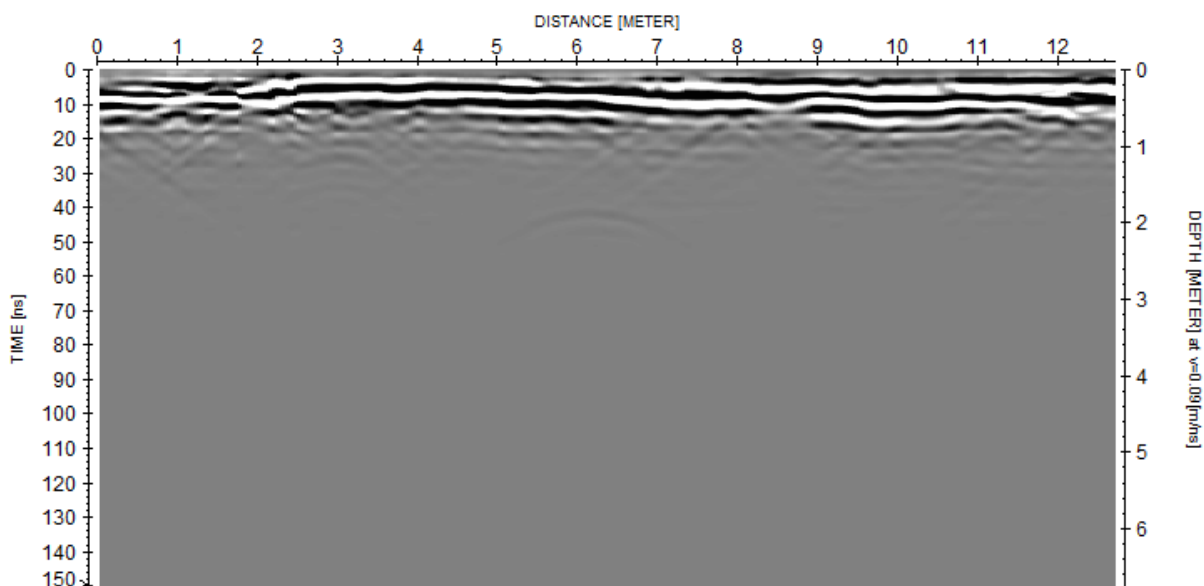
Obr. 5.14 Zistenie hodnoty nulového času na aktuálnom zázname stopy v okne WiggleWindow.

V okne pre „Static Corection/Muting“ pre položku „move starttime“ nastavíme fiter parameter „move time (ns)“ na hodnotu -16,097 a zvolíme možnosť „manual input“. V „Procesing Label“ nastavíme hodnotu na 1. Výsledok Time-zero korekcie je zobrazený na obr. 5.15.



Obr. 5.15 Radargram po oprave na nulový čas.

3. 2D filter background removal. Pri georadaroch MALA slúži na potlačenie prejavu priamej vlny z vysielacej do prijímacej antény. Po navolení tohto filtra nastavíme „Processing Label“ na hodnotu 2. Výsledok použitia filtra je zobrazený na obrázku obr. 5.16.

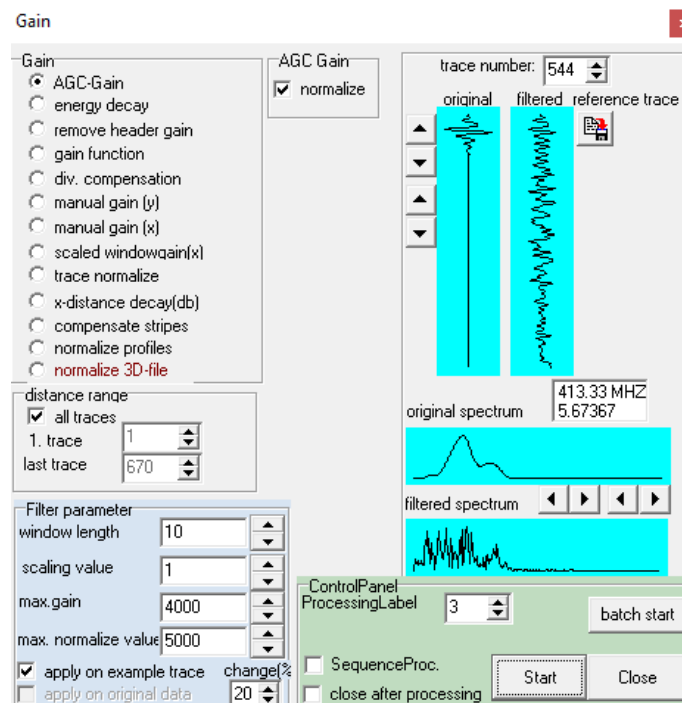


Obr. 5.16 Radargram po aplikovaní 2D filtra background removal.

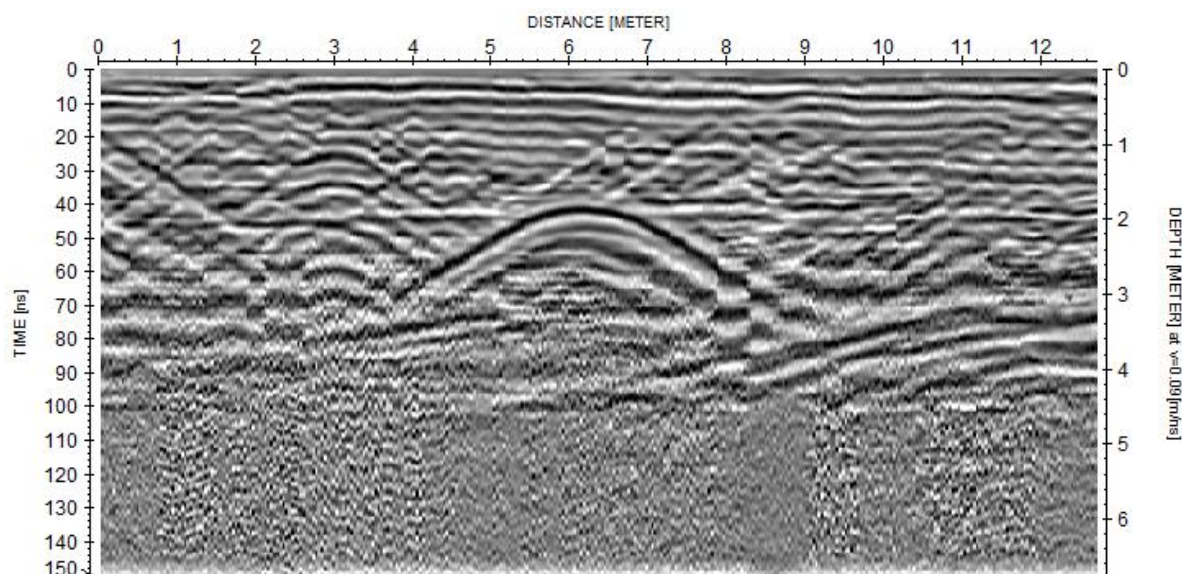
4. **Gain.** Program ReflexW ponúka viacero možností zosilnenia signálu. Na výber je AGC (automatický gain), energy decay, gain funcion a manuálny gain. Zvolíme jednu z možností, nastavíme parametre pre vybrané zosilnenie a hodnotu v „Procesing Label“ nastavíme na 3.

- AGC-Gain - automatické zosilnenie

Filter vypočíta krivku zosilnenia z priemeru amplitúd distribuovaných v časovej osi po celom profile. Túto hodnotu priemeru je možné zoslabiť/zosilniť zadaním parametra „window lenght“, ktorý udáva z akého časového úseku sa priemer počíta. Priemer je tiež násobený zadanou hodnotou „scaling factor“. Hodnota zadaná do „max. gain“ ohraničuje zhora maximálnu amplitúdu pre každú vzorku na každej stope. Ak sa zvolí podvoľba „Normalize“, vypočíta sa normalizačný faktor a dôjde ku vyrovnaniu energie oblastí s nízkou amplitúdou na oblasti s vyššou amplitúdou. V tomto prípade treba zadať normalizačný faktor. Nastavenia pre voľbu AGC-Gain sú zobrazené na obr. 5.17 a výsledok použitia filtra s týmto nastavením je na obr. 5.18.



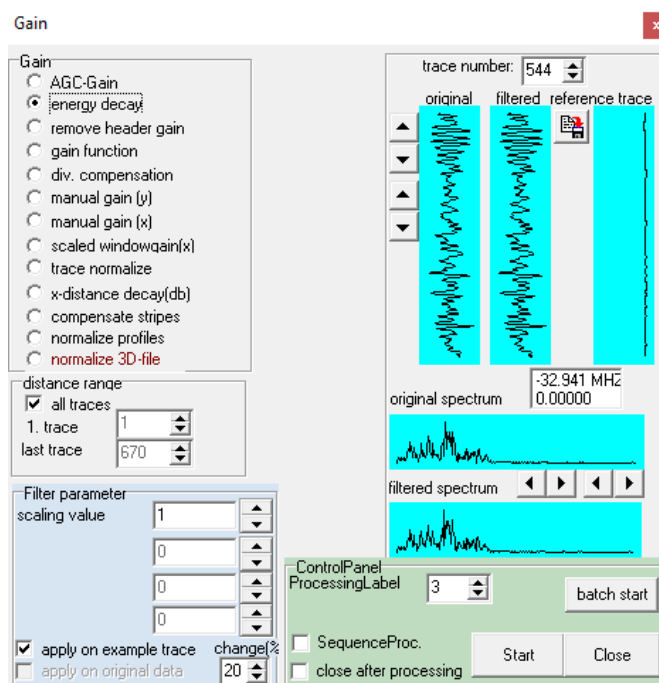
Obr. 5.17 Nastavenie pre voľbu AGC - Gain.



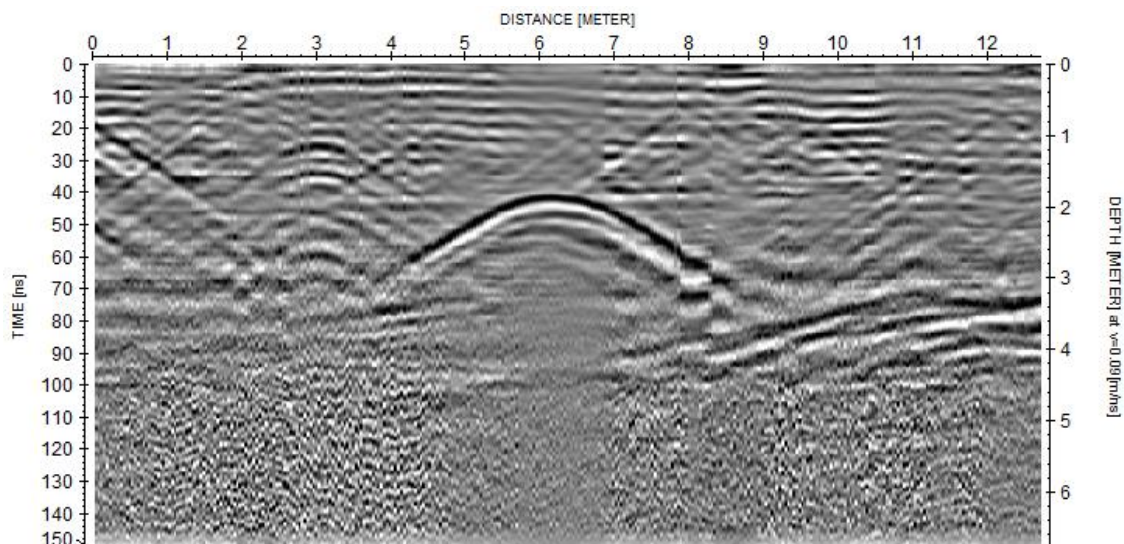
Obr. 5.18 Radargram po aplikovaní „AGC gain“.

- Energy Decay

Aplikuje zosilnenie spôsobom obnovenia energie vlny. Filter vypočíta útlmovú krivku pre celý profil a vytvorí podľa nej inverznú zosilňovaciu krivku. Táto možnosť zosilnenia je vhodná pre homogénne podklady. Intenzitu zosilnenia riadime zmenou faktoru „scaling value“. Nastavenia pre voľbu energy decay sú zobrazené na obr. 5.19 a výsledok použitia filtra s týmto nastavením je na obr. 5.20.



Obr. 5.19 Nastavenie pre voľbu energy decay.

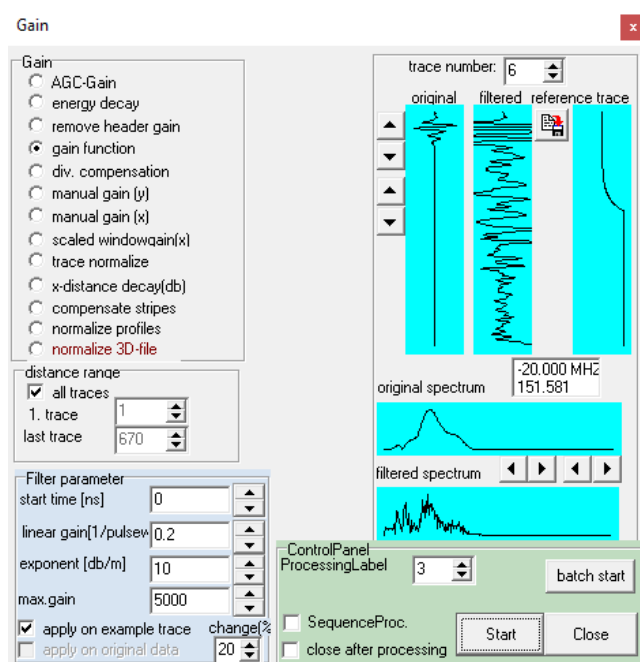


Obr. 5.20 Radargram po aplikovaní „energy decay“.

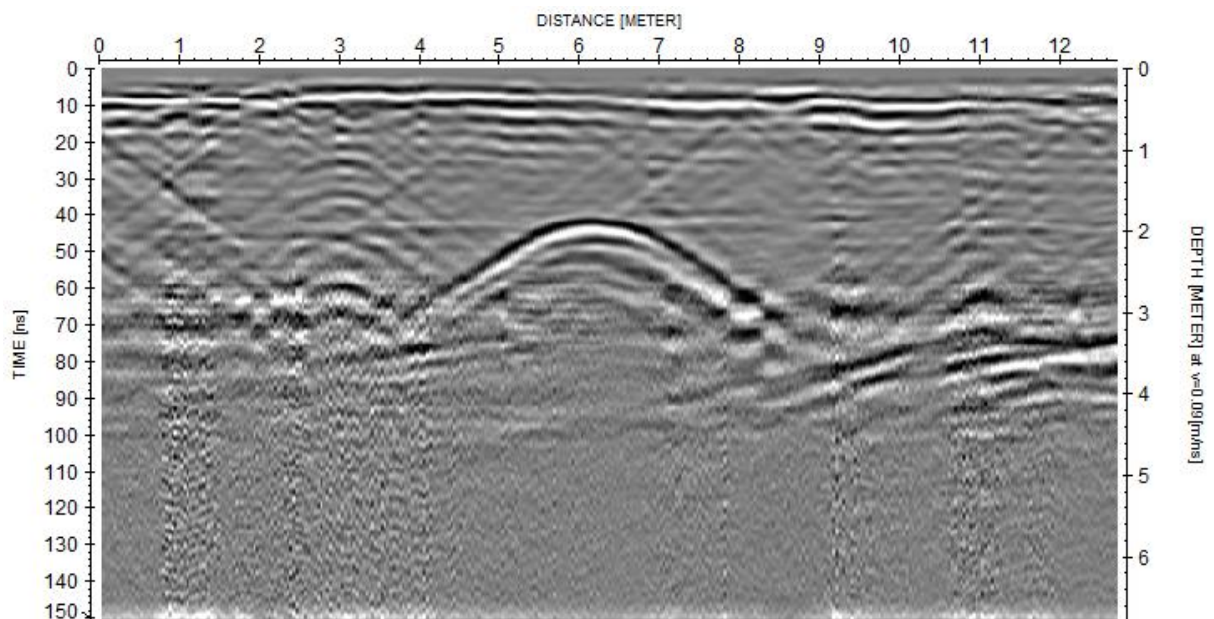
- Gain function

Umožňuje zosilnenie zadane manuálne lineárnym a exponenciálnym koeficientom. Ak sa má prejavíť účinok exponenciálneho koeficientu, „linear gain“ musí byť väčší ako 0. Začiatok zosilňovania môžeme posunúť zadaním hodnoty pre „start time (ns)“, intenzitu zosilnenia regulujeme (zmenšíme) zadaním faktora „max gain“. Zosilnenie môžeme aplikovať na celý profil alebo na vybranú časť, ktorú definujeme v sekcii „Distance range“.

Nastavenia pre voľbu gain function sú zobrazené na obr. 5.21 a výsledok použitia filtra s týmto nastavením je na obr. 5.22.



Obr. 5.21 Nastavenie pre voľbu gain function.



Obr. 5.22 Radargram po aplikovaní „gain function“.

5. 1D filtre. Ďalší krok procesingu spočíva v použití dolnopriepustných, hornopriepustných a pásmových filtrov. Pojem „1D“ znamená v tomto prípade to, že filter je aplikovaný iba pozdĺž jednej stopy („2D“ by znamenalo, že sa do danej filtrácie zapája viacero susedných stôp). Zvolíme vhodný 1D filter, nastavíme parametre pre vybrané zosilnenie a hodnotu v „Processing Label“ nastavíme na 4. Program ReflexW ponúka nasledovné možnosti 1D filtrov:

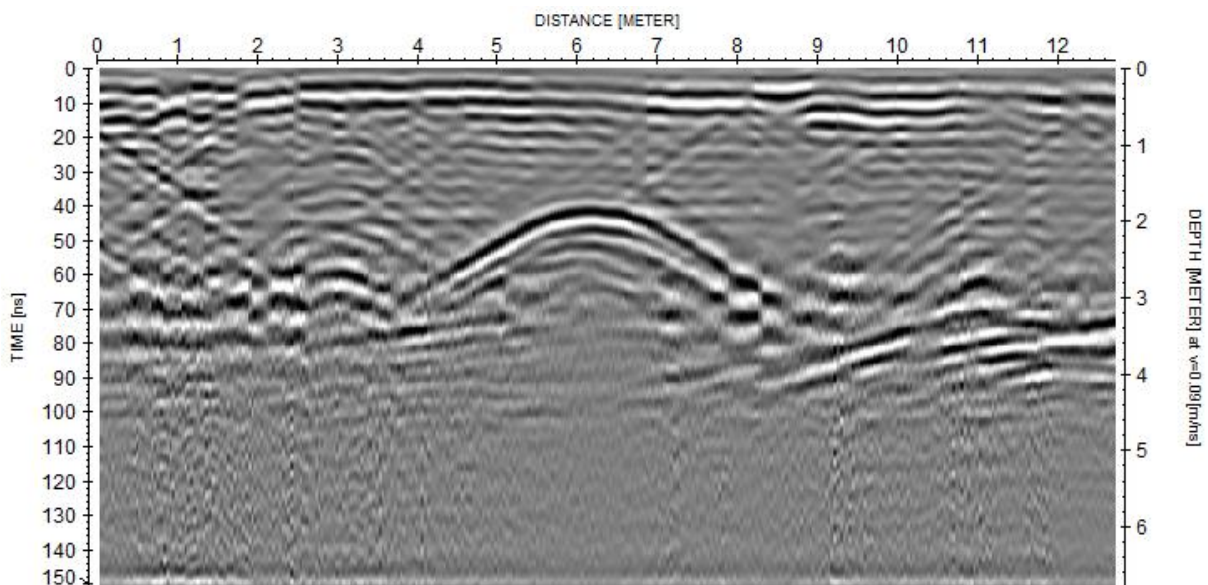
- Bandpassfrequency – pásmová priepusť

Filtruje sa frekvenčné spektrum každej stopy. Ponúkané typy v rámci tohoto filtra sa líšia priebehom krivky útlmu frekvencií. „Cos-tapper“ má prechod z úplného útlmu do nulového útlmu mierny, v tvare funkcie cosínus. „Cos**2-tapper“ má priebeh strmší, „butterworth“ je najostrejší, „high/low butterworth“ filtruje len vysoké alebo len nízke frekvencie. V ďalších parametroch sa nastavujú hraničné frekvencie filtrovaného pásma.

Pre aktuálny profil a pre použitú anténu 160 MHz bolo použité nasledovné nastavenie filtra bandpassfrequency:

- „lower cutoff“ 60 - pre úplný útlm v pásme pod 60 MHz,
- „lower plateau“ 100 - pre nulový útlm nad 100 MHz,
- „upper plateau“ 220 - pre koniec nulového útlmu,
- „upper cutoff“ 260 - pre úplný útlm nad 260 MHz.

Aplikovanie silného alebo ostrého filtra má za následok potlačenie alebo znásobenie fázových zmien. Na určenie hraničných frekvencií je možné použiť zobrazené okná – originálne a filtrované spektrum (zobrazené pri všetkých typoch filtrov). Kliknutím na niektoré z editovateľných polí (lower/upper, cutoff/plateau) môžeme hodnoty zadať adekvátnym odkliknutím na frekvenčnej krivke v okne originálneho spektra. Výber nastavenia filtra sa zároveň prejaví na krivke filtrované spektrum. Výsledok použitia filtra bandpassfrequency je na obr. 5.23.



Obr. 5.23 Radargram po aplikovaní 1D filtra Bandpassfrequency.

- Bandpassbutterworth – pásmová priepusť

Je veľmi podobný filter ako Bandpassfrequency. Rozdiel je v tom, že pri bandpassbutterworth je útlm ostrý, daný spodnou a hornou

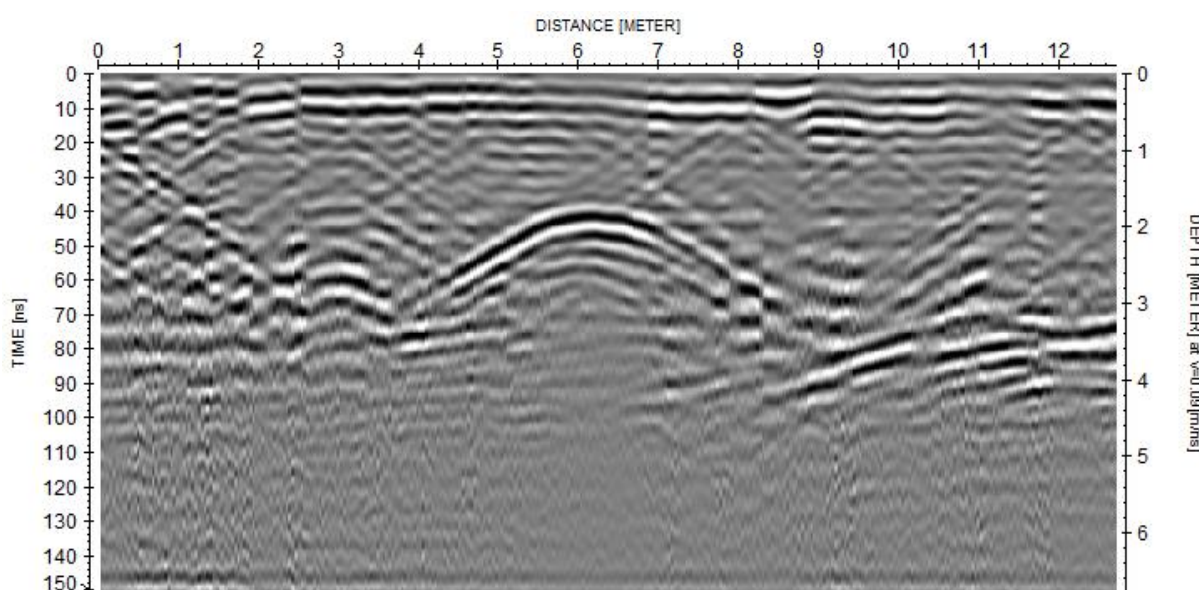
frekvenciou pásmového filtra (detailný popis uvedeného filtra sa nachádza v Prílohe ku skriptám).

Pre aktuálny profil a pre použitú anténu 160 MHz bolo nastavenie filtra bandpassbutterworth nasledovné:

„lower cutoff“ 100 - pre úplný útlm v pásme pod 100 MHz,

„upper cutoff“ 220 - pre úplný útlm v pásme nad 220 MHz.

Výsledok použitia filtra bandpassfrequency je na obr. 5.24



Obr. 5.24 Radargram po aplikovaní 1D filtra Bandpassbutterworth.

- Timedependent - pásmová priepusť

Filter je definovaný dvomi párami frekvencií „low-cut“ a „high-cut“. Prvým párom frekvencií nastavujeme pásmovú priepusť typu butterworth v hornej časti stopy pri povrchu, druhým párom v spodnej časti stopy. Medzi hornou a spodnou časťou stopy sa budú hranice pásmovej priepuste lineárne meniť. Vhodným nastavením vieme dosiahnuť silné potlačenie šumu v spodnej časti profilu a zároveň malé ovplyvnenie fázových a frekvenčných zmien, ktoré by mohli niesť zaujímavé informácie v hornej časti profilu. Tento filter je veľmi vhodný pre dáta z HDR antén.

Pre aktuálny profil a pre použitú anténu 160 MHz bolo použité nasledovné nastavenie filtra timedependent:

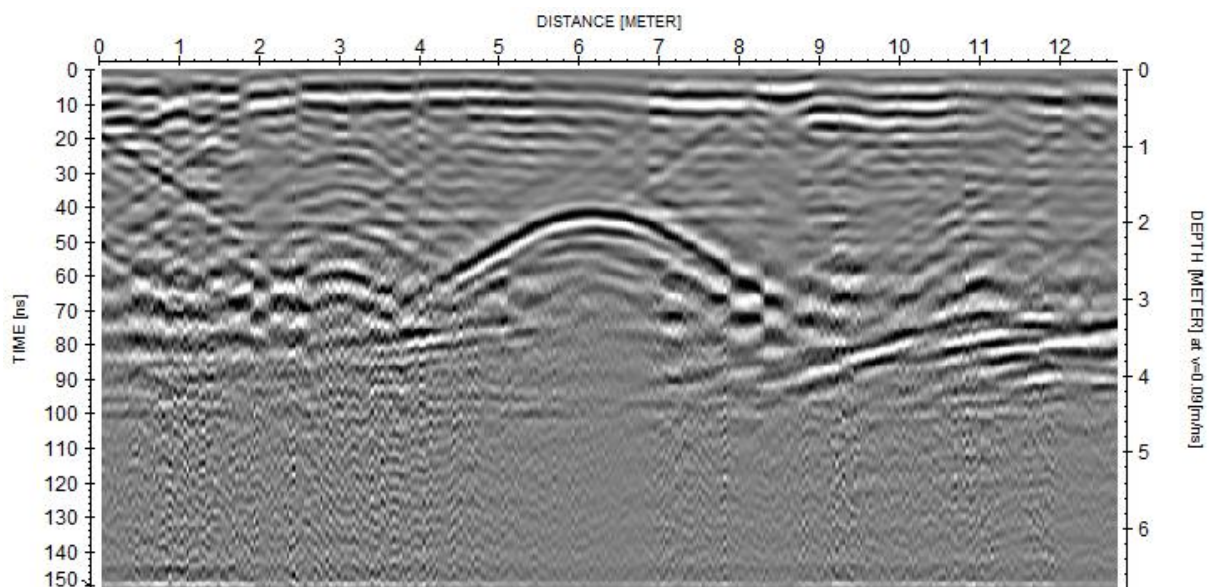
„lower cutoff“ 60 - pre úplný útlm v pásme pod 60 MHz,

„upper cutoff“ 220 - pre úplný útlm nad 220 MHz.

„lower cutoff“ 100 - pre úplný útlm v pásme pod 100 MHz,

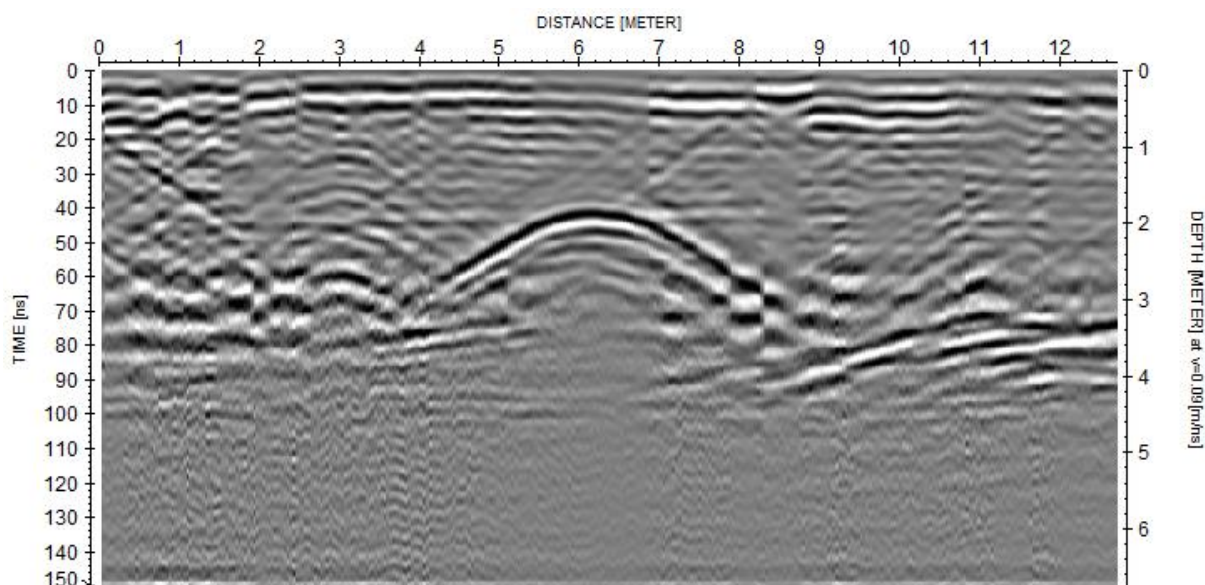
„upper cutoff“ 360 - pre úplný útlm nad 360 MHz

Výsledok použitia filtra timedependent je na obr. 5.25.



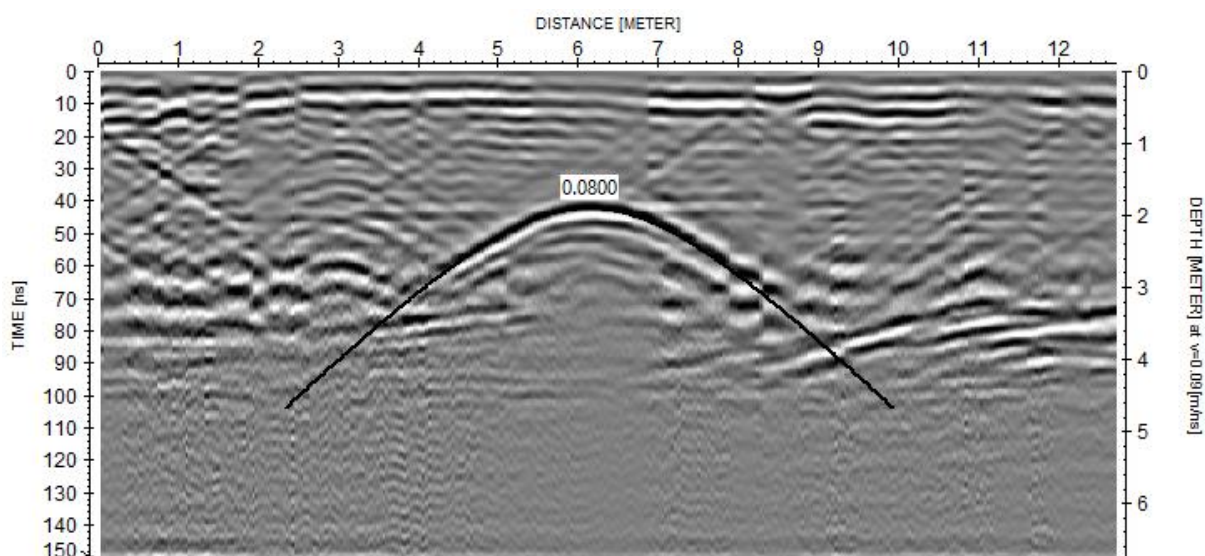
Obr. 5.25 Radargram po aplikovaní 1D filtra Timedependent.

6. 2D filter Running average. Pracuje v smere osi x podobne ako pracuje cosínusový bandpassfilter po stopách v smere osi y. Hodnota priemerovania pre running average je uvádzaná v stopách – napríklad pri zadaní hodnoty 3 budú brané do filtrácie tri stopy (záznamy), umiestnené vedľa seba. Výsledok použitia filtra Running average s hodnotou 3 je na obr. 5.26.



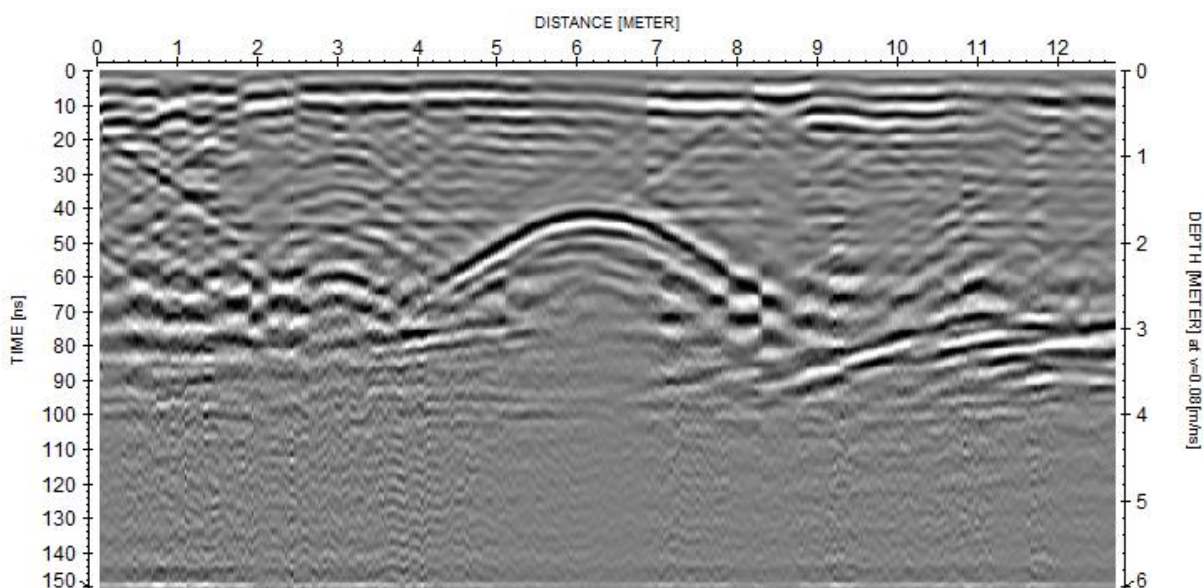
Obr. 5.26 Radargram po aplikovaní 2D filtra Running average.

7. Velocity adaptation. Tento nástroj umožňuje nastaviť hodnotu rýchlosti pre výpočet hĺbky na základe tvaru refrakčnej hyperboly (obr. 5.27). Po jeho navolení v hlavnom menu Analysis, sa na spracovávanom reze objaví malá čierna (synteticky vypočítaná) difrakčná hyperbola. Tú je možné posúvať myšou v rámci celého radargramu a napasovať ju na existujúce difragované vlny v reze (obr. 5.27). Zadávaním rôznych hodnôt rýchlosti v (m/ns) sa mení sklon postranných častí syntetickej hyperboly tak, aby zodpovedal tomu na zázname (dôležitý je tiež parameter „width“, ktorým sa mení šírka zobrazenej syntetickej hyperboly).



Obr. 5.27 Zistenie hodnoty rýchlosti šírenia sa EM vlny pomocou nástroja Velocity adaptation.

Na základe Velocity adaptation bola v tomto prípade určená hodnota rýchlosti 0,08 m/ns. V okne voľby „Plot – Options“ zadáme túto hodnotu pri zvolení hĺbkovej osi „DepthAxis“ v mieste pre v (m/ns). Týmto krokom je základné spracovanie ukončené. Výsledný spracovaný radargram je uvedený na obr. 5.28.

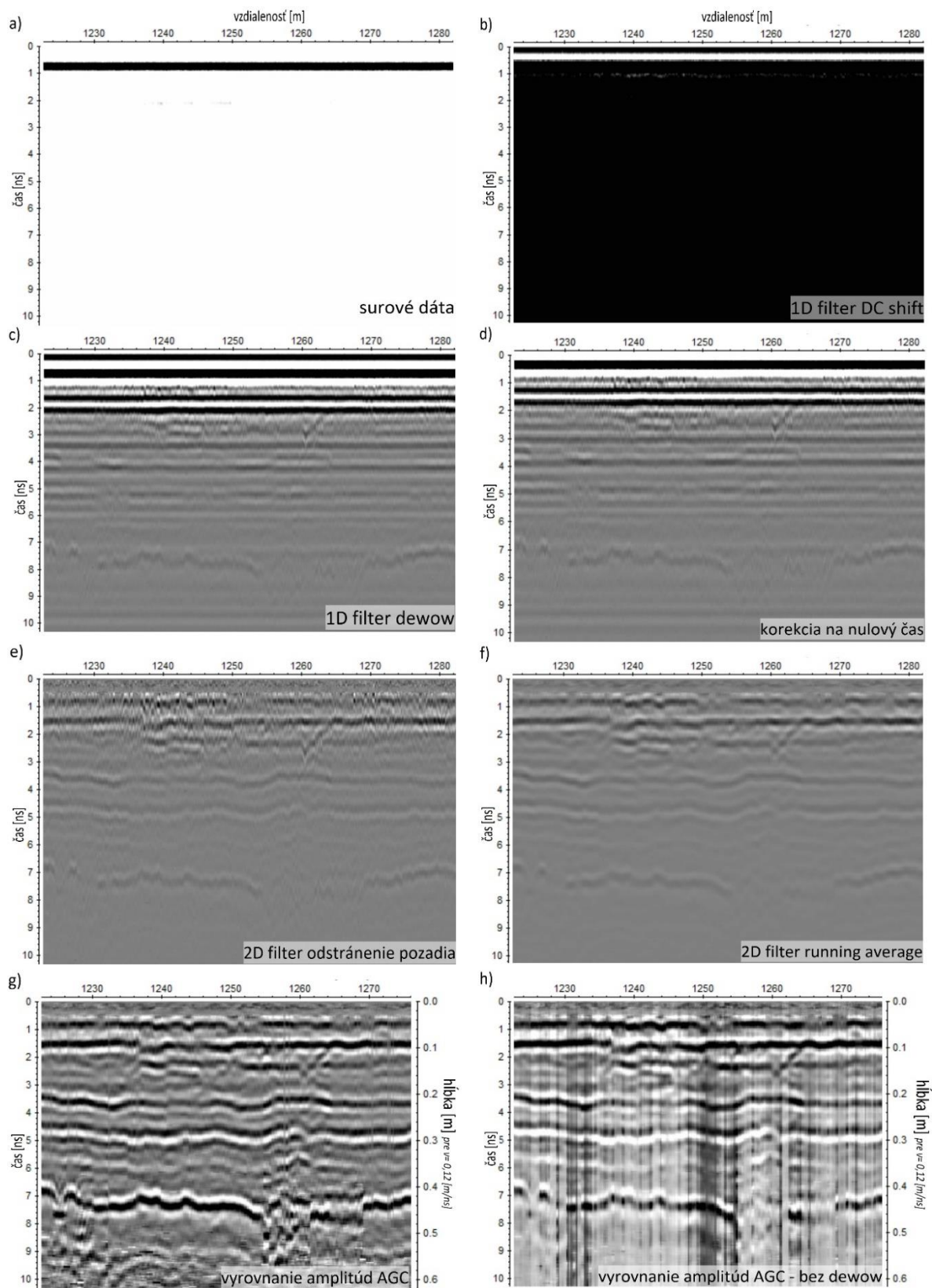


Obr. 5.28 Výsledok meranie realizovaného za účelom lokalizovania podzemného potrubia v priemyselnom areáli - spracovaný 2D radargram s prejavom potrubia na metrži cca 6 m v hĺbke cca 1,6 m pod povrchom.

Na záver uvedeného príkladu spracovania treba upozorniť, že **HDR antény MALA nepotrebujú použiť 1D filtre subtract-DC-shift a subtract-mean(dewow), pri iných typoch aparátúr a antén môže mať vynechanie týchto filtrov negatívny priebeh na celé spracovanie.** Ukážka spracovania s použitím oboch 1D filtrov je na obr. 5.29. Ide o spracovanie dát z merania inšpekčným georadarovým systémom CX 12 od firmy Malá, s vysokofrekvenčnou anténou so strednou vysielačou frekvenciou 1,6 GHz na cestnej komunikácii, za účelom zistenia stavu vozovky (hrúbky konštrukčných vrstiev). Merania boli realizované v kontinuálnom móde, na meranie vzdialenosti bol použitý odometer a poloha merania bola zaznamenaná pomocou diferenciálneho GPS prepojeného s aparátúrou. Namerané dáta boli importované do prostredia programu Reflex W (obr. 5.29a) a na dáta boli aplikované následné operácie spracovania:

- 1) **1D filter subtract-DC-shift**, ktorý odstraňuje jednosmernú zložku superponovanú na vysokofrekvenčný signál (obr. 5.29b).
- 2) **1D filter subtract-mean (dewow)** na odstránenie nízkofrekvenčnej fluktuácie v centrálnej frekvencii nosnej vlny (tzv. low frequency wow). Ako je vidieť aj na obr. 5.29c, výsledok tejto filtrácie nie je na prvý pohľad zjavný, no ak by sa nepoužil pri nasledovných krokoch by mohlo dochádzať napr. k zosilňovaniu okrem užitočného signálu aj rôznych parazitných signálov. Na konci procesingu je na porovnanie zobrazený aj výsledok komplexného spracovania s vynechaním dewow filtra (obr. 5.29h – uvedený rez je porušený šumom vo forme vertikálnych úsečiek, ktoré sú pri aplikácii dewow filtra výrazne potlačené).
- 3) **Korekcia Time-zero** použitím funkcie „move starttime“ z ponuky statických korekcií a mutingu. Pri tomto kroku bola určená hodnota nulového času, a to 0,39 ns. Výsledok Time-zero korekcie je na obr. 5.29d.
- 4) **2D filter background removal** na odstránenie pozadia. Na obrázku obr. 5.29e je po aplikovaní tejto funkcie vidieť vo vrchných častiach radargramu potlačenie prejavu priamej vlny z vysielacej do prijímacej antény.
- 5) **2D filter running average**. Tento druh filtrácie odstránil drobný šum (roztrasenie) v plytšej časti rezu. Výsledok filtrácie je na obr. 5.29f.
- 6) **Vyrovnanie amplitúd (gain)** použitím automatického zosilnenia AGC. Výsledný radargram je na obr. 5.29g.
- 7) **Konverzia časového záznamu na hĺbkový**. V tomto prípade bola na prepočet časovej osi na hĺbkovú (na obr. 5.29g a obr. 5.29h je okrem časovej osi aj os hĺbková) zvolená tabuľková rýchlosť pre asfaltové vrstvy, a to 0,12 m/ns. Táto hodnota bola neskôr potvrdená koreláciou rozhraní na radargrame s jadrovými odvrtní z vozovky.

Výsledkom spracovania je radargram pripravený na proces interpretácie (obr. 5.29g).

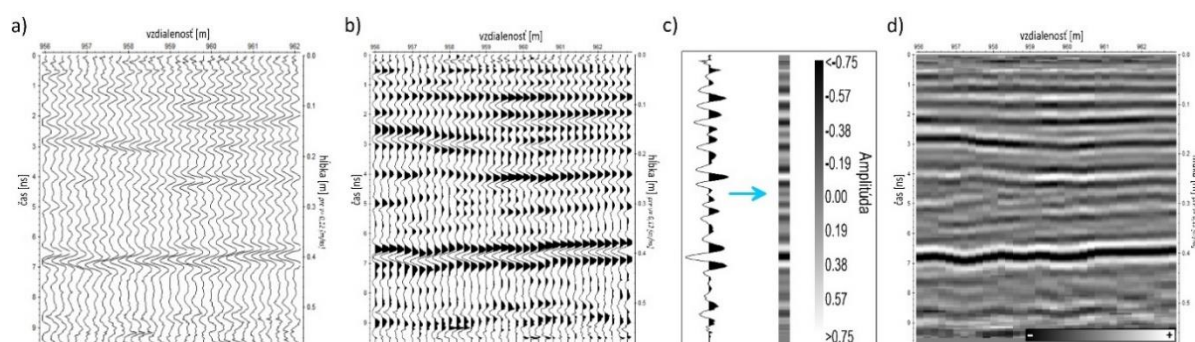


Obr. 5.29 Ukážka postupu spracovania dát v programe ReflexW: a) surové dáta, b) po aplikovaní 1D filtra subtract-DC-shift, c) po aplikovaní 1D filtra dewow, d) po korekciu o nulový čas, e) po odstránení pozadia - background removal, f) po aplikovaní 2D filtra running average, g) po vyrovnaní amplitúd (gain) prostredníctvom AGC - výsledný radargram, h) výsledný radargram - spracovanie s vynechaním 1D filtra dewow.

6 Možnosti zobrazenia a interpretácie

Vhodné zobrazenie dát je neoddeliteľnou súčasťou spracovania a predpokladom ich správnej interpretácie.

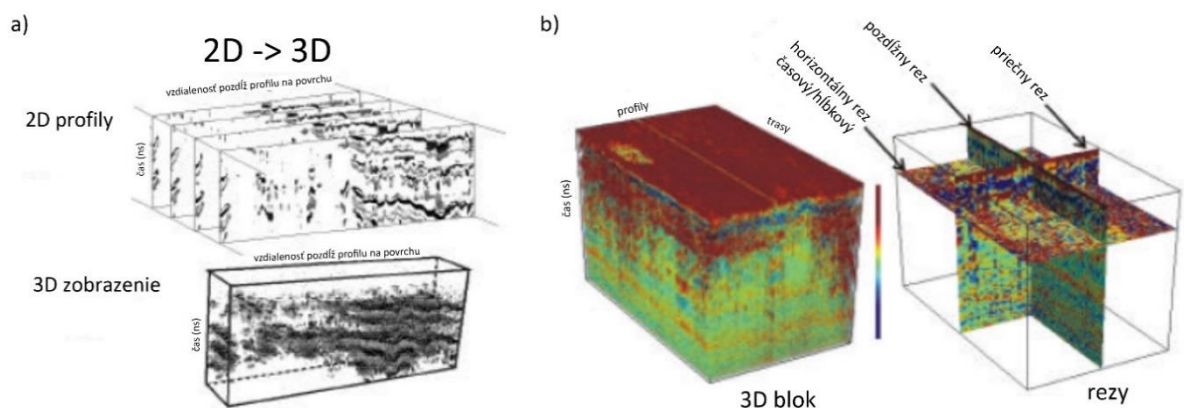
Základným zobrazením stopy je oscilografický zápis tzv. wiggle trace (obr. 6.1 a, b). Tento typ zobrazenia záznamu je však pri vykresľovaní množstva stôp zaznamenaných pozdĺž profilu nepraktický. Preto sa bežne používa rastové zobrazenie (obr. 6.1 d), pri ktorom sa amplitúde priradí farba s intenzitou zodpovedajúcou rozsahu amplitúdy (obr. 6.1 c), (Daniels, 2000). Výber farebnej škály zobrazenia a priradenie rozsahu amplitúd je veľmi dôležitým krokom, ktorý môže viesť k zníženiu šumu a potlačeniu rušivých javov a tým k optimalizácii interpretácie. V prípade veľmi komplexných prostredí sa môže zjednodušenie a sprehľadnenie záznamu dosiahnuť zobrazením iba vrcholových hodnôt na každej stope (minimálnej a maximálnej amplitúdy) (Daniels, 2000).



Obr. 6.1 Možnosti zobrazenia zaznamenaných stôp: a) oscilografický zápis - wiggle, b) oscilografický zápis s vyplnenými pozitívnymi amplitúdami, c) vytvorenie rastového zobrazenia stopy z oscilografického zápisu, d) rastové zobrazenie (point mode) v odtieňoch šedej v rozsahu od čiernej po bielu.

Zaznamenané dáta je možné zobrazit' ako 1D zobrazenie vo forme stopy, 2D zobrazenie na profile a 3D zobrazenie v bloku (hranole). Jednorozmerná stopa nemá veľkú výpovednú hodnotu pri interpretácii, kým ich nie je umiestnených viac vedľa seba. Tak vznikne 2D prierez prostredím pod meraným profilom alebo 3D blok. 3D bloky sú vytvorené z viacerých paralelných profilov vedených tesne vedľa seba interpoláciou dát medzi nimi, ako je znázornené na obr. 6.2 a). Na údaje v 3D boku sa potom môžeme pozerať viacerými spôsobmi, buď ako na celok (prípadne výrezy,

sub-bloky), alebo môžeme vytvárať rôzne 2D rezy 3D kockou (priechne, pozdĺžne, horizontálne - time slice), ako je znázornené na obr. 6.2 b), (Daniels, 2000).



Obr. 6.2 Zobrazenie dát v 3D bloku: a) proces vytvorenia 3D zobrazenia z viacerých paralelných profilov, b) rozčlenenie (rozkrájanie) 3D bloku na rôzne rezy.

6.1 Interpretácia obrazu

Radargram odráža stavbu prostredia pod povrchom pozdĺž meranej línie, profilu. Sú na ňom zachytené reflexy, ktoré vznikli pri odraze na rozhraniach prostredí s rôznymi fyzikálnymi vlastnosťami. Cieľom interpretácie je identifikovať pôvod ich vzniku a prisúdiť im konkrétny význam.

Možnosti interpretácie sú často limitované viacerými faktormi. Okrem intenzity prijímaného signálu a frekvencie antény to sú:

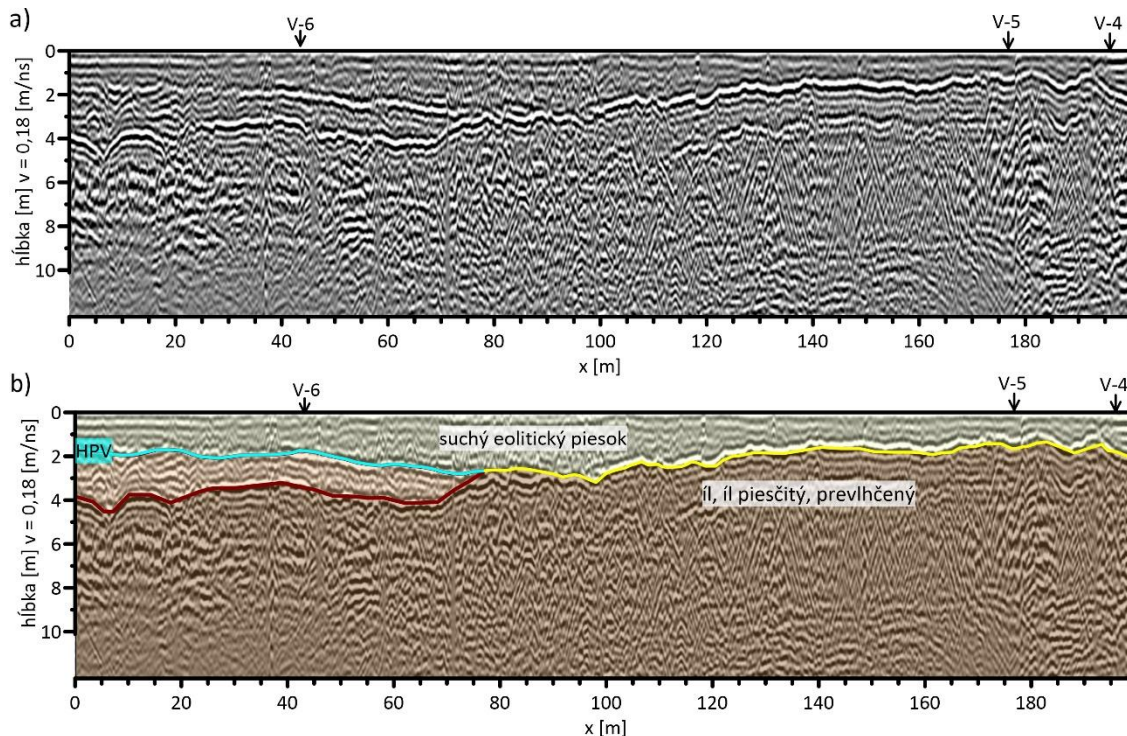
- dostatočný fyzikálny kontrast medzi rozhraniami,
- veľkosť, tvar, poloha a početnosť objektov a rozhraní (nevidieť príliš strmo uklonené rozhrania a drobné objekty, početné objekty generujú v obraze chaos),
- ak sa objekt nachádza pod hranicou prahu šumu alebo je zatienený objektmi v nadloží,
- heterogenita nadložného a okolitého prostredia (napr. skládky, smetiská, a pod.), (Terray, 2021).

V niektorých prípadoch je možné niektoré z týchto limitujúcich faktorov upraviť vhodným spracovaním ako napríklad upraviť zatienené úseky vhodným zosilnením, alebo použiť migráciu na eliminovanie difrakčných hyperbol. Interpretácia, je však podobne ako spracovanie veľmi komplexný a interaktívny proces, pri ktorom treba mať

stále na pamäti možnosti a limity konkrétneho prieskumu. Okrem toho je interpretácia radargramov často veľmi subjektívna činnosť a pre overenie správnosti interpretovaných rozhraní a objektov sa vyžaduje korelácia s údajmi z vrtných, prípadne výkopových prác.

6.1.1 Spojité rozhrania

Spojité reflektory predstavujú kontakt vrstiev s dostatočným rýchlostným kontrastom. Môže ísť o vrstvy geologické ako napr. kontakt pieskov a ílov, nástup skalného podložia, hladina podzemnej vody (HPV), alebo stavebné vrstvy cestných komunikácií, kontakt základov stavieb so základovou pôdou a pod. Pri interpretácii sa na profile vyznačí priebeh výrazných rozhraní. Tento proces sa nazýva „pikovanie“ (pick- vybrať). Následne je vypikovanému rozhraniu priradený konkrétny význam. Na obr. 6.3 je príklad geologickej interpretácie radargramu. Jednotlivé rozhrania na zázname boli interpretované na základe korelácie radargramu s údajmi z vrtných jadier.

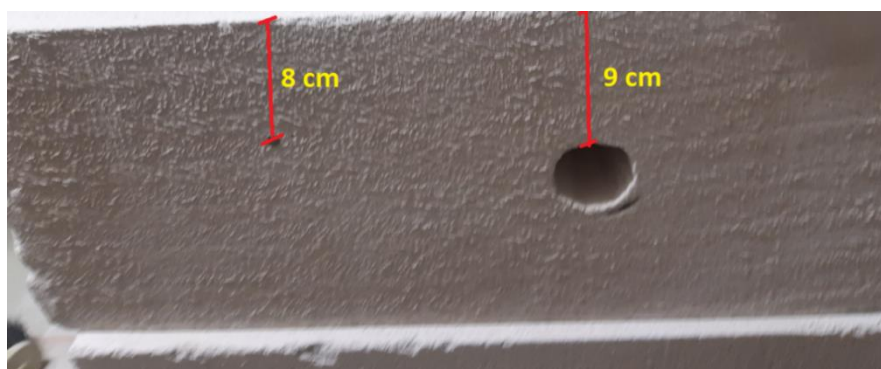


Obr. 6.3 Spojité rozhrania: a) radargram, b) geologická intepretácia; V-4, V-5, V-6 - pozícia vrtov, HPV - hladina podzemnej vody.

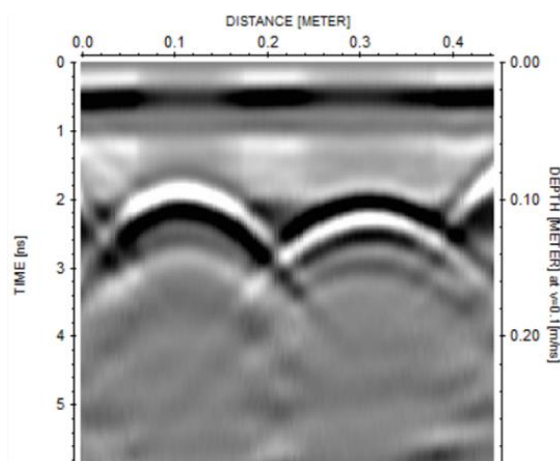
6.1.2 Difrakčné hyperboly – izolované ciele

Na izolovaných objektoch s malým prierezom, ako sú potrubia, korene stromov a jednotlivé skaly dochádza k difrakcii dopadajúceho EM vlnenia, preto sú na nemigrovanom zázname zachytené vo forme difrakčnej hyperboly (vid. kap.5.2 časť migrácia). Tieto hyperboly bývajú jednoduché, hladké a neprerušované. Detekcia takýchto izolovaných objektov (vznik typických difragovaných vĺn) a interpretácia polarita zaznamenaného odrazu je demonštrovaná na nasledujúcom praktickom modelovom príklade.

V tvárnici (Ytong, obr. 6.4) sa nachádzajú dva objekty – klinec v hĺbke 8 cm pod horným okrajom tvárnice a vyvŕtaný otvor (dutina) s hĺbkou horného okraju 9 cm pod okrajom tvárnice. Uvedená situácia bola zoskenovaná GPR záznamom s 2000 MHz PALM anténou od firmy GSSI – typický časový/hĺbkový rez je uvedený na obr. 6.5.

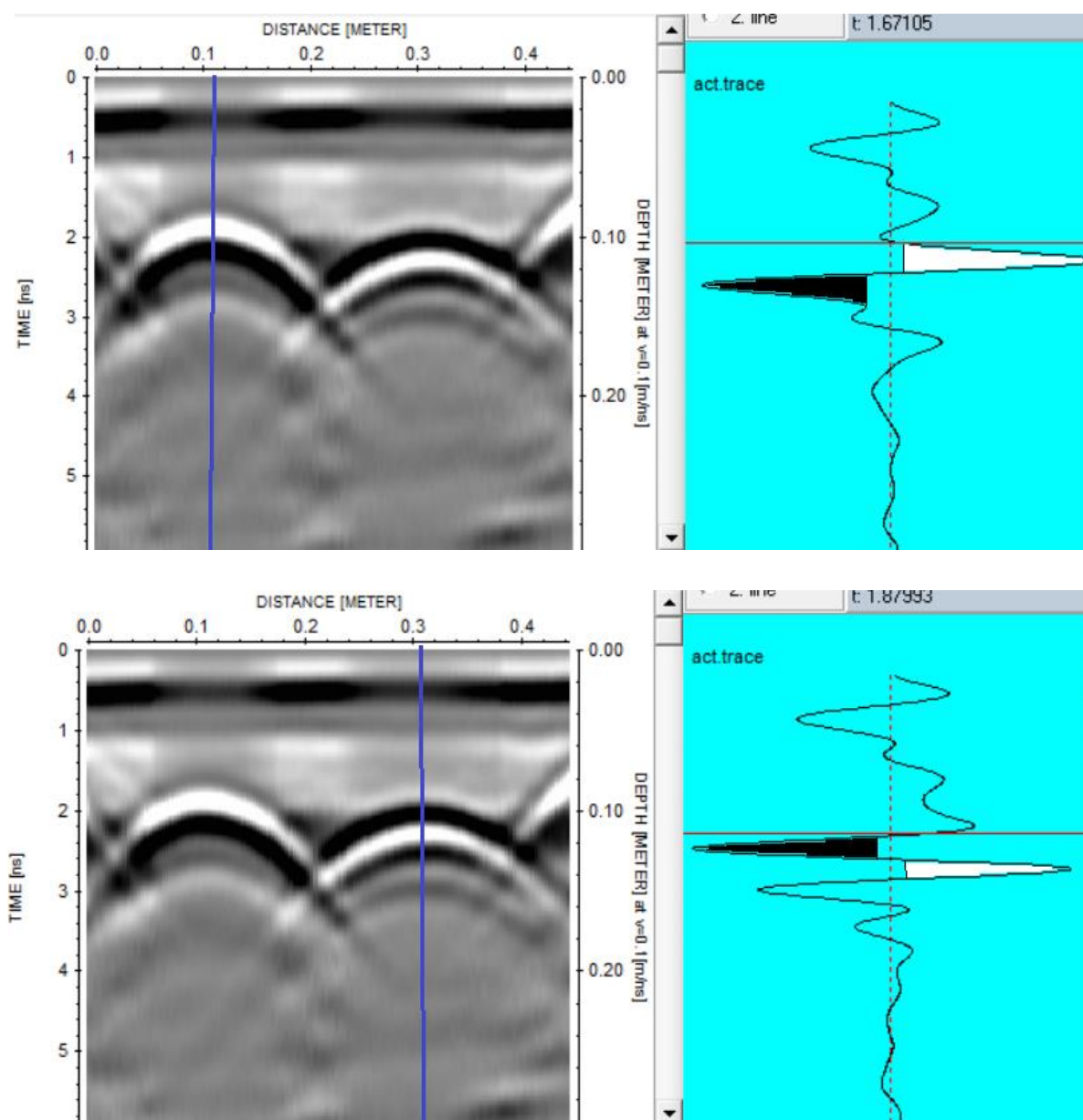


Obr. 6.4 Tvárnica Ytong s umiestnením detegovaných objektov.



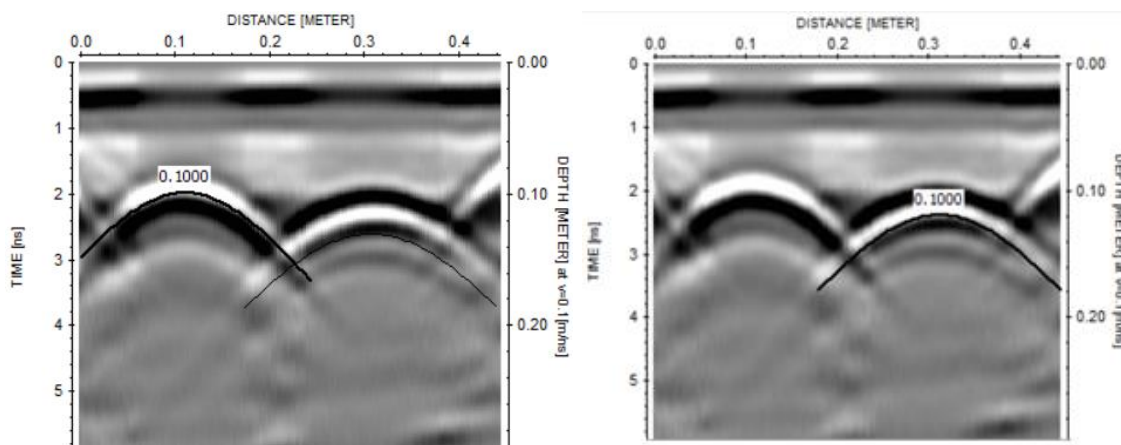
Obr. 6.5 Typický časový/hĺbkový rez, získaný pomocou 2000 MHz antény.

Fáza/polarita zaznamenaného vlnenia nesie informáciu o tom, ako sa mení rýchlosť šírenia sa EM vlnenia na rozhraní. V prípade klinca (oceľ) je rýchlosť šírenia EM vln nižšia ako v materiáli tvárnice, a tak je poradie amplitúd detegovanej vlny také isté ako pri kontakte medzi vzduchom a tvárnitou – reflex začína maximom (biela farba, obr. 6.6). V prípade dutiny dochádza k preklopeniu amplitúd, nakoľko sa zmení znamienko reflexného koeficientu – EM vlnenie zrazu prejde z prostredia Ytongu do prostredia dutiny, kde je jeho rýchlosť vyššia (vzduch) – reflex začína minimom (čierna farba, obr. 6.6):



Obr. 6.6 Zobrazené záznamy (vľavo) od izolovaných stôp GPR záznamu (vpravo stopa vyznačená na profile modrou líniou) pre rozdielne difragované vlny – spôsobené prítomnosťou klinca (hore) a dutiny (dolu).

Uvedený príklad demonštruje aj možnosť určenia rýchlosti šírenia EM vln v materiáli tvárnice využitím difrakčnej hyperboly. Na obr. 6.7 je znázornená aproximácia rýchlostnej hyperboly pre obe difragované vlny - aproximácia rýchlosti je 10 cm/ns (0,1 m/ns).

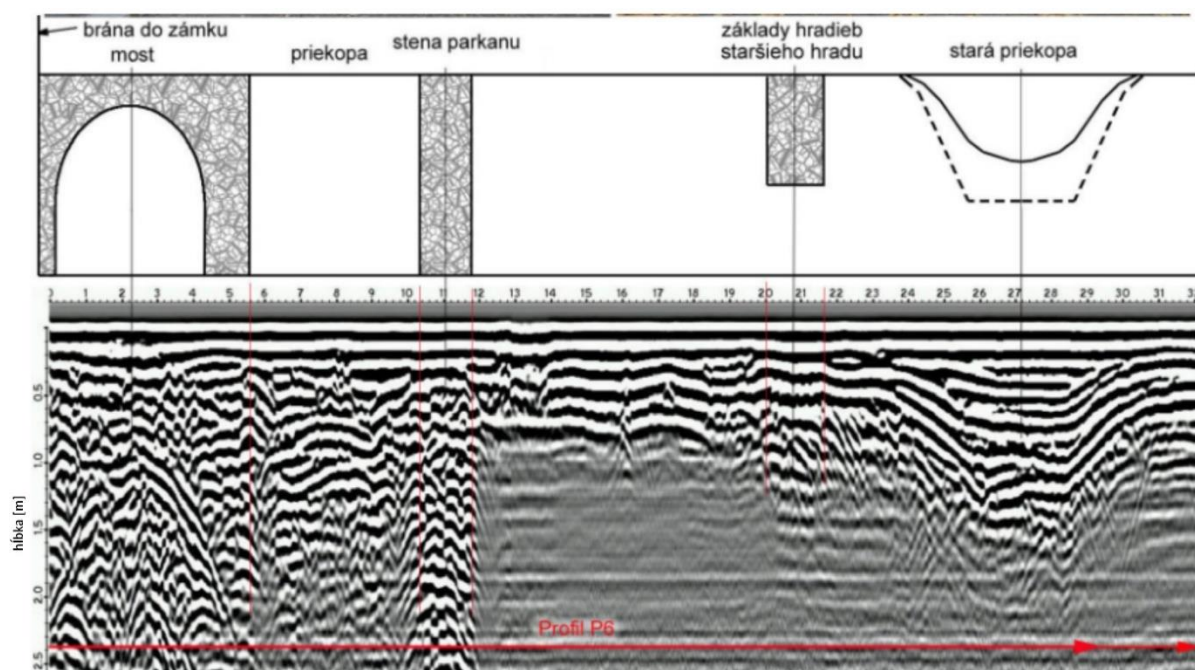


Obr. 6.7 Aproximácia rýchlostnej hyperboly v prostredí ReflexW (pre obe detegované difragované vlny).

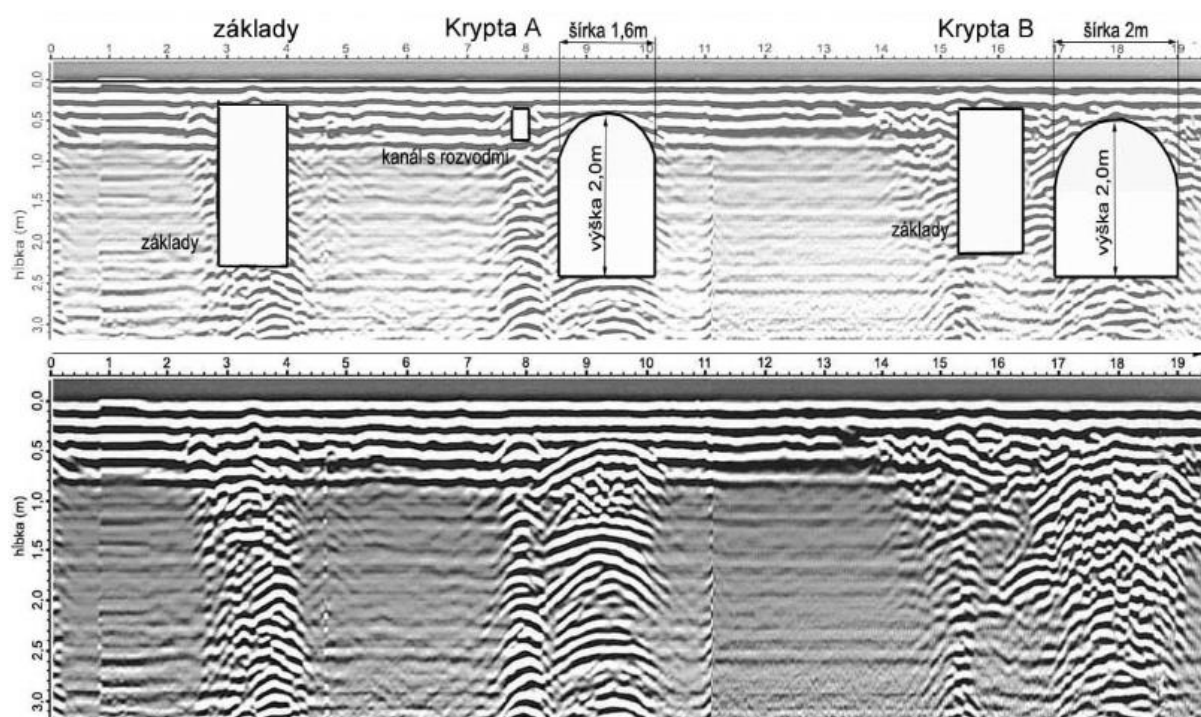
Ak sú hyperboly zaznamenané na radargrame široké, prípadne prerušené alebo nepravidelného tvaru, môže ísť o spojenie dvoch alebo viacerých na seba naskladaných a nepravidelných hyperbol. Tieto zložené hyperboly môžu byť generované objektmi s veľkým prierezom a preto je na radargrame zachytená ich horná i dolná hranicu alebo v prípadoch, keď sú povrchy nepravidelné a viaceré väčšie či menšie hyperboly sa zlúčia do jednej.

6.1.3 Komplexné štruktúry

Príklady interpretácie komplexných štruktúr ako sú napr. základy budov, podzemné steny, výkopy, staré priekopy, chodby, krypty a pod. sú uvedené a popísané na obr. 6.8 a 6.9.



Obr. 6.8 Príklad GPR záznamu (dolu) s interpretáciou (hore) - prejavy podzemných objektov ako pochované stavby, steny, priekopy (Terry, 2021).



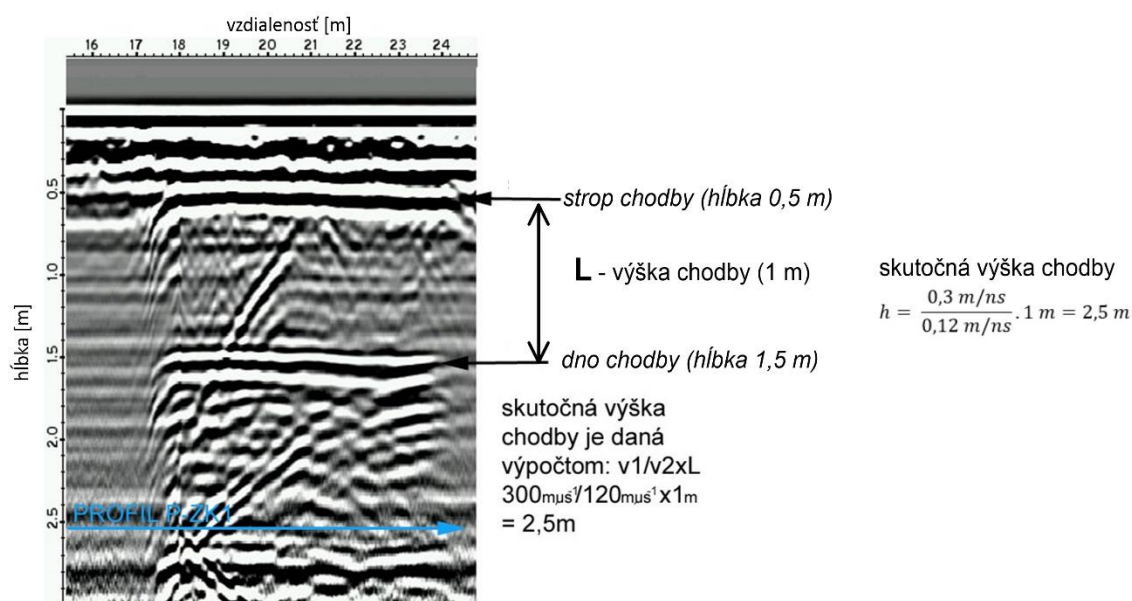
Obr. 6.9 Príklad GPR záznamu (dolu) s interpretáciou (hore) - prejavy podzemných objektov ako základy budov a krypty/dutiny rôznych tvarov a veľkostí (Terry, 2021).

6.1.4 Podzemné priestory – dutiny

U dutín väčších rozmerov, ako napr. podzemné chodby, štôlne či jaskynné priestory, môže byť na radagrame zachytený strop a dno dutiny vo forme výrazného reflexného rozhrania ako je vidieť na obr. 6.9 a 6.10. Tvar výrazného reflexu od stropu dutiny väčšinou presne odpovedá skutočnému tvaru dutiny v jej hornej časti (keď je strop rovinný, tak reflex bude mať rovný tvar; keď má strop tvar klenby, tak aj tvar reflexu tomu bude zodpovedať). Treba si však uvedomiť, že dno dutiny sa na hĺbkovom reze, ak nebola aplikovaná presná hĺbková kalibrácia rýchlostným modelom, nezobrazuje v správnej pozícii. To znamená, že ani výška zobrazenej dutiny (L) nie je určená správne (obr. 6.10). Pri konverzii vertikálnej časovej osi na hĺbkovú sa bežne používa rýchlosť šírenia sa EM vlny v prostredí obklopujúcom dutinu (v_1). Vlna sa však v prázdnom priestore dutiny šíri rýchlosťou $v_2 = 0,3 \text{ m/ns}$, čím sa do konverzie časového na hĺbkový rez zavádza chyba. Skutočná výška dutého priestoru (h) sa určí zo vzťahu (6.1, Terray, 2021):

$$h = \frac{v_2}{v_1} \cdot L, \quad (6.1)$$

kde L je výška dutiny určená z radagramu, ktorý bol prepočítaný na hĺbky podľa rýchlosti prostredia obklopujúceho danú dutinu. Podľa tohto údaju sa následne upraví informácia o skutočnej hĺbke dna dutého priestoru.

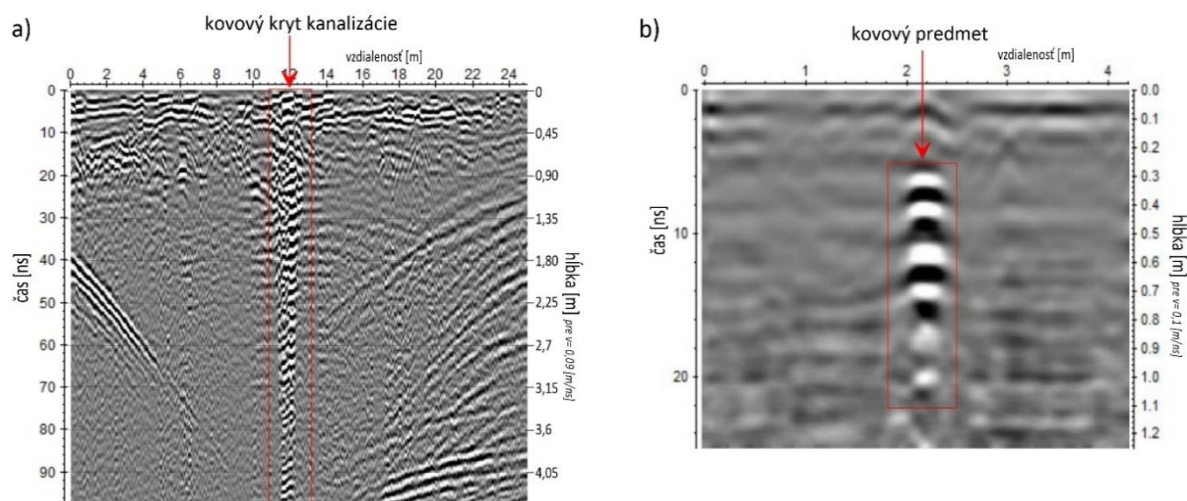


Obr. 6.10 Interpretovaný radagram s určením skutočnej hĺbky dutého priestoru (Terray, 2021).

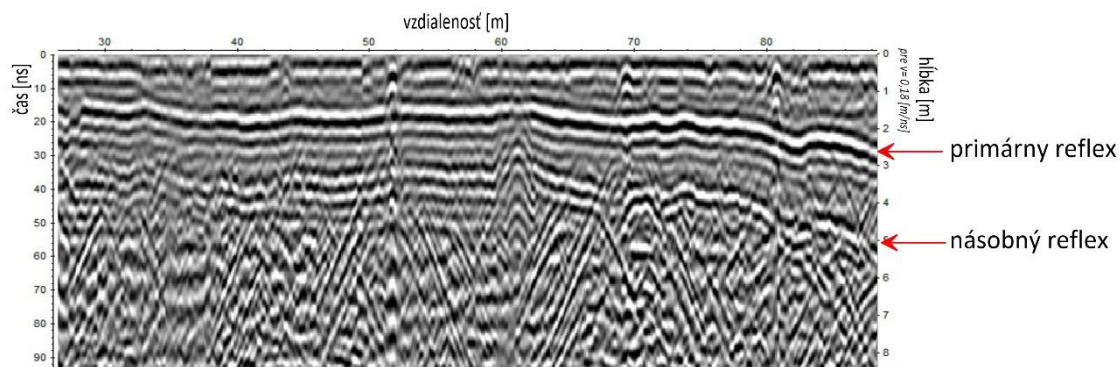
Niektorí autori (napr. Persico et al., 2024) navrhujú pri prepočte časových radargramov na hĺbkové použiť kombinovaný rýchlostný model, pri ktorom sa v predpokladanom priestore dutiny použije 0,3 m/ns. Tento prístup je nazývaný ako CTDC (Combined Time-Depth Converison = kombinovaný prepočet času na hĺbku). Pri takomto postupe treba samozrejme mať určitú predstavu o vertikálnom rozmere študovanej dutiny a zohľadniť ju pri tvorbe uvedeného kombinovaného rýchlostného modelu. Takýto krok je možné po vyskúšaní zopakovať – pre zmenený kombinovaný rýchlostný model a postupne (iteratívnym spôsobom) sa dopracovať ku správnej prezentácii tvaru dutiny vo výslednom upravenom hĺbkovom reze.

6.1.5 Viacnásobné odrazy (multiple)

Viacnásobné odrazy na radarovom zázname indikujú prítomnosť predmetov/prostredia, ktorých dielektrické vlastnosti sú vo veľkom kontraste s okolím. EM vlna sa od nich odráža, vracia sa k povrchu, kde sa od rozhrania vzduch/sediment znova odráža naspäť k výraznému reflektoru a toto sa opakuje až kým nestratí všetku energiu (vid. rezonančný rozptyl v podkap. 3.3). Bežným zdrojom viacnásobných odrazov sú rôzne kovové predmety. Malé plytko uložené kovové objekty alebo napr. poklopy kanálov, vytvárajú na radragrame úzku oblasť reflexov s veľkými amplitúdami od povrchu až po spodok záznamu (obr. 6.11). Ďalším zdrojom násobných odrazov môže byť voda stojaca na povrchu (napr. kaluže na asfalte), či rozhrania pod povrchom s vysokým reflexným koeficientom (obr. 6.12). Opakované odrazy generujú na radargrame rovnaký záznam ako primárny odraz, pričom TWT/hĺbka prvého násobného odrazu býva dvojnásobná ako primárneho reflexu a ďalšie násobné odrazy vykazujú rovnaký posun (obr. 6.12). Viacnásobné odrazy môžu vznikať aj v dutinách, viacnásobným odrazom od rozhrania ich stropu s prázdny priestorom (obr. 6.9 prejav krypta A – násobný odraz v hĺbke cca 1,6 m).



Obr. 6.11 Viacnásobné odrazy: a) spôsobené kovovým krytom kanalizácie na povrchu, b) od kovového predmetu v hĺbke 30 cm pod terénom

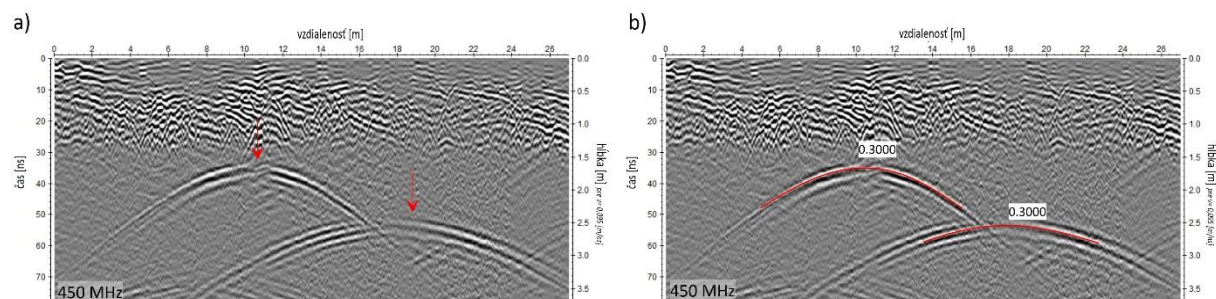


Obr. 6.12 Primárny a násobný odraz. Primárny odraz vznikol na kontakte suchých eolických pieskov a prevlhčeného piesčitého ílu, násobný odraz je zaznamenaný v dvojnásobnej hĺbke.

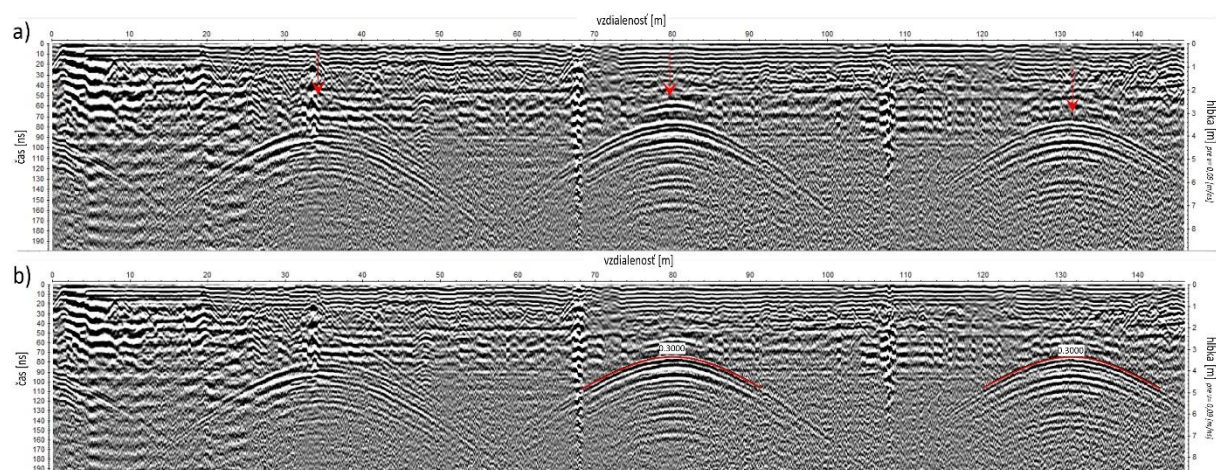
6.2 Efekty nadzemných konštrukcií

Napriek tomu, že tienené antény sú fokusované na meranie kolmo do hĺbky od roviny merania a nemali by prijímať signál z iných smerov, môže v prípade prítomnosti výrazného reflektora nad povrchom v blízkosti meracieho profilu dochádzať k zaznamenaní vlny odrazenej od takýchto objektov (napr. elektrické vedenie, kovové konštrukcie, lampy pouličného osvetlenia). Obráz na radargrame potom indikuje falošnú prítomnosť objektu/rozhrania v určitej hĺbke pod povrchom. Takéto „fantómy“ difrakčných hyperbol je možné na zázname identifikovať aproximáciou rýchlostnej hyperboly, pretože jej tvar zodpovedá rýchlosti šírenia sa EM vlny vzduchom, t.j. 0,3 m/ns. Príklady efektov nadzemných konštrukcií sú uvedené na nasledujúcich radargramoch. V prvom prípade je na radargrame zachytené

elektrické vedenie prechádzajúce krížom ponad meraný profil (obr. 6.13). Druhým príkladom je prejav stožiarov pouličného osvetlenia nad meraným profilom (obr. 6.14).



Obr. 6.13 Efekt vyvolaný elektrickým vedením nad meraným profilom: a) difragovaná vlna b) aproximácia rýchlostnej hyperboly.



Obr. 6.14 Efekt vyvolaný pouličným osvetlením nad meraným profilom: a) difragovaná vlna b) aproximácia rýchlostnej hyperboly.

7 Príklady využitia georadaru

7.1 Aplikácia georadaru na zistenie prítomnosti dutín pod betónovými platňami

Úvod

Betón (z fr. béton) je pevná stavebná látka vytvorená stvrdnutím betónovej zmesi, alebo stavivo vytvorené zmiešaním spojiva, plniva a vody, prípadne ďalších prísad a prímiesí, ktoré po stuhnutí nadobúda vlastnosti pevnej látky. Svojimi vlastnosťami patrí cementový betón (CB) medzi najpoužívanejšie stavebné materiály. Má vysokú pevnosť v tlaku, ale malú pevnosť v ťahu a šmyku (internetový zdroj 7).

Prostý betón je v podstate ideálnym médiom na meranie georadarom, napriek tomu výsledok georadarových meraní na betónových podlahách ovplyvňujú rôzne faktory. Jedným z nich je skladba samotného betónu a to hlavne typ a veľkosť použitého kameniva, hustota výstuže alebo prítomnosť kovových hoblín v betónovej zmesi. Hrubé kamenivo môže rozptýliť väčšinu energie GPR a/alebo vytvárať hojné hyperbolické prejavy a tým zastrieť ostatné dôležité informácie. Výstuž je pevná inštalácia, často usporiadaná do mriežkového vzoru a nedeformuje sa pod váhou vlhkého betónu, preto sa bude v radargramoch javiť ako séria hyperbolických prejavov (pozitívna-negatívna-pozitívna polarita/fáza alebo bielo-čierno-biela farba) v betónovej doske v približne rovnakej hĺbke. Prítomnosť výstuže alebo drôteného pletiva môže brániť šíreniu GPR vlny a/alebo obmedziť hĺbkový dosah. Stáva sa to, keď kovové prvky odrážajú veľkú časť celkovej energie GPR, čo znižuje množstvo energie prenikajúcej hlbšie do prostredia. Keďže kov je blízko povrchu betónovej dosky, môže vytvárať násobky/ozveny a zakrývať informácie z väčších hĺbok. Tento problém sa spája s hustejšími mriežkovými vzormi a väčším počtom vrstiev výstuže. Kovové hoblíny v betónovej zmesi môžu úplne blokovať prienik GPR signálu.

Cieľom týchto prípadových štúdií je prezentovať priamu a nepriamu detekciu dutín pod betónovými komunikáciami na troch konkrétnych príkladoch GPR meraní.

Prvá štúdia je príkladom priamej detekcie na základe zvýšenej reflektivity rozhrania na radargrame v mieste dutiny vytvorenej medzi betónovými platňami krytu parkoviska a jeho podkladovými vrstvami. Dutiny sa vytvorili v dôsledku presadania spráší v podloží podkladových vrstiev. Pravdepodobnou príčinou presadania spráší,

bolo zrejme ich prevlhčenie v dôsledku dotovania vodou z porušeného potrubia medzi jednotlivými časťami odvodňovacieho systému areálu (odtokový žľab, retenčné nádrže, vsakovacia studňa) a pri nadmernej zrážkovej činnosti v posudzovanej oblasti. Porušenie potrubí bolo overené kamerovými skúškami, ktoré boli realizované v rámci komplexnej diagnostiky príčin porušenia parkoviska. GPR merania potvrdili predpoklad výskytu dutín nad oblasťami umiestnenia odvodňovacích prvkov.

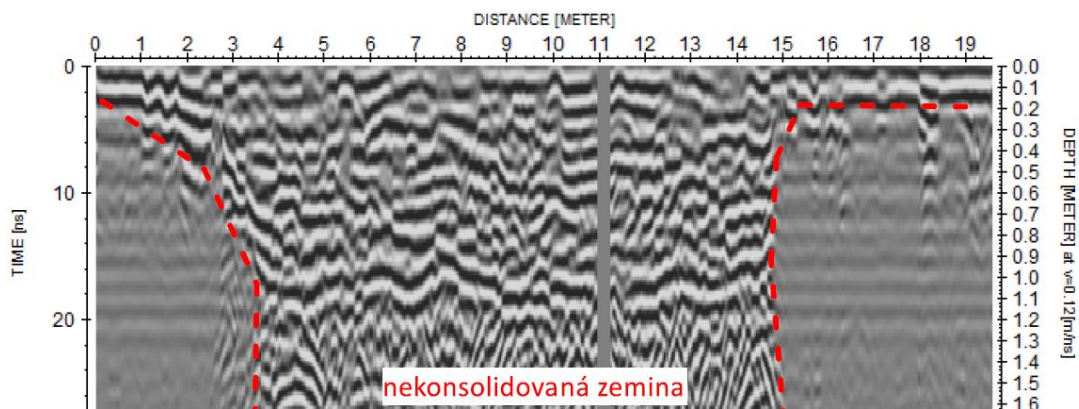
Druhá štúdia je príkladom detekcie podzemných priestorov pod podlahou skladovacej haly. Konštrukcia podlahy nad podzemnými priestormi spôsobila zvýšený útlm signálu, takže georadar nebol schopný pod podlahou žiadne iné rozhranie zachytiť. Prítomnosť podzemných priestorov bola teda na radargramoch detegovaná nepriamo, na základe špecifického prejavu konštrukcie podlahy nad týmito prázdnyimi priestormi.

Tretí príklad je ukážka merania georadarom v hale, kde bol v konštrukciu podlahy použitý dratkobetón (kovové hobliny v betónovej zmesi).

Uvádzané výsledky boli autormi učebného textu publikované v článku Putiška et al. (2024).

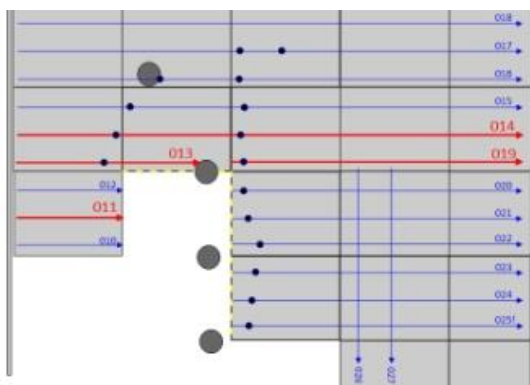
Priama detekcia dutiny

V prvej etape prezentovaného prieskumu vyhľadávania dutín pod betónovými platňami parkoviska, merania nepreukázali prítomnosť dutín, ani iných výrazných deformácií vo väčších hĺbkach (do 1,6 m pri 450 MHz anténe, do 12 m pri 160 MHz anténe), okrem oblasti osadenia retenčných nádrží. Na radargramoch meraných v ich okolí 450 MHz anténou (obr. 7.1), pri porovnaní so záznamom z iných častí meranej plochy vidieť, že prostredie je tu nehomogénne a teda spätný násyp v týchto miestach nie je skonsolidovaný. Výsledkom prvej etapy bolo zistenie, že výskyt dutiny odhalenej v prednej časti parkoviska je viazaný pravdepodobne na oblasť okolia retenčných nádrží, pričom k ich vzniku došlo v dôsledku sadania spraší v ich podloží.



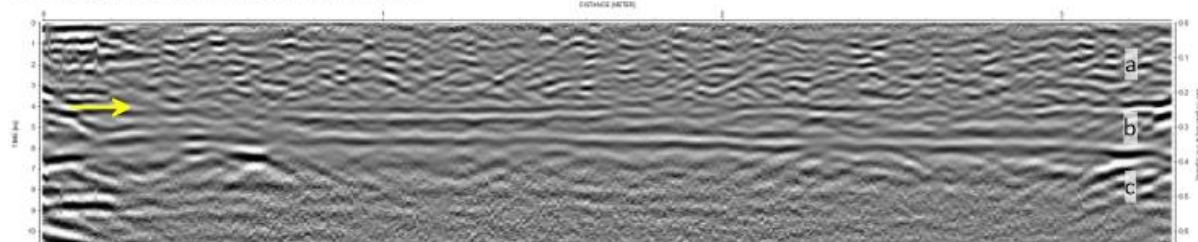
Obr. 7.1 Interpretovaný radargram z prvej etapy GPR merania 450 MHz anténou.

Rozlišovacia schopnosť použitých antén v prvej etape (450 MHz a 160 MHz) neumožňovala zaregistrovať dutiny vytvorené priamo pod betónovými panelmi. V rámci druhej etapy, pri meraní 1,6 GHz anténou, sa prítomnosť dutiny pod betónovými panelmi cestného krytu parkoviska prejavila priamo na radargramoch zobrazovaných v reálnom čase. V miestach, kde bola prítomná dutina, t. j. priestor vyplnený vzduchom, došlo k výraznému zvýšeniu reflektivity rozhrania na kontakte betónových panelov s podložnými vrstvami (obr. 7.2). Na základe týchto anomálnych prejavov bolo možné priestorové vymedzenie dutiny vyznačovať priamo v teréne počas merania.



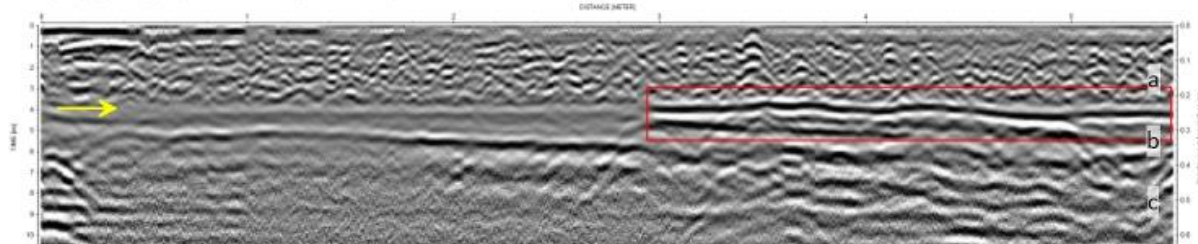
GPR profile 011

1. H WSEEL_Data\Seizm_11_2022\Fabry_parkoviska_GPR1000MHz\POCDATA\0101_011_001 / kanvas 361 / sampler 200



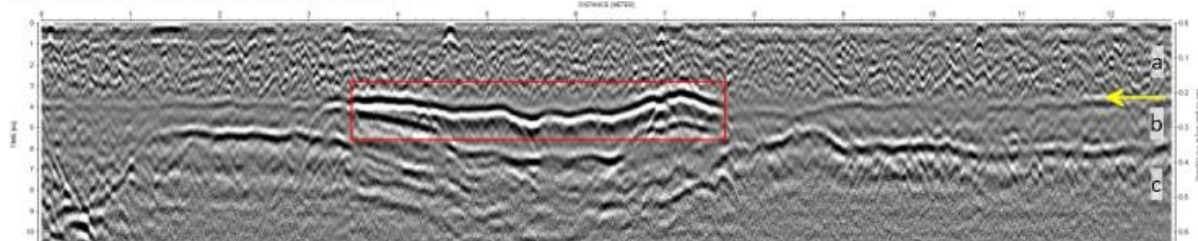
GPR profile 013

1. H WSEEL_Data\Seizm_11_2022\Fabry_parkoviska_GPR1000MHz\POCDATA\0101_013_001 / kanvas 641 / sampler 200



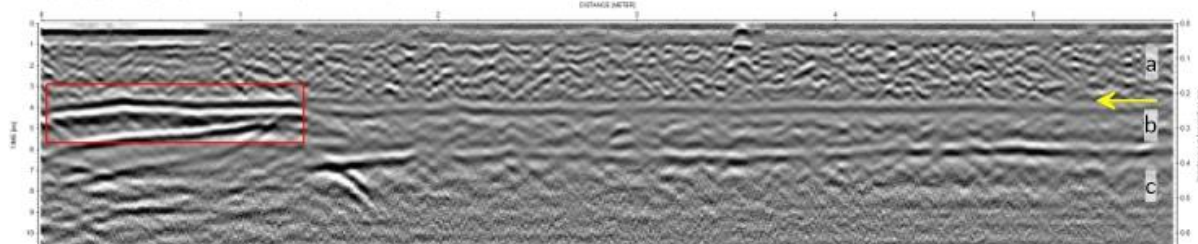
GPR profile 014

1. H WSEEL_Data\Seizm_11_2022\Fabry_parkoviska_GPR1000MHz\POCDATA\0101_014_001 / kanvas 1491 / sampler 200



GPR profile 019

1. H WSEEL_Data\Seizm_11_2022\Fabry_parkoviska_GPR1000MHz\POCDATA\0101_019_001 / kanvas 674 / sampler 200

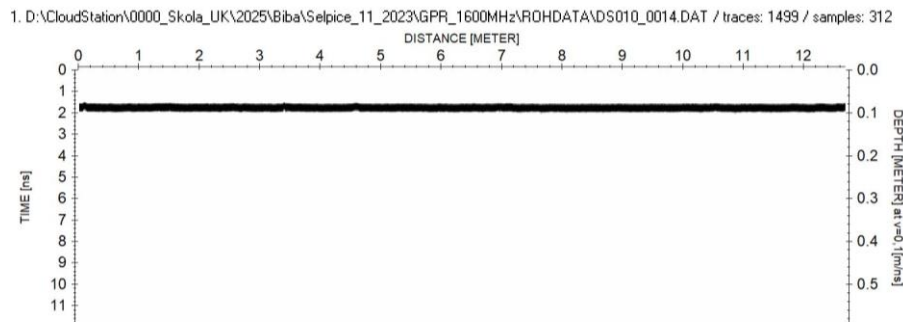


Obr. 7.2 Príklad spracovaných radargramov meraných 1,6 GH anténou na ploche parkoviska. Žltá šípka – kontakt betónových platin s podložnými vrstvami, červený obdĺžnik – zvýšenie reflektivity rozhrania (prejav prítomnej dutiny).

Ukážka spracovania GPR profilu 014

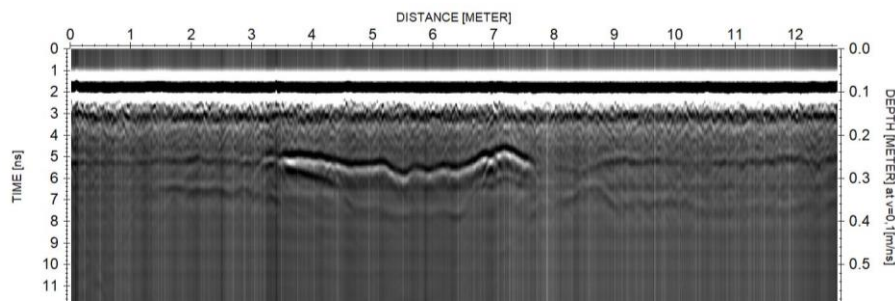
Meranie bolo realizované GPR systémom MALA CX s centrálnou frekvenciou antény 1600 MHz a spracované v programe ReflexW.

Na obr. 7.3 je zobrazenie profilu bez procesingu, tak ako bol stiahnutý z riadiacej jednotky a importovaný do programu ReflexW.

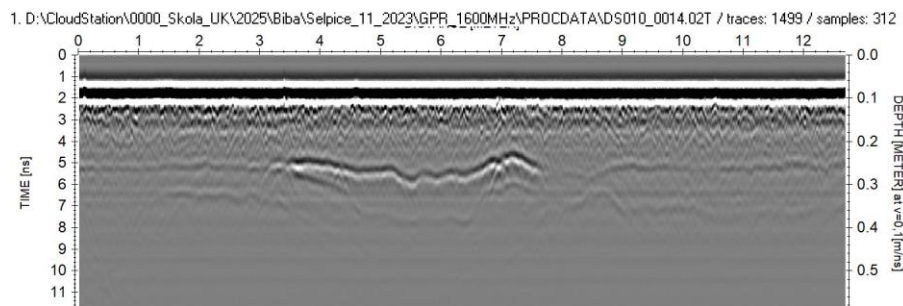


Obr. 7.3 GPR profil 0014 – zobrazený radargram bez spracovania.

Prvými krokmi pri spracovaní bolo použitie 1D filtra subtract-DC-shif (výsledok filtrácie je zobrazený na obr. 7.4) a následné aplikovanie 1D filtra subtract-mean (dewow), pri ktorom bolo časové okno (timewindows) v parametroch filtra nastavené na hodnotu 0,625 ns. Výsledok filtrácie 1D filtra subtract-mean (dewow), je zobrazený na obr. 7.5. 1D filtre subtract-DC-shif a subtract-mean (dewow) sú pre staršie radary MALA povinné.

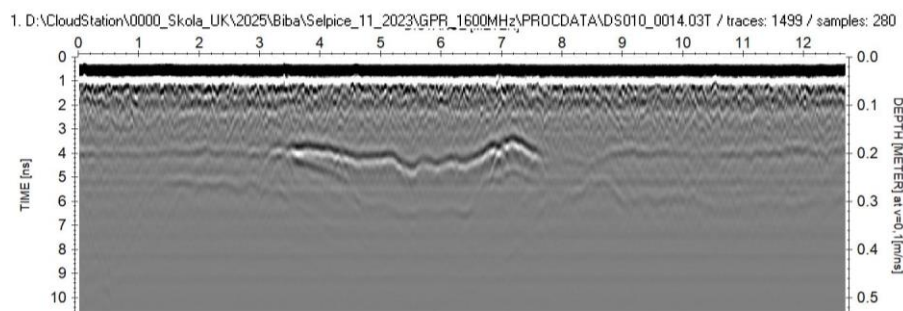


Obr. 7.4 GPR profil 0014 – zobrazený radargram po použití 1D filtra subtract-DC-shift.



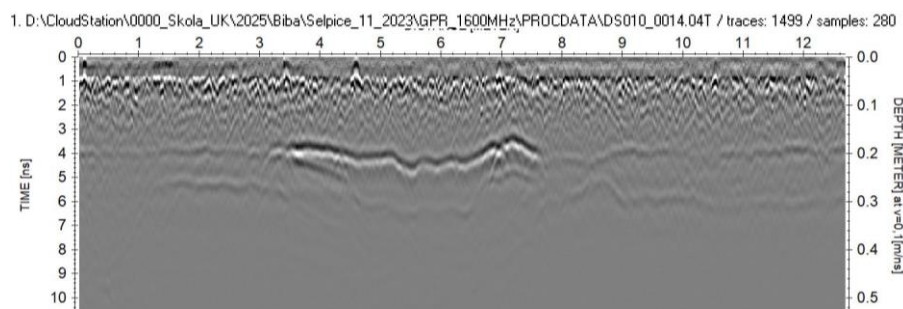
Obr. 7.5 GPR profil 0014 – zobrazený radargram po použití 1D filtra subtract-mean (dewow).

Ďalší krok spracovania pozostával z korekcie na nulový čas „move starttime“ s manuálnym nastavením hodnoty nulového času. V tomto prípade bola použitá hodnota na opravu nulového času -1,24 ns. Výsledok korekcie je na obr. 7.6.



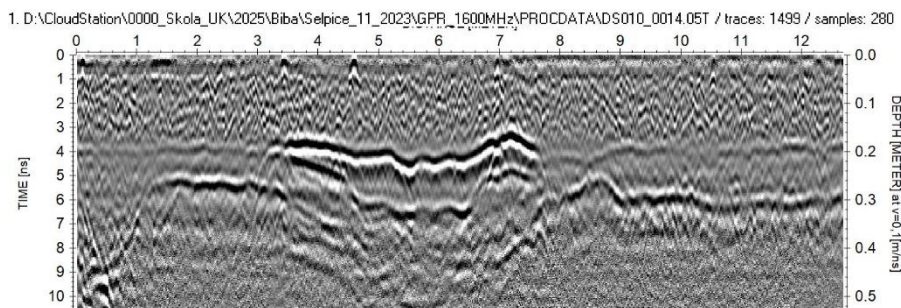
Obr. 7.6 GPR profil 0014 – zobrazený radargram po použití kroku spracovanie move starttime.

Pri georadaroch MALA je potrebné v ďalšom kroku použiť 2D filter – Background removal na potlačenie prejavu vln so silnou energiou vo vrchných vrstvách radargramu. Výsledok použitia tohto filtra je na obr. 7.7.



Obr. 7.7 GPR profil 0014 – zobrazený radargram po použití 2D filtra background removal.

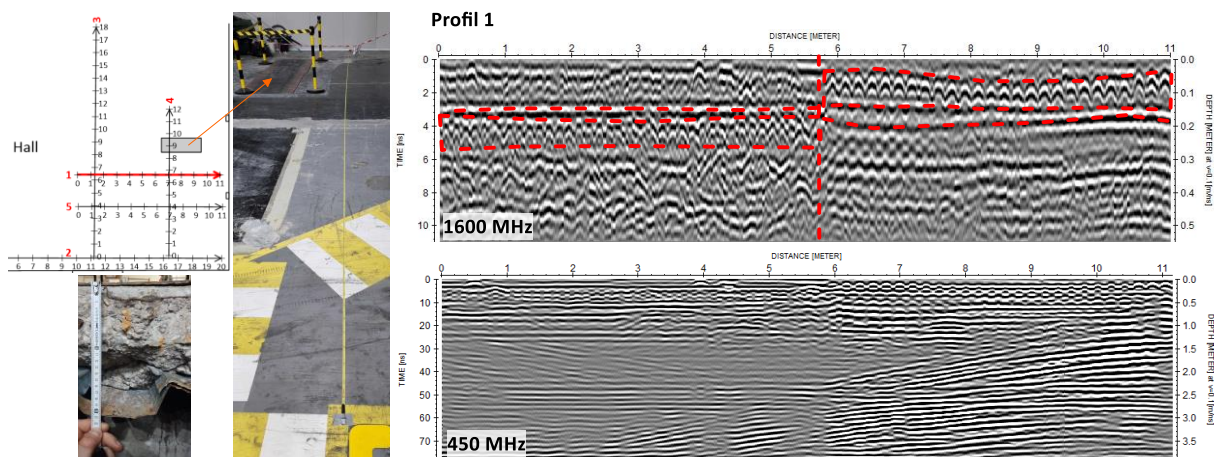
Posledný krok spracovania, v tomto prípade, bolo zosilnenie signálu (Gain). Z možností výberu programu, sa ako najvhodnejší ukázal filter „energy decay“ s nastavením parametra zosilnenia „scaling value“ na hodnotu 0,8. Výsledok použitia tohto filtra je na obr. 7.8.



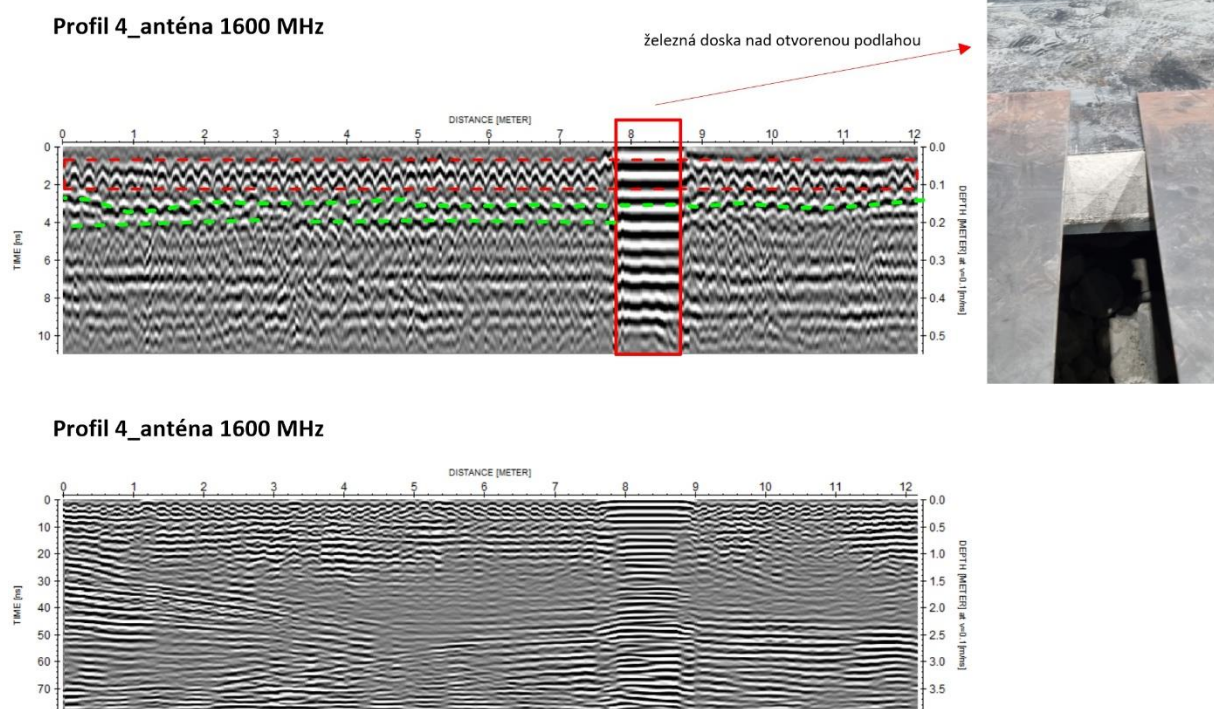
Obr. 7.8 GPR profil 0014 – zobrazený radargram po zosilnení signálu (gain - energy decay).

Nepriama detekcia dutín

V rámci ďalšieho prezentovaného príkladu, sa podzemné priestory na radargramoch neprejavili priamo. Prítomnosť trapézového plechu v podlahe nad podzemnými priestormi totiž spôsobila zvýšený útlm signálu a GPR pod týmto rozhraním žiadne iné rozhranie nezachytil. Na radargramoch sa však zreteľne prejavila prítomnosť dvoch konštrukčných typov podláh v hale, ako je vidieť na profile 1 na obr. 7.9. Profil 1 prechádza cez oba typy podláh. V prvej časti profilu (do metráže cca 5,8 m) je na radargrame zachytená roxorová výstuž prvého typu podlahy (hĺbka cca 0,18 m). Pod ňou je v hĺbke cca 0,3 m rozhranie medzi betónom a násypom. Vo vrstve pod betónom neboli zachytené žiadne heterogenity, ktoré by mohli naznačovať prítomnosť dutín. V druhej časti profilu (od metráže 5,8 m do 11 m), ktorá prechádza popri inšpekčnom otvore ponad podzemné priestory, je situácia rozdielna. V hĺbke 0,15 m až 0,21 m je na radargramoch zachytený trapézový plech druhého typu podlahy a následný útlm pod ním. Rozsah podzemných priestorov pod podlahou haly bol teda určený na základe prejavu druhého typu konštrukcie podlahy s trapézovým plechom (obr. 7.9). Oba typy podláh boli zachytené aj na radargramoch profilov 2 a 5. Profil 4 vedie priamo cez inšpekčný otvor a v celej dĺžke prechádza cez podlahu s trapézovým plechom (obr. 7.10). Na profile 3 bola prítomná iba roxorová výstuž prvého typu podlahy (obr. 7.11).

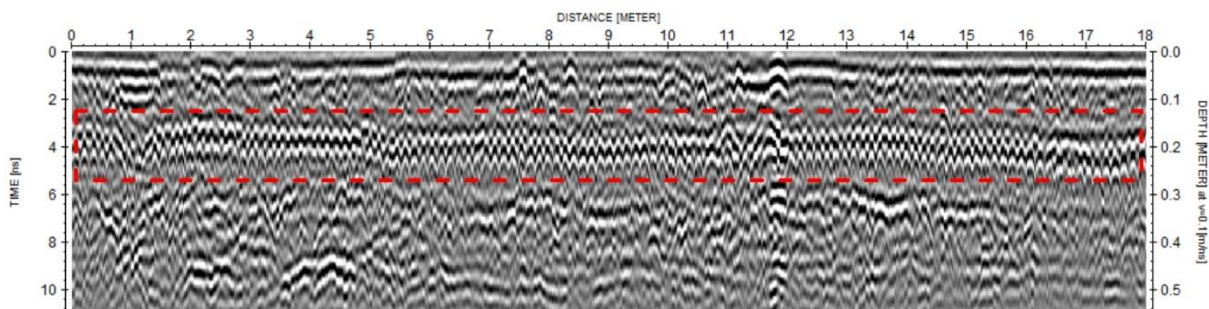


Obr. 7.9 Situácia rozloženia GPR meraní v hale s podzemnými priestormi a ukážka spracovaného radargramu na profile 1, vedeného cez oba konštrukčné typy podláh.

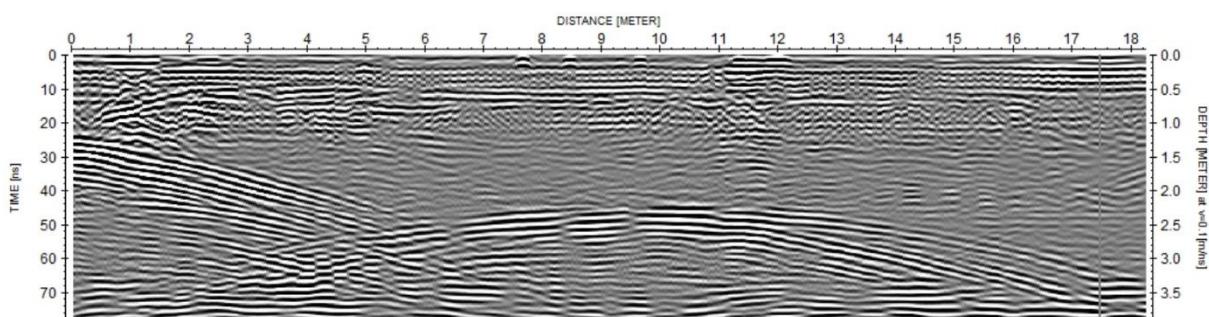


Obr. 7.10 Spracované radargramy z profilu 4, vedeného ponad podzemné priestory – zachytený prejav trapezového plechu v konštrukcii podlahy a železnej dosky nad inšpekčným otvorom do podlahy.

Profil 3_anténa 1600 MHz



Profil 3_anténa 450 MHz

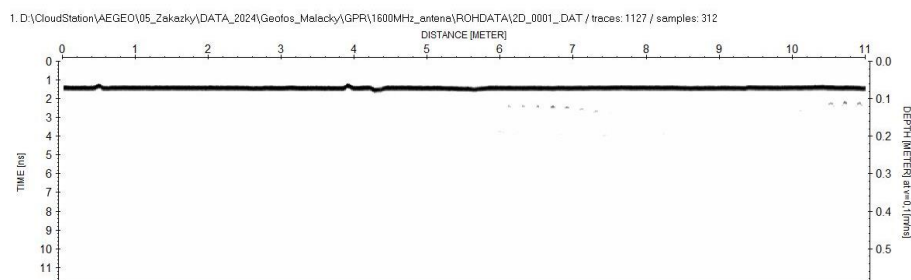


Obr. 7.11 Spacované radargramy z profilu 3 – zachytená roxorová výstuž konštrukčného typu podlahy mimo podzemných priestorov.

Ukážka spracovania GPR profilu 1

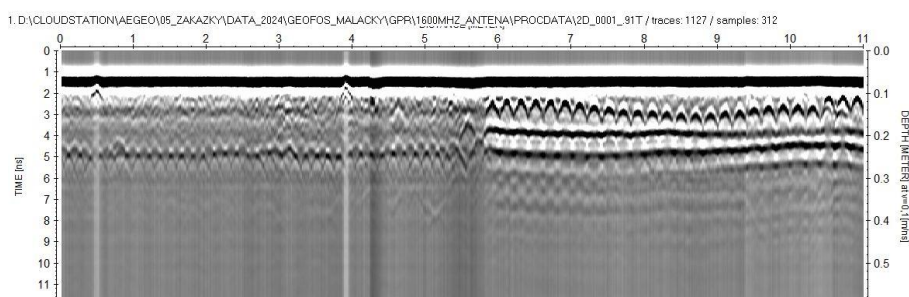
Meranie bolo realizované GPR systémom MALA CX s centrálnou frekvenciou antény 1600 MHz a spracované v programe ReflexW.

Na obr. 7.12 je zobrazenie profilu bez procesingu, tak ako bol stiahnutý z riadiacej jednotky a importovaný do programu ReflexW.

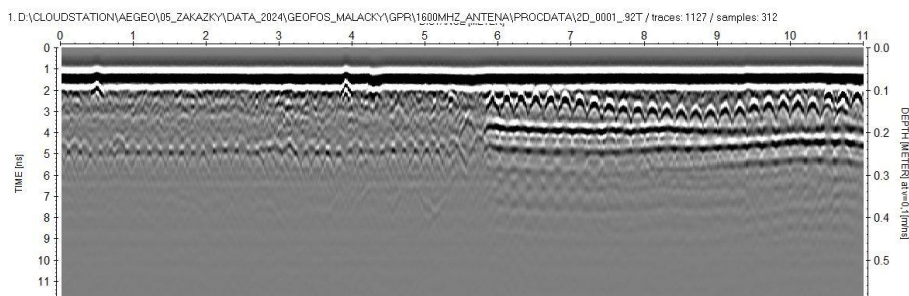


Obr. 7.12 GPR profil 1 – zobrazený radargram bez spracovanie.

Podobne ako v predchádzajúcom prípade pri spracovaní profilu GPR 0014, prvými krokmi pri spracovaní bolo opäť použitie 1D filtrov, povinné pre staršie radary MALA: filter subtract-DC-shift (výsledok filtrácie je zobrazený na obr. 7.13) a následné aplikovanie filtra subtract-mean (dewow) s nastavením časového okna (timewindows) na hodnotu 0,625 ns. Výsledok filtrácie 1D filtra subtract-mean (dewow), je zobrazený na obr. 7.14.

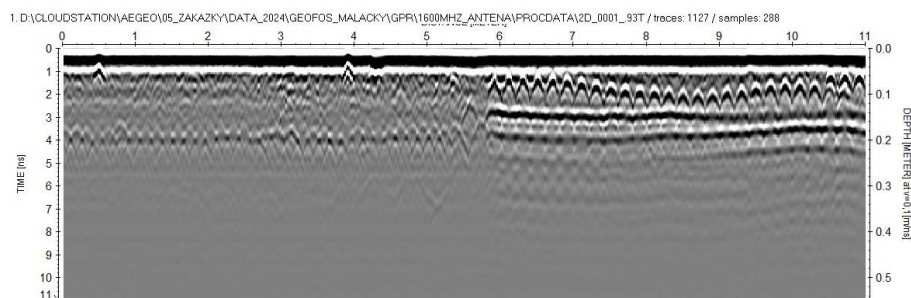


Obr. 7.13 GPR profil 1 – zobrazený radargram po použití 1D filtra subtract-DC-shift.



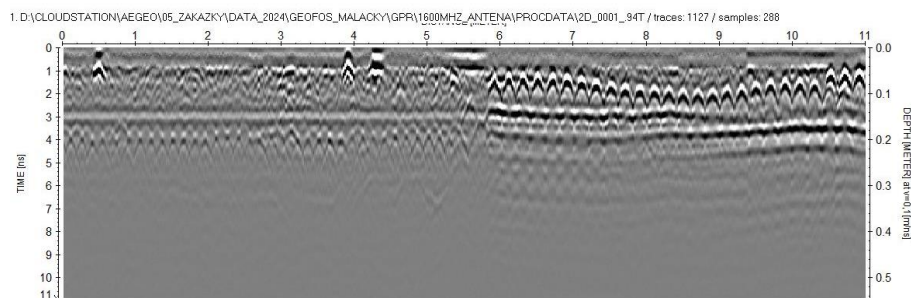
Obr. 7.14 GPR profil 1 – zobrazený radargram po použití 1D filtra subtract-mean (dewow).

Ďalší krok spracovanie pozostával z korekcie na nulový čas „move starttime“ s manuálnym nastavením hodnoty nulového času. V tomto prípade bola použitá hodnota na opravu nulového času -0,905 ns. Výsledok korekcie je na obr. 7.15.



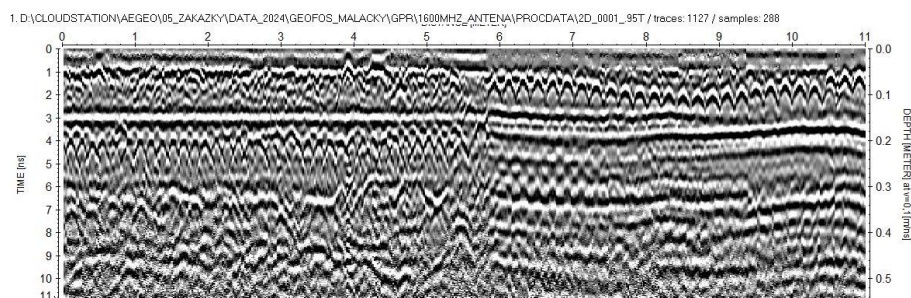
Obr. 7.15 GPR profil 1 – zobrazený radargram po použití kroku spracovanie move starttime.

V ďalšom kroku bolo potrebné použiť 2D filter – Background removal na potlačenie prejavu vln so silnou energiou vo vrchných vrstvách radargramu. Výsledok je na obr. 7.16.



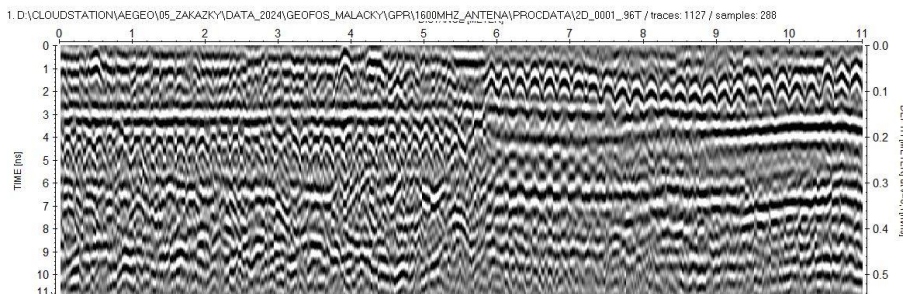
Obr. 7.16 GPR profil 1 – zobrazený radargram po použití 2D filtra background removal.

Následne bolo na záznam radargramu aplikované zosilnenie signálu (Gain), v tomto prípade použitím filtra „AGC-Gain“ s nasledujúcimi nastaveniami: „windows lenght 3, scaling value 5, max. gain 4000, max. normalize value 5000, označená možnosť normalize“. Výsledok zosilnenie je na obr. 7.17.



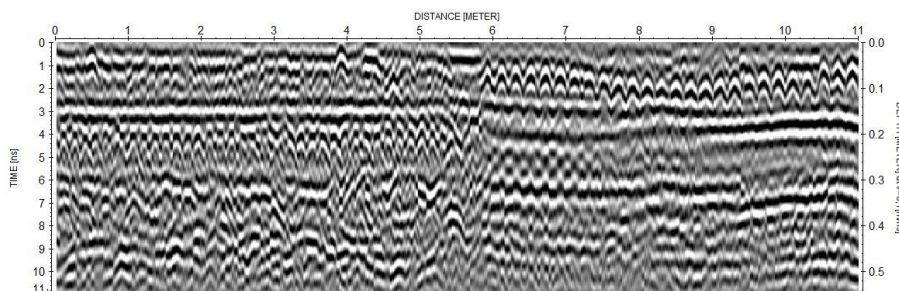
Obr. 7.17 GPR profil 1 – zobrazený radargram po zosilnení signálu (gain).

V ďalšom kroku bol použitý 1D filter bandpassbutterworth na potlačenie zosilnených šumov, s nasledovnými hodnotami nastavenia: „lower cutoff 760, upper cutoff 1800“. Výsledok použitia tohto filtra je na obr. 7.18.



Obr. 7.18 GPR profil 1 – zobrazený radargram po použití 1D filtra bandpassbutterworth.

V poslednom kroku bol aplikovaný 2D filter „running average“, ktorý funguje ako cosinusový bandpassfilter v osi y smerom po stopách. Hodnota priemerovania stôp „average traces“ bola nastavená na 3. Výsledok použitia tohto filtra a výsledný radargram je na obr. 7.19.



Obr. 7.19 GPR profil 1 – zobrazený radargram po použití 2D filtra running average.

Dratkobetón (kovové hoblíny v betónovej zmesi) – betónová podlaha v novopostavenej prevádzkovej hale

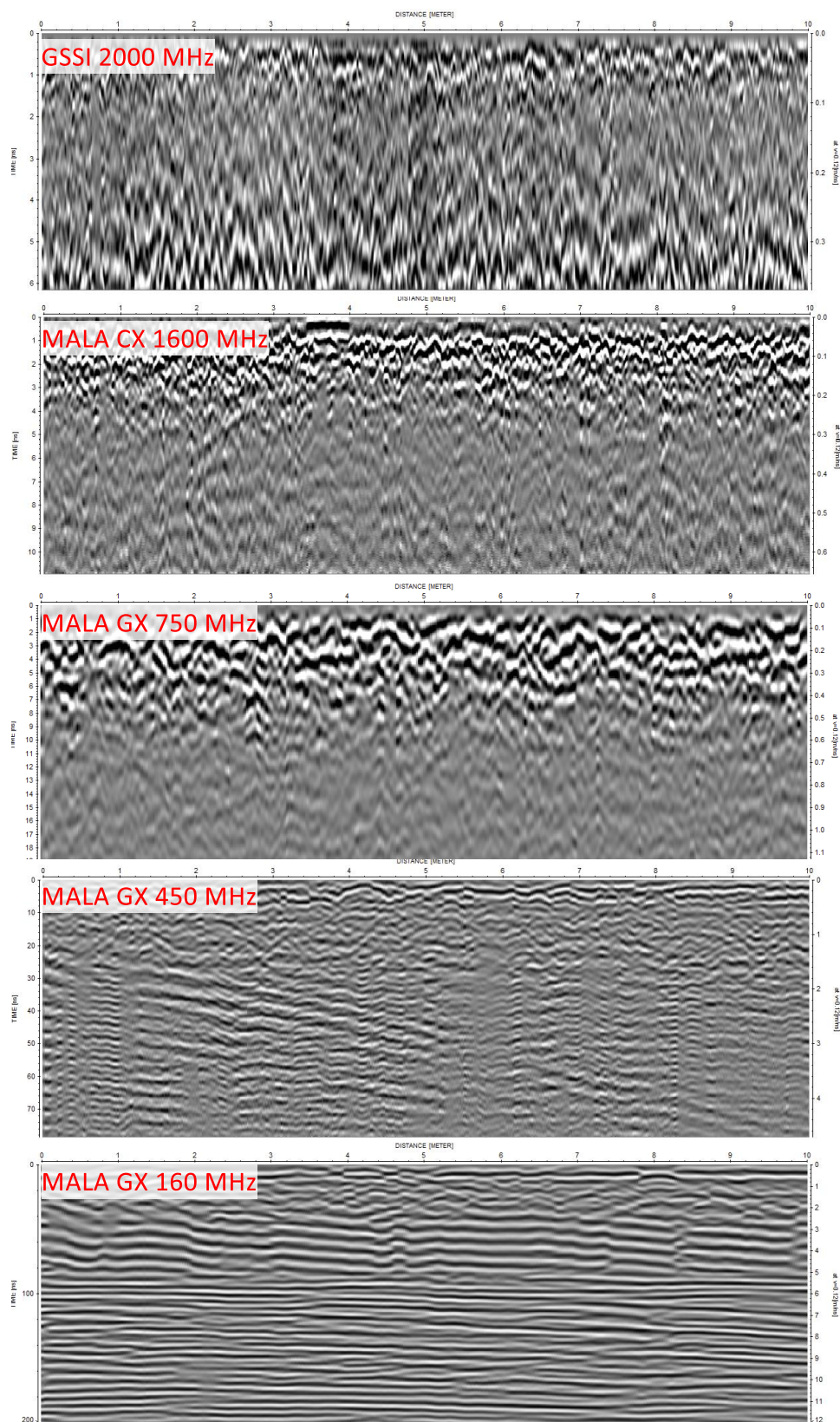
Cieľom merania georadarom v novopostavenej hale, kde sa v podlahe objavili praskliny, bolo zistiť, či sa medzi betónovou podlahou a konštrukčnými vrstvami netvorí dutiny v dôsledku nedostatočného zhutnenia podložných vrstiev. Vzhľadom

na informáciu o použití dratkobetónu pri konštrukcii podlahy, bol pred samotným georadarovým prieskumom testovaný hĺbkový dosah a rozlíšenie rôznych georadarových antén. Hĺbkový dosah a rozlíšenie meracieho systému GPR do značnej miery závisí od centrálnej frekvencie použitej antény. Kým antény s nižšou frekvenciou majú väčší hĺbkový dosah, antény s vyššími frekvenciami majú jemnejšie rozlíšenie a používajú sa na detailnejšie mapovanie.

Skúšobné merania boli realizované na 10 m profile v mieste pozorovaných trhlin, vedenom pozdĺž vrtu v betónovej podlahe. Najskôr bola na zistenie stavu podlahovej konštrukcie testovaná využiteľnosť vysokofrekvenčných antén, vzhľadom na dobré výsledky dosiahnuté v podobných prípadoch. Testovali sme systém GSSI s vysokofrekvenčnou anténou s centrálnou vysielačou frekvenciou 2 GHz a GPR systém Malá CX 12 s vysokofrekvenčnou anténou s centrálnou vysielačou frekvenciou 1,6 GHz. Ďalej boli na zobrazenie hlbších vrstiev konštrukcie a podložia použité GPR systémy Mala GroundExplorer (GX) s anténami HDR (High Dynamic Range) s frekvenciami 750 MHz, 450 MHz a 160 MHz (obr. 7.20). Spracované radargramy z merní jednotlivými anténami, sú zobrazené na obr. 7.21. Ako vidieť, z výsledkov merania nebolo možné určiť hrúbku betónu, a ani kontakt medzi betónovou podlahou a konštrukčnou vrstvou. Kovové hoblíny v betónovej zmesi totiž úplne „rozbili“ a deformovali GPR signál.



Obr. 7.20 Ukážka GPR systémov použitých pri testovacom meraní na podlahe z drátkobetónu - systém Mala GroundExplorer (GX) s anténami HDR (High Dynamic Range) s frekvenciami 750 MHz, 450 MHz a 160 MHz a systém GSSI s vysokofrekvenčnou anténou s centrálnou vysielačou frekvenciou 2 GHz.



Obr. 7.21 Ukážka spracovaných radargramov z merní na podlahe z drátkobetónu GPR systémami s anténami s rozličnou centrálnou frekvenciou - deformácia a „rozbitie“ GPR signálu kovovými hoblinami v betónovej zmesi.

Zhrnutie

Tieto prípadové štúdie sú ukážkou priamej a nepriamej detekcie dutých priestorov pod betónovým krytom v troch rôznych prostrediach. V prvom prípade sa dutina vytvorená pod betónovými panelmi parkoviska v podloží stavby prejavila na radargramoch priamo, a to zvýšenou reflektivitou rozhrania (amplitúdy reflexov dosahovali v prípade uvedeného typu dutiny výrazne vyššie hodnoty – v porovnaní s kontaktom panelov s podložnými vrstvami bez dutiny). To umožnilo detegovať jej rozšírenie priamo v teréne pri meraní. Tomuto zisteniu však predchádzalo stanovenie príčiny vzniku tejto dutiny, aby mohli byť určené miesta jej možného výskytu v celom rozľahlom areáli. Ukázalo sa, že príčinou bolo presadenie spráší pod betónovou komunikáciou. Pravdepodobnou príčinou, prečo k presadeniu spráší došlo, bolo zrejme ich prevlhčenie v dôsledku dotovania vodou z porušeného potrubia medzi jednotlivými časťami odvodňovacieho systému (odtokový žľab, retenčné nádrže, vsakovacia studňa) pri nadmernej zrážkovej činnosti v oblasti. GPR merania ukázali, že výskyt dutiny je viazaný iba na oblasti v okolí týchto odvodňovacích prvkov areálu. V druhom prípade išlo o vymapovanie rozsahu podzemných priestorov pod podlahou haly. Na rozdiel od prvého prípadu sa tieto priestory na radargramoch neprejavili priamo. Konštrukcia podlahy nad podzemnými priestormi spôsobila zvýšený útlm signálu, takže georadar nebol schopný pod podlahou tohto typu žiadne iné rozhranie zachytiť. Napriek tomu umožnilo GPR meranie delimitovať rozsah podzemných priestorov, práve vďaka špecifickému prejavu konštrukcie podlahy nad nimi. V treťom prípade bol pri konštrukcii podlahy použitý dratkobetón. Fyzikálne vlastnosti tohto druhu betónu, znemožnili analyzovať získané výsledky z merania georadaru.

Či už na radargramoch vidíme dutiny priamo, alebo ich indikujeme vďaka špecifickým podmienkam, na ktoré sú viazané, prezentované príklady ukazujú, že k problematike detekcie dutín využitím GPR meraní treba pristupovať ako ku komplexnej úlohe, aby priniesla požadované informácie.

7.2 Aplikácia georadaru na zistenie prítomnosti dutín väčších dutín (krypt, pivníc)

Použitie georadaru pri detekcii a vymedzení dutín väčších rozmerov (zvyčajne s objemom niekoľko jednotiek až desiatok m³) v rámci archeologických, historických, geotechnických a environmentálnych prieskumov dosahuje zvyčajne veľmi dobré výsledky. V prípade uvedeného typu dutín (krypty, väčšie hroby, chodby, pivnice, nádrže, tunely) je vo väčšine prípadov ich vnútorný priestor vyplnený vzduchom, čo zabezpečuje výrazný kontrast v hodnotách elektrickej permitivity uvedených prostredí (pôda/hornina vs vzduch). Horný okraj uvedených dutín býva často v relatívnej malej hĺbke – cca do 2 metrov, čo významne uľahčuje interpretáciu získaných radargramov – hlavne pri určení ich horného okraja. Určenie hĺbky spodného okraja však vôbec nie je triviálne. Táto problematika bola spomenutá už v podkapitole 6.1.4 a detailnejšie ju rozoberieme v aj v záverečnej časti tejto prípadovej štúdie.

Detekcia krypty v kostole sv. Kataríny v Banskej Štiavnici

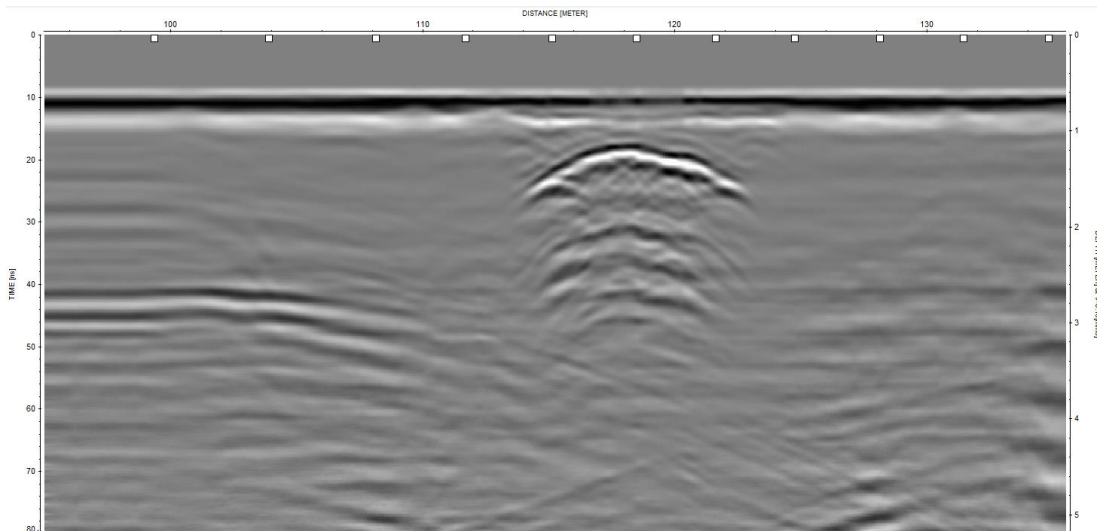
Táto prípadová štúdia uvádza spracovanie a interpretáciu georadarového záznamu, ktorý bol získaný v rámci Kurzu s geofyzikálnymi aparatúrami v roku 2006. Počas uvedeného kurzu bol realizovaný aj georadarový a mikrogravimetrický prieskum kostola sv. Kataríny v Banskej Štiavnici. Obe metódy reagovali kladne na niekoľko miest v interiéri kostola, pričom najvýraznejšou anomálnou oblasťou bol priestor v strede kostolnej lode, priamo pred oltárom.

Na realizáciu georadarových meraní bol použitý prístroj GSSI s riadiacou jednotkou SIR-3000 a 400 MHz anténou. Merania boli uskutočnené v lokálnom súradnicovom systéme (vytýčenom pomocou meracích pásiem), pričom sa meralo v smere osi X (metráž od X=95 m po X=105 m). Samotné georadarové merania prebiehali v časovom móde (time mode) a na zaznačenie presnej polohy antény pozdĺž profilu bol použitý marker.

Do tohto učebného textu sme vybrali názorné spracovanie a interpretáciu získaných georadarových údajov pozdĺž vybraného profilu s číslom 007 (krypta bolo zaznamenaná na viacerých profiloch, profil 007 bol vybraný ako reprezentatívny profil s typickým prejavom krypty).

Ukážka spracovania profilu 007

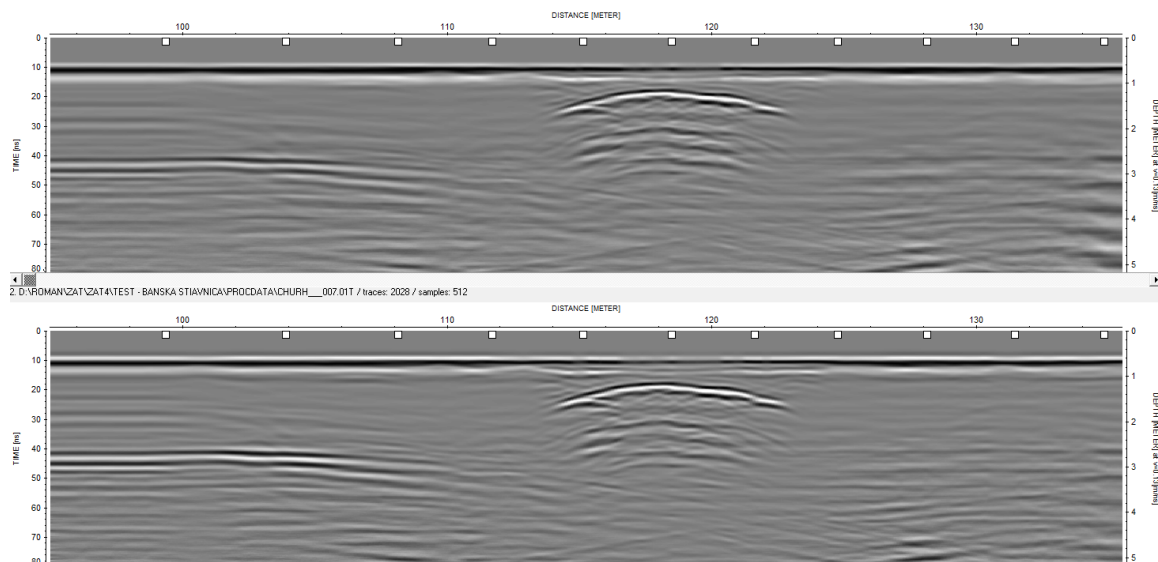
Na obr. 7.22 je zobrazený radagram so „surovými“ (nespracovanými) údajmi zo súboru vo formáte DZT (formát Radan) v programe ReflexW.



Obr. 7.22 „Surové“ (nespracované) georadarové údaje pozdĺž vybraného profilu 007.

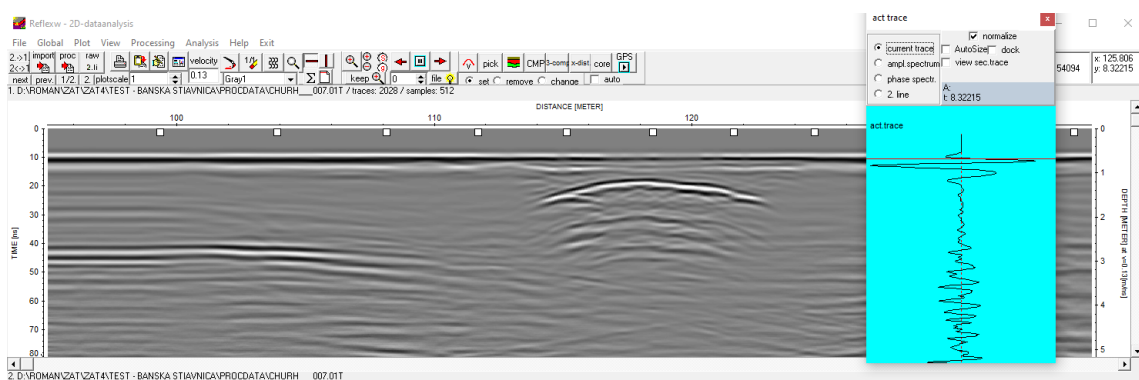
Ako je dobre vidieť na obr. 7.22, detegovaná krypta sa prejavila už na „surových“ dátach a to výrazným reflexom od jej horného okraja, prejav spodného okraja je trochu slabší (v tomto zobrazení má nižšie amplitúdy) a má komplexnejší charakter (ako by bol znásobený). Okrem charakteristických prejavov prítomnej krypty je vo vrchnej časti radargramu, v čase (TWT) cca 9 ns , výrazný súvislý reflex zodpovedajúci odrazu od povrchu dlažby kostola.

Prvým spracovateľským krokom v programe ReflexW bola 1D filtrácia „dewow“ (tzv. subtract-mean) (obr. 7.23), ktorá však nepriniesla viditeľné zmeny v spracovanom reze (obr. 7.23, spodná časť). Napriek tomu je vhodné ju zakaždým realizovať pri údajoch zo systémov GSSI.



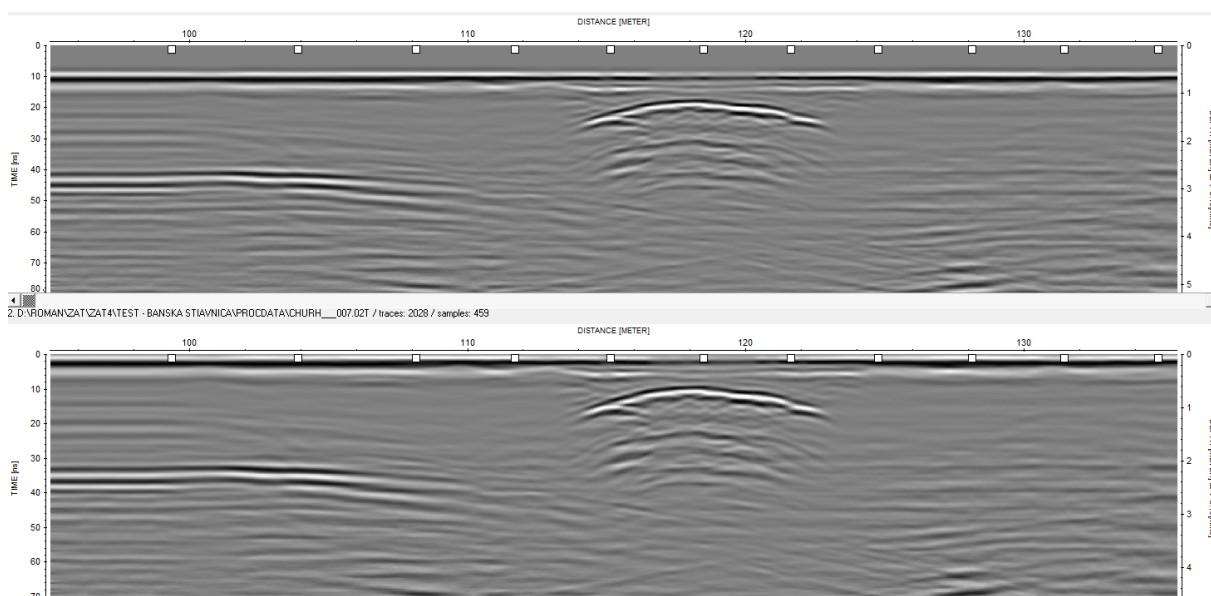
Obr. 7.23 Výsledok aplikácie 1D filtra dewow v programe ReflexW, profil 007 (vrchná časť obrázka: pôvodné údaje, spodná časť obrázka: filtrované údaje).

Druhým spracovateľským krokom bola oprava o nulový čas (time-zero correction), ktorá odstraňuje „hluchý“ pás na radargrame pre časy TWT od 0 po cca 9 ns. Pred týmto krokom bolo potrebné presne určiť hodnotu nulového času. Program ReflexW na to ponúka nástroj „WiggleWindow“ (v menu 2D-dataanalysis, položka View -> WiggleWindow) (obr. 7.24), ktorý v malom okne ukazuje priebeh záznamu na vybranej stope pozdĺž radargramu (pri pohybe myšou). V tomto konkrétnom prípade bol určený nulový čas s hodnotou 8,3 ns.



Obr. 7.24 Použitie nástroja „WiggleWindow“ pri určení nulového času v programe ReflexW, profil 007.

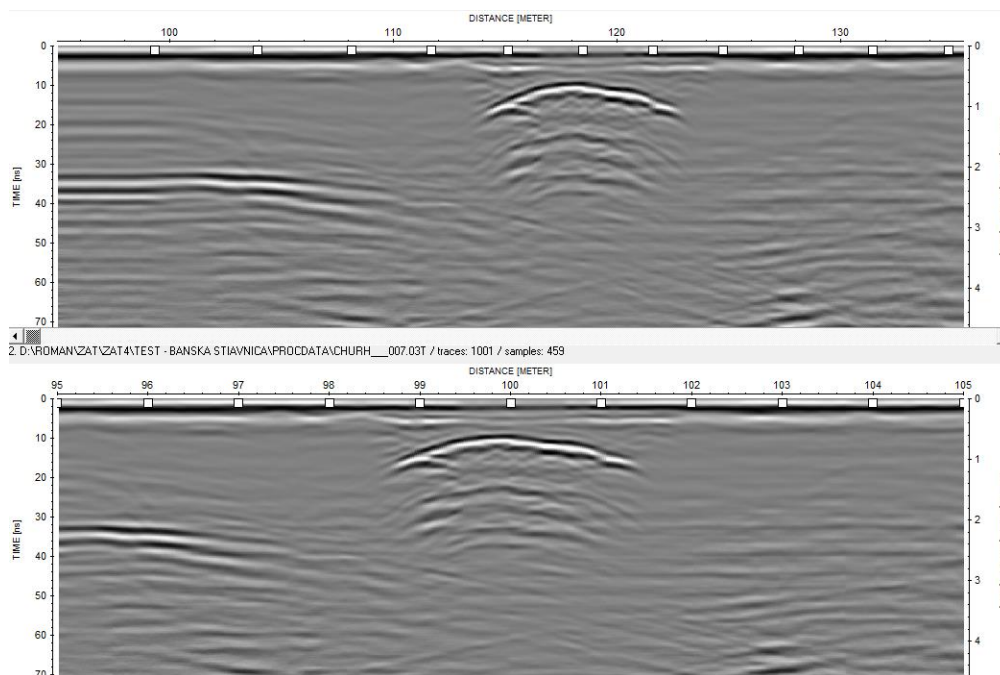
Získaná hodnota nulového času bola potom odpočítaná zo záznamu v samotnom kroku samotnej opravy o nulový čas. V položke Processing StaticCorrection/muting -> move starttime je treba zvoliť možnosť manual input a zadať danú hodnotu -8.3. Výsledok uvedenej opravy o nulový čas je vidieť v spodnej časti obr. 7.25. Hneď na prvý pohľad je zrejmé, že zmizol „hluchý“ pás v hornej časti radargramu a radargram začína v jeho hornej časti silným reflexom od povrchu dlažby kostola.



Obr. 7.25 Výsledok aplikácie opravy o nulový čas v programe ReflexW, profil 007 (vrchná časť obrázka: pôvodné údaje, spodná časť obrázka: opravené údaje).

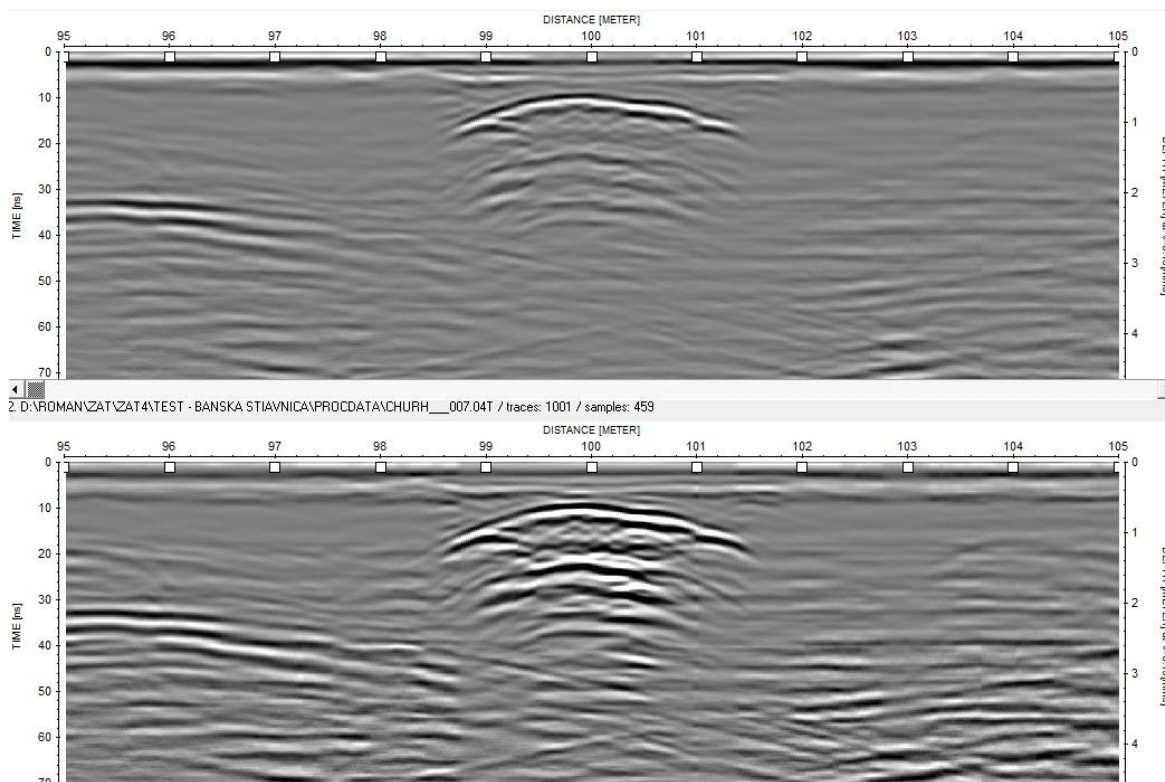
Ďalším spracovateľským krokom bola interpolácia zaznamenaných stôp a priradenie skutočných X-ových súradníc ku spracovávanému radargramu – pomocou položky markerinterpolation v menu Processing -> Trace Interpolation/Resorting. Pri spustení tohto spracovateľského kroku treba zadať traceincement v metroch (často sa zadáva malé číslo – napr. 0.02 m alebo 0.01 m) a markerincrement, ktorý bol použitý v teréne pri zbere údajov (najčastejšie 1 m). Okrem toho treba vpravo zapnúť možnosť read marker, čím sa načítajú informácie o polohách jednotlivých značiek markera, ktoré sú zaznamenané vo vstupnom súbore DZT. Výsledok uvedenej interpolácie je vidieť na (obr. 7.26) – v jeho spodnej časti. Značky pre polohy markerov (biele štorčeky) sú teraz pravidelne rozmiestnené pozdĺž radargramu (v jeho hornej časti) a začínajú na súradnici X = 95 m a končia na súradnici

X = 105 m (tieto údaje o rozsahu lokálnych súradníc sa zadávali do programu úplne na začiatku, pri importe vstupných DZT súborov). Poloha prejavu dutiny sa teraz nachádza približne v strede radargramu (obr. 7.26, spodná časť) – približne od súradnice X = 98,6 m po súradnicu X = 101,4 m.



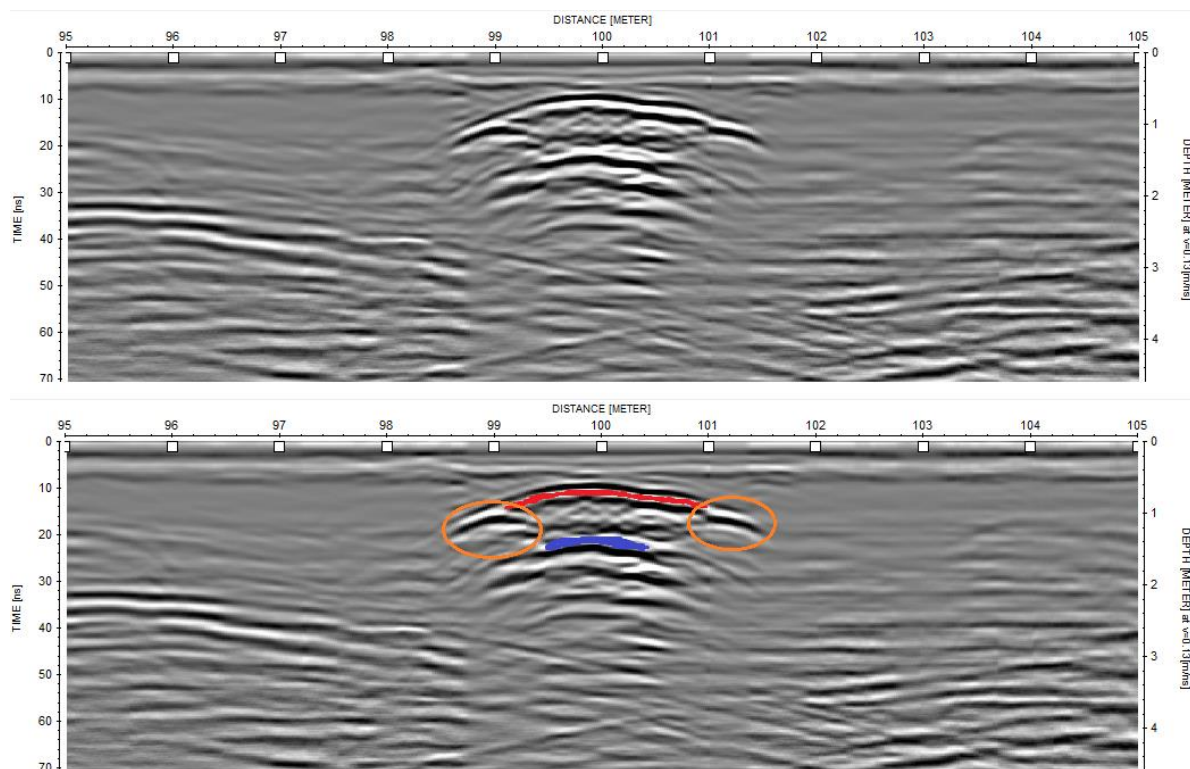
Obr. 7.26 Prepočet na skutočné x-ové súradnice pomocou marker-interpolation v programe ReflexW, profil 007 (vrchná časť obrázka: pôvodné údaje, spodná časť obrázka: interpolované údaje).

Veľmi dôležitým krokom je zosilnenie amplitúd (tzv. gain). Ako už bolo uvedené v hlavnej časti skrípt, amplitúdy reflexov, prichádzajúcich pre väčšie časy TWT sú vždy oslabené, nakoľko EM vlnenie stráca energiu, keď preniká do väčších hĺbok. Často však potrebujeme informáciu z radagramov aj pre tieto vyššie hodnoty TWT – a tak vykonávame túto uvedenú dôležitú úpravu radargramu = zosilňujeme reflexné amplitúdy pre vyššie hodnoty TWT. V uvedenom príklade z kostola sv. Kataríny bola použitá metóda energy decay so škálovacím faktorom (scale) 0.8. Ako je vidieť na radargrame (obr. 7.27, spodná časť), amplitúdy reflexov v spodnej časti rezu sú po aplikovaní zosilnenia omnoho výraznejšie.



Obr. 7.27 Realizácia zosilnenia amplitúd (gain) pomocou metódy energy decay v programe ReflexW, profil 007 (vrchná časť obrázka: pôvodné údaje, spodná časť obrázka: interpolované údaje).

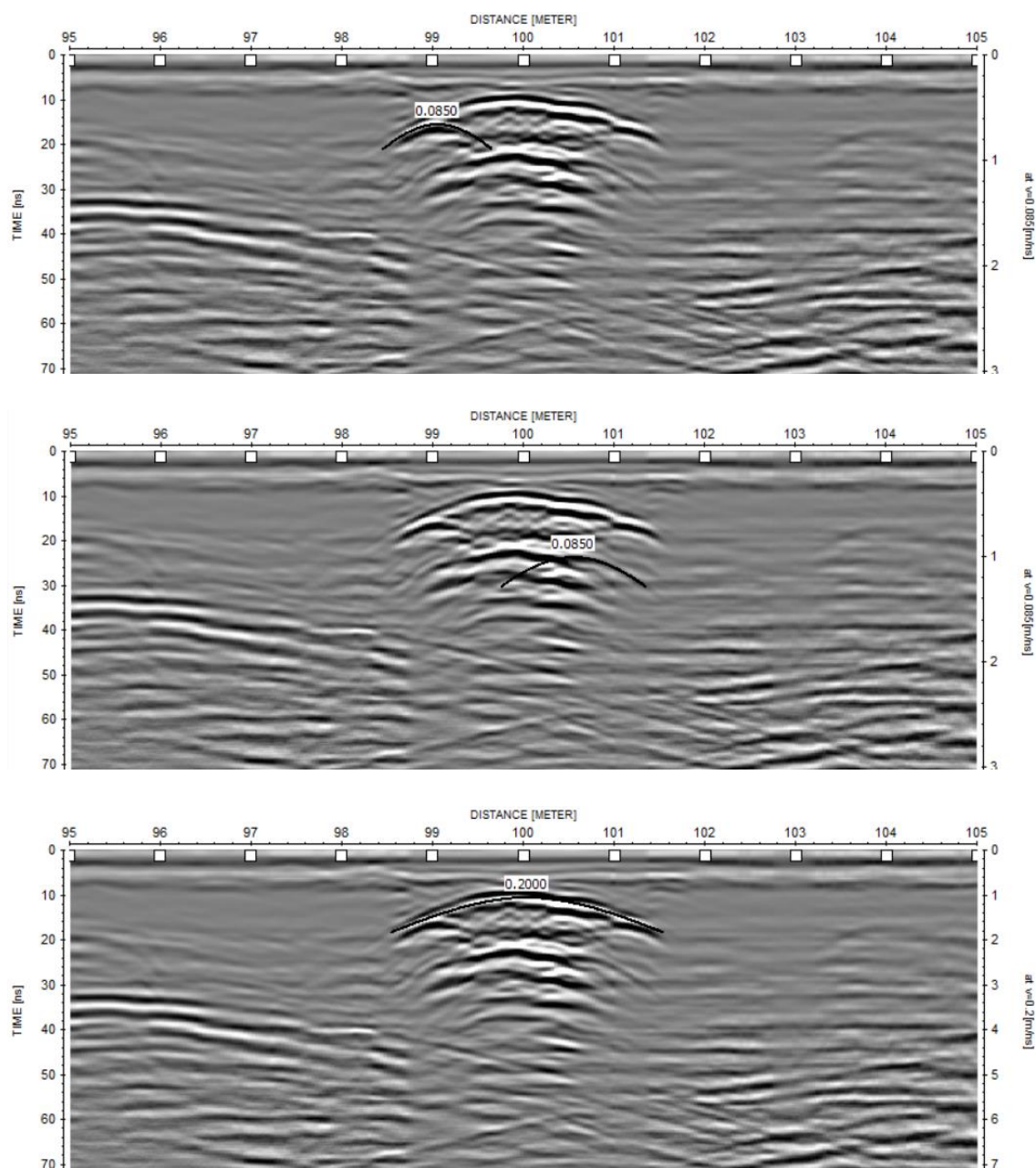
Takto spracovaný radargram (obr. 7.27, spodná časť) nám môže poslúžiť ako materiál pre predbežnú interpretáciu detegovaného objektu. Najviac dominantnou črtou v získanom reze je silný reflex oblúkového tvaru od vrchného okraja krypty (obr. 7.28, spodná časť, červená farba). To, že ide skutočne o tvar klenby a nie o difragovanú vlnu si vysvetlíme o chvíľku. Spodný okraj krypty sa prejavuje taktiež silným reflexom, ktorý je však v horizontálnom smere kratší – v porovnaní s reflexom od horného okraju dutiny (obr. 7.28, spodná časť, modrá farba). Je veľmi zaujímavé, že má taktiež oblúkový charakter – táto skutočnosť je spôsobená deformáciou v časovom reze – tvar horného okraju dutiny sa vždy prenáša aj na spodný (keby bol horný okraj rovinný, tak aj spodný bude rovinný). Okrem toho je reflex od spodného okraja dutiny znásobený (sú tam 2 reflexy tesne za sebou). Uvedenú skutočnosť vysvetľujú niektorí autori tým, že pri spodnom okraji dutiny sa vlnenie odrazí okrem spodnej hrany aj od vertikálnej steny dutiny (tento odraz je v čase trochu omeškaný). Na okrajoch horného okraju dutiny (obr. 7.28, spodná časť, oranžové elipsy) vznikajú slabšie difragované vlny, podobne aj na okrajoch spodnej hrany dutiny (tieto sú však menej výrazné).



Obr. 7.28 Predbežná interpretácia spracovaného radargramu, profil 007 (vrchná časť obrázka: spracované údaje, spodná časť obrázka: spracované údaje s interpretáciou).

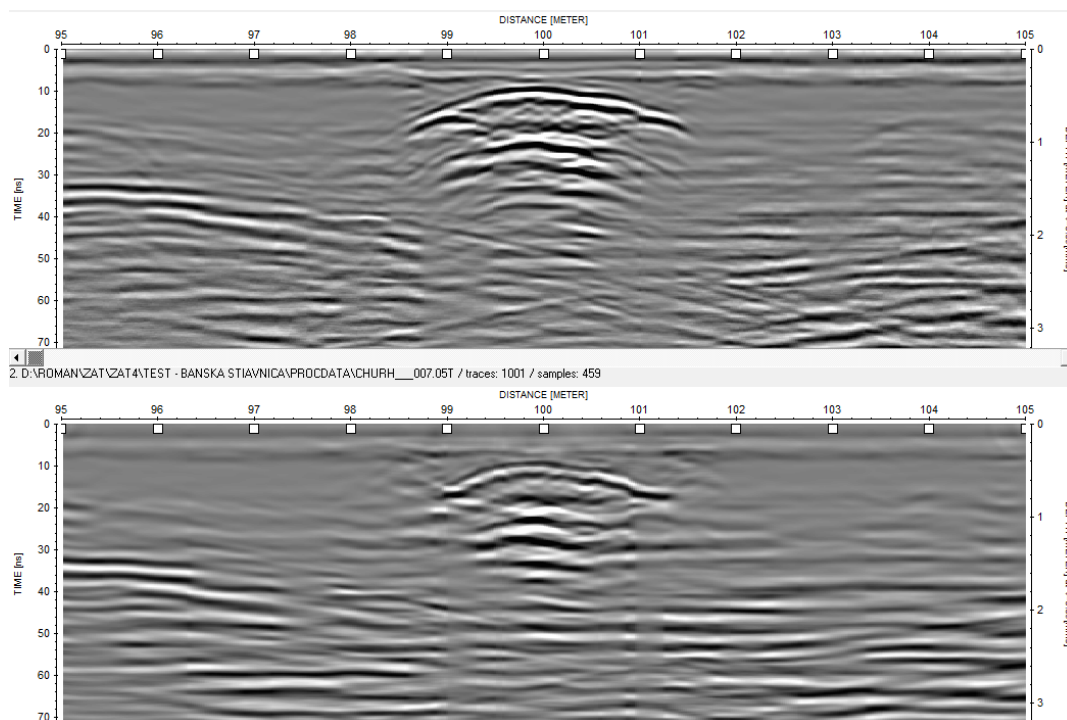
Tieto slabé difragované vlny (obr. 7.28, spodná časť, oranžové elipsy), spolu s podobnými (ešte slabšími) na okrajoch spodného okraju dutiny nám môžu poslúžiť pri analýze rýchlosti EM vlnenia v tomto radargrame. Využijeme na to nástroj programu ReflexW (v menu Analysis -> Velocity adaptation), pri ktorom vieme zmenou rýchlosti napasovať syntetickú hyperbolu čiernej farby na vybranú difragovanú vlnu v radargrame. V našom prípade najlepšie výsledky poskytovala rýchlosť 0,085 m/ns (obr. 7.29, vrchná a stredná časť). Zistená rýchlosť bola potom neskôr použitá pri migrácii a prepočte časového rezu na hĺbkový.

Predstavujeme tu aj chybnú interpretáciu reflexu od horného okraju krypty (obr. 7.29, spodná časť). Uvedený reflex skutočne pripomína svojim tvarom mohutnú difragovanú vlnu, ide však o odraz od klenby krypty - hodnota rýchlosti odhadnutá pomocou syntetickej hyperboly 0,2 m/ns je nerealisticky vysoká.



Obr. 7.29 Výsledky rýchlostnej analýzy v programe ReflexW (profil 007), na vrchnom a strednom obrázku sú vybrané slabšie difragované vlny, na spodnom obrázku je chybné napasovaná teoretická hyperbola na reflex od vrchného okraja krypty.

Posledným spracovateľským krokom bola migrácia časového rezu pomocou metódy diffraction stack, s použitím odhadnutej rýchlosti 0,085 m/ns. Tento krok opravuje tvary detegovaných rozhraní a potláča prejavy difragovaných vln, čo je pekne vidieť v spodnej časti obr. 7.30.



Obr. 7.30 Realizácia migrácie pomocou metódy diffraction stack v programe ReflexW, profil 007 (vrchná časť obrázka: pôvodné údaje, spodná časť obrázka: migrované údaje). Spodná časť obrázku predstavuje konečný výstup celého spracovateľského postupu.

Uvedený migrovaný radargram na obr. 7.30 (spodná časť) je konečným výstupom celkového spracovania a v prípade tejto štúdie je najlepším materiálom pre finálnu interpretáciu. Difrakované vlny na okrajoch hornej klenby krypty boli odstránené a jej horizontálny rozmer (šírka) dosahuje teraz cca 2 m (od $X = 99$ m po $X = 101$ m). Z hľadiska časovej osi (TWT) je možné najvyššiu polohu vrcholu klenby identifikovať pre hodnotu cca 8 ns, to znamená, že sa môže nachádzať v hĺbke cca 0,34 m ($0,085 \cdot 8 / 2 = 0,34$ m). Zaujímavý je odhad hĺbky spodného okraja krypty, ktorý sa prejavuje silným reflexom na úrovni cca 18 ns. Pri použitej rýchlosti 0,085 m/ns by táto hodnota zodpovedala hĺbke cca 77 cm (ako to aj je vidieť na hĺbkovej osi výsledného radargramu). Takáto interpretácia je však nesprávna, nakoľko EM vlnenie vnútri krypty prechádza vzduchom a tam má podstatne vyššiu rýchlosť šírenia (podľa teórie EM vln až cca 0,3 m/ns). Z uvedeného vyplýva, že za tých 10 ns (časový rozdiel medzi reflexami od horného a spodného okraja krypty) prejde vlnenie cca 1,5 m ($0,3 \cdot 10 / 2 = 1,5$ m). To znamená, že výška krypty je cca 1,5 m a interpretované dno krypty je v hĺbke cca 1,84 m ($0,34$ m + 1,5 m). Problematika riešenia obdobných situácií bola popísaná už aj v podkap. 6.1.4 (obr. 6.10).

Na úrovni cca 30 ns TWT sa nachádza ešte jeden silný reflex – ten ale interpretujeme ako násobný odraz v rámci dutiny alebo medzi jej horným okrajom a povrchom (ďalších cca 10 ns TWT navyše).

7.3 Aplikácia georadaru na zistenie prítomnosti zvyškov múrov v rámci nedeštruktívneho archeologického prieskumu

Aplikácia georadaru pri detekcii zvyškov múrov v podloží (základy zaniknutých historických stavieb) býva vo väčšine prípadov úspešná. Výsledok však veľmi záleží od kontrastu elektrických vlastností (najmä elektrická permitivita a vodivosť) medzi zvyškami múrov a okolitým pôdnym alebo horninovým prostredím. Ak sa v blízkosti zvyškov múrov nachádzajú bežné pôdy, situácia je výhodná; ak sa však v ich tesnej blízkosti nachádza suť (z rozpadnutých múrov), tak situácia môže byť zložitejšia.

Pri uvedenom druhu prieskumov je výhodné realizovať plošné georadarové merania, aby mohlo vyniknúť rozloženie a rozsah zvyškov múrov, prípadne ich architektúra. Plošné georadarové merania je možné uskutočňovať viacerými spôsobmi. V uvedenom príklade boli merania realizované v sieti paralelných profilov (spôsobom tzv. „meandring“ alebo „zig-zag“, čo znamená, že profily boli merané raz jedným smerom a naspäť druhým smerom). Spracovanie tohto typu prieskumu označujeme ako 3D prieskum, nakoľko vo výsledku vieme skonštruovať horizontálne amplitúdové rezy pre rôzne hĺbky prieniku georadarového vlnenia a tak vieme získať trojrozmernú interpretáciu skúmaného priestoru.

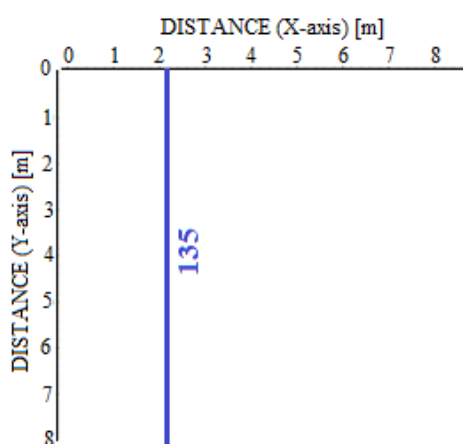
Detekcia zvyškov múrov bývalej kaplnky na lokalite Katarínka pri Dechticiach

Ako príklad uvádzame spracovanie a interpretáciu georadarového záznamu, ktorý bol získaný v rámci Letnej geofyzikálnej školy v spolupráci s kolegami z Christian-Albrechts Univerzity v nemeckom meste Kiel v roku 2012. Počas uvedenej letnej školy bol realizovaný geofyzikálny prieskum na lokalite Katarínka pri Dechticiach, kde sa nachádzajú ruiny bývalého františkánskeho kostola a kláštora. Z historických záznamov sa zachovali informácie o tom, že v rámci tohto sakrálneho areálu bolo rozmiestnených aj niekoľko kaplniek – dnes už neexistujúcich. Aplikáciou magnetometrickej metódy boli vytypované viaceré menšie plochy pre plošný georadarový prieskum a táto štúdia popisuje výsledky spracovania GPR prieskumu na jednej takejto ploche.

Preskúmaná plocha mala rozmery 8,7 m (X-ový smer) krát 8,0 m (Y-ový smer) (obr. 7.31). Profily boli merané v smere osi Y (systémom „meandring“) pomocou aparatury GSSI SIR-3000 so 400 MHz anténou. Vzdialenosť medzi meranými profilmi bola 0,3 m a označenie polôh antény pozdĺž meraných profilov bolo realizovaný

formou markeru, stláčaného každý 1 m pozdĺž pomocného meracieho pásma. Spolu bolo takto premeraných 29 profilov (č. 128 až 157). Získané údaje (súbory typu DZT) boli následne spracované v programe ReflexW – najprv ako 2D údaje (jednotlivé radargramy pozdĺž meraných profilov) a potom spolu ako 3D údaje (údaje boli z 2D radargramov interpolované do horizontálnych amplitúdových rezov). Jednotlivé 2D spracovateľské kroky boli aplikované najprv na jednom vybranom reze a potom naraz na všetky ostatné rezy.

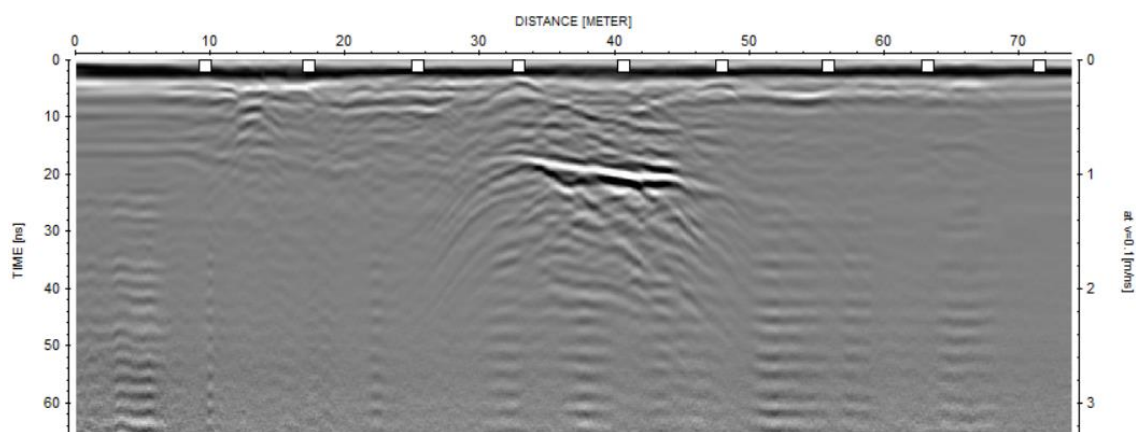
Ako typický 2D radargram pre toto prvé spracovanie bol zvolený profil č. 135 (pre $X = 2,1$ m), ktorý zachytil vo svojej centrálnej časti prejav zvyšku múru s typickým reflexom od jeho horného okraju (obr. 7.32). Mierne upadanie (poklesávanie) uvedeného reflex smerom nadol (zľava doprava) je spôsobený vplyvom topografie terénu, ktorá v tejto časti lokality mierne klesá.



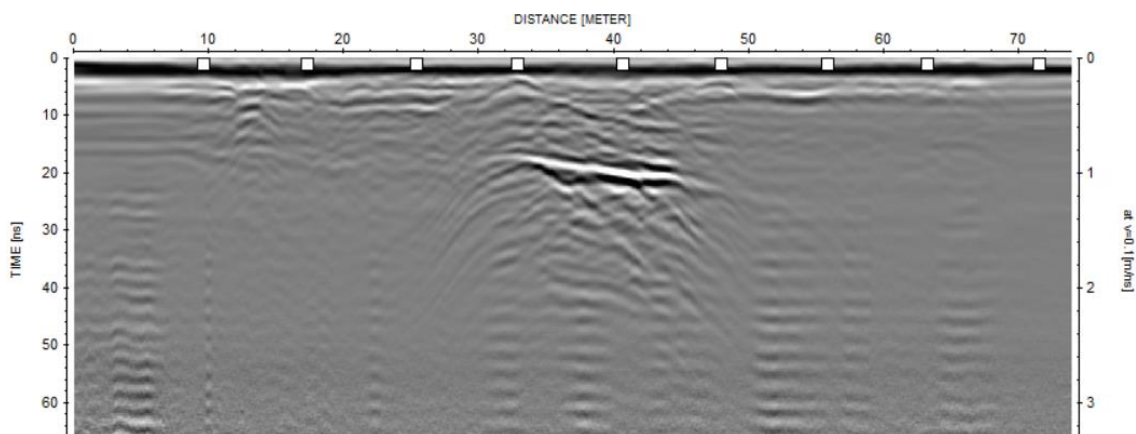
Obr. 7.31 Poloha profilu č. 135 v rámci premeranej plochy, lokalita Katarínka pri Dechticiach.

Ukážka spracovania profilu č.135 a 3D zobrazenia spracovaných dát

Na obrázku obr. 7.32 je zobrazený radargram po oprave o nulový čas (s hodnotou -13,1 ns). Ďalej bol aplikovaný 1D filter dewow, ktorý nepriniesol výrazné zmeny v obraze (obr. 7.33).

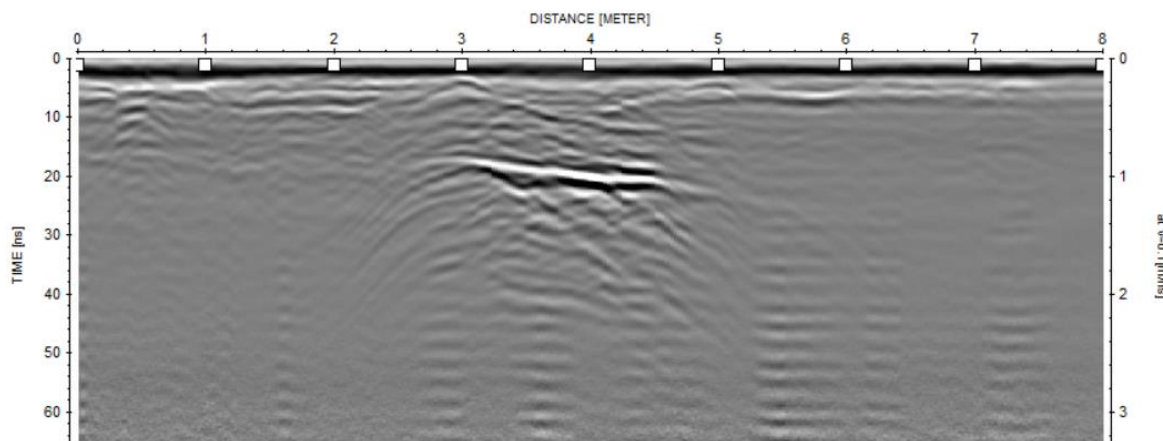


Obr. 7.32 Radargram pozdĺž profilu č. 135 s aplikovaním odstránenia nulového času.

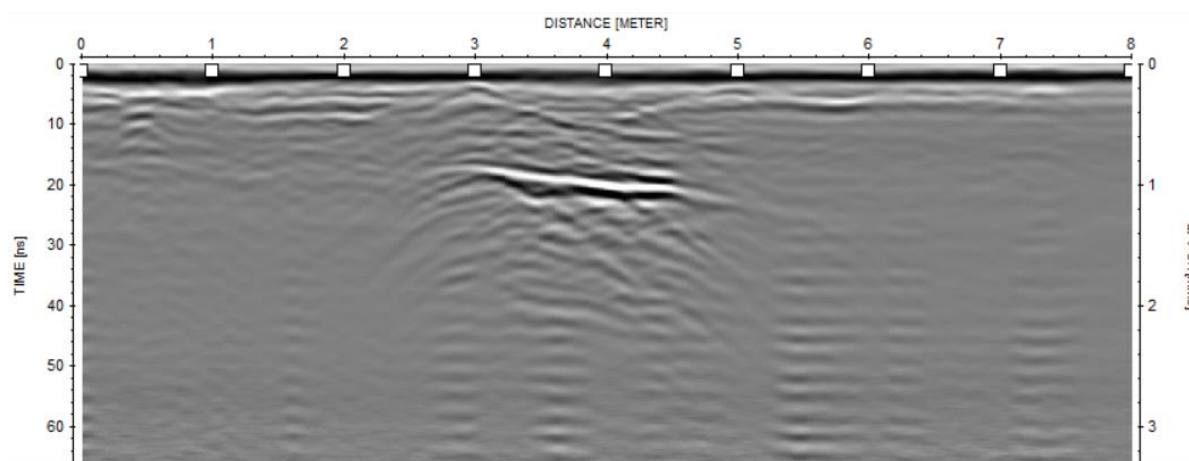


Obr. 7.33 Radargram pozdĺž profilu č.135 s aplikovaním 1D filtra dewow.

Nasledujúcim krokom bola interpolácia a prepočet na reálne horizontálne súradnice pomocou funkcie marker-interpolation. Ako je vidieť na obr. 7.34, horizontálna os teraz poskytuje reálne hodnoty súradnice Y pozdĺž profilu (od 0 po 8 m). Ďalším krokom bolo potlačenie šumu v nameraných údajoch pomocou 2D filtra running average, pri ktorom bolo spriemerovaných 5 vedľa seba ležiace stôp (obr. 7.35).

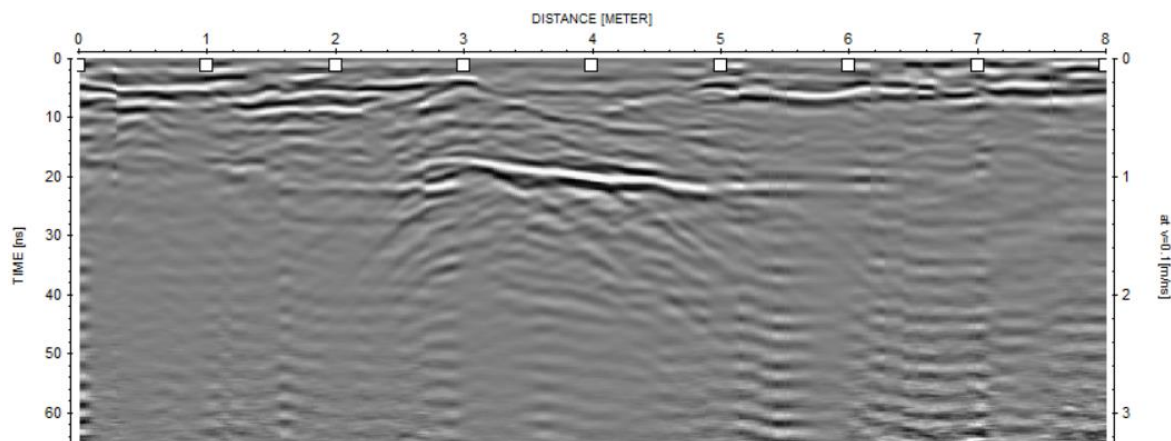


Obr. 7.34 Prepočet na skutočné horizontálne súradnice pomocou marker-interpolation.



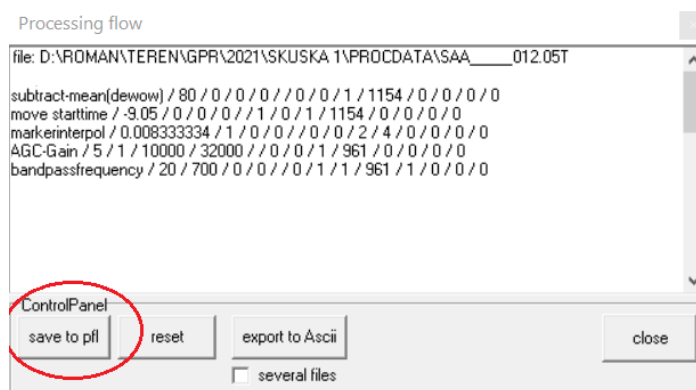
Obr. 7.35 Potlačenie šumu pomocou 2D filtra running average (počet priemerovaných stôp: 5).

Posledným krokom v rámci 2D spracovania je 2D filter subtract average, ktorý vypočíta priemer z väčšieho počtu stôp a odstráni ho zo záznamu (obr. 7.36). Efekt aplikácie tohto filtra je podobný známemu background removal, na výslednom radargrame je potlačený prvý reflex (odraz od zemského povrchu). Len kým pri background removal sa odstraňujú hodnoty priemernej stopy od všetkých spracovaných stôp, pri subtract average užívateľ nastaví počet priemerovaných stôp (napríklad 100) a od všetkých stôp sa odpočíta priemer z uvedeného počtu záznamov stôp.



Obr. 7.36 Potlačenie prvého silného reflexu pomocou 2D filtra subtract average (počet priemerovaných stôp: 200).

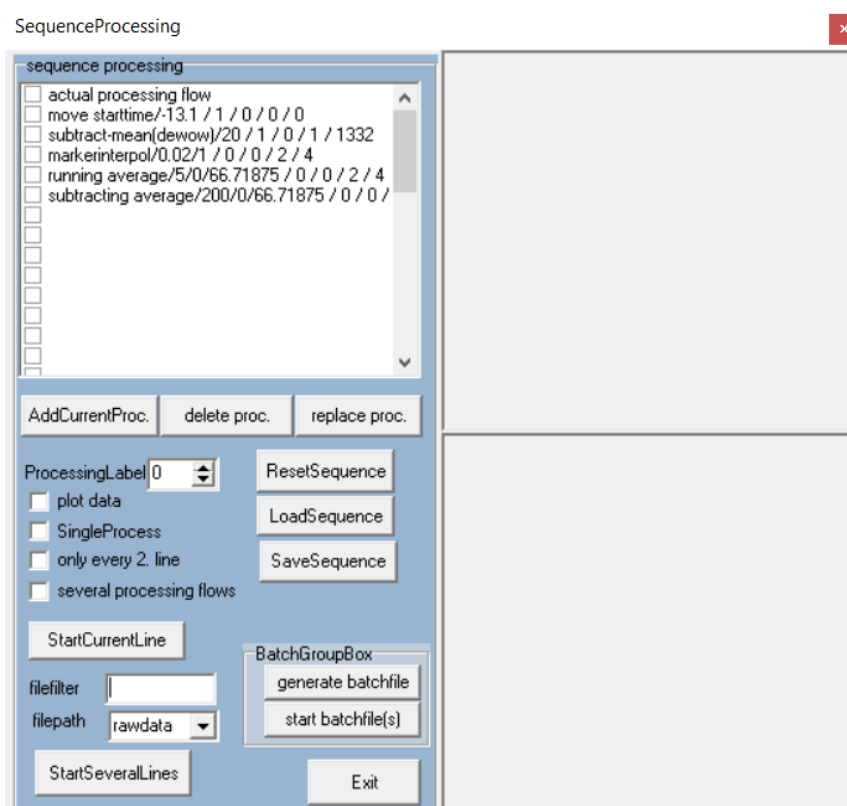
Koncepcia programu ReflexW umožňuje vykonať sériu realizovaných spracovateľských krokov aj na ostatných profiloch súčasne (na všetkých 29 profiloch naraz). Najprv je potrebné uložiť si informácie o vykonaných krokoch do špeciálne vytvoreného súboru (s koncovkou PFL) cez položku v hlavnom menu File -> ProcessingFlow, kde zapneme/zaklikneme možnosť „save to pfl“ a potom zadáme jeho meno (obr. 7.37).



Obr. 7.37 Uloženie zoznamu a parametrov spracovateľských krokov do súboru PFL.

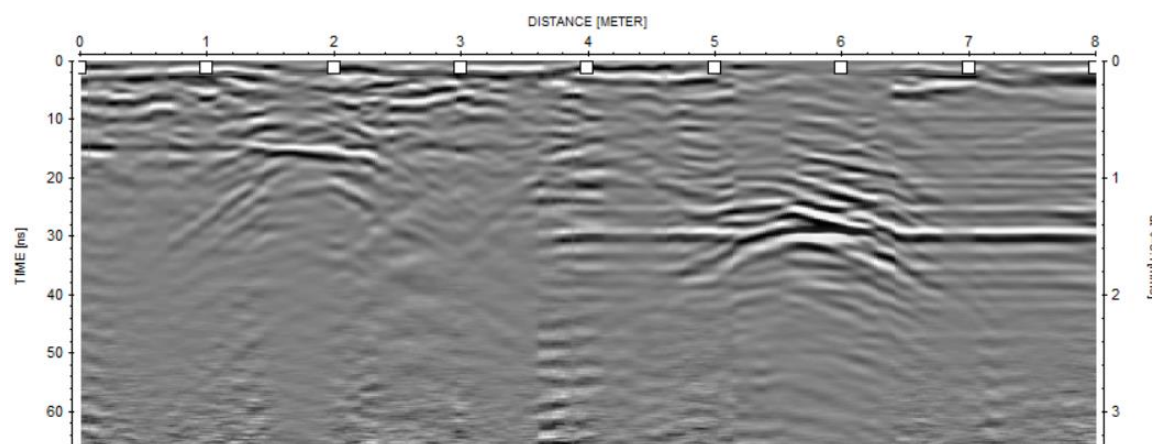
Vytvorený PFL súbor sa potom cez položku v hlavnom menu Processing -> SequenceProcessing (obr. 7.38) nahrá, pričom je potrebné zakliknúť možnosť „LoadSequence“, vo „filepath“ vybrať „rawdata“ a zvoliť parameter „ProcessingLabel“ (štandardne je nastavený na 00). „ProcessingLabel“ je číslo, ktorým budú označené všetky finálne spracované údaje v adresári PROCDATA (súbory typu 00T a 00R,

ak sme ponechali uvedené číslo na nulovej hodnote). Ak by sme chceli niektorý zo spracovateľských krokov zmazať, zaklikneme ho a zvolíme možnosť „delete proc“. Hromadné spracovanie viacerých profilov (súborov) naraz umožňuje zakliknutie možnosti „StartSeveralLines“, čím sa spustí celkový výpočet, pri ktorom sa s danou postupnosťou procesingových krokov spracujú všetky vybrané súbory (v ďalšom malom otvorenom okne potvrdíme možnosť „equidistant“). Uvedený proces vie byť niekedy časovo dosť náročný, najmä ak ide o spracovanie dlhších profilov s vysokou hustotou zaznamenaných údajov. Výsledkom sú profily spracované všetky rovnakým spôsobom.



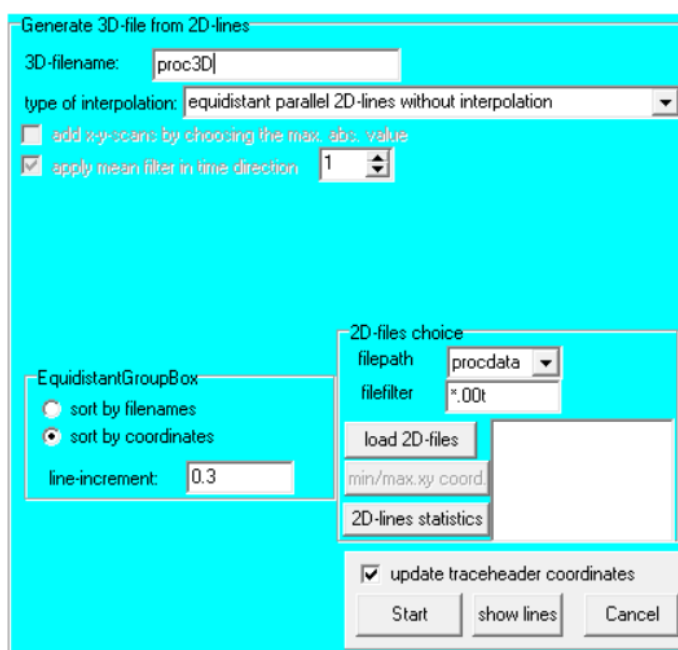
Obr. 7.38 Pracovné okno pre funkciu SequenceProcessing (v príklade je uvedená postupnosť krokov 2D spracovania pre vybraný profil č. 135).

Spracované radargramy vieme zobrazíť pomocou funkcie File -> Open -> procddata, pričom vyberieme profil podľa poradového čísla súboru, v ktorom boli zaznamenané namerané údaje. Na obr. 7.39 uvádzame ako príklad profil č. 147 ($X = 5,7$ m), na ktorom je taktiež vidieť prejav zvyšku múrov. Tento krát je však prejav ich horného okraja komplexnejší a vykazuje prítomnosť niekoľkých násobných reflexov a difragovanej vlny (v pravej časti rezu).



Obr. 7.39 Výsledný radargram pozdĺž profilu č. 147, získaný hromadným spracovaním všetkých profilov.

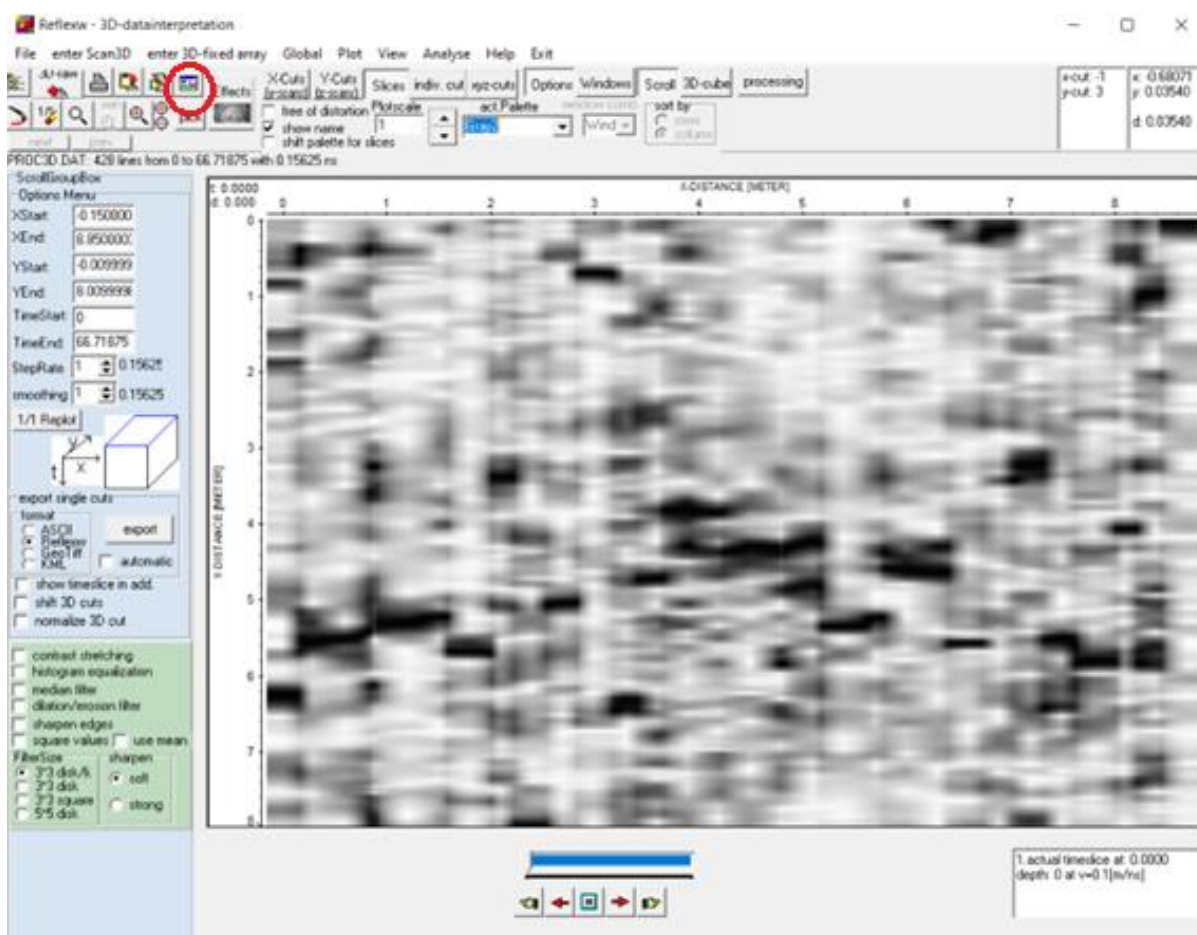
Najzaujímavejším krokom je ale 3D spracovanie, resp. vizualizácia získaných výsledkov. V programe ReflexW na to slúži modul, označený na základnom pracovnom okne programu ako 3D-datainterpretation. Po zvolení tohto modulu sa objaví jeho samostatné pracovné okno s vlastným menu pre 3D typ spracovania. V týchto skriptách sa zameriame iba na niektoré vybrané položky potrebné pre 3D vizualizáciu 2D profilov v popisovanom príklade. V menu File zvolíme možnosť Generate 3D-file from 2D-lines a otvorí sa pracovné okno ponuky (obr. 7.40).



Obr. 7.40 Pracovné okno pre funkciu Generate 3D-file from 2D-lines.

V tomto pracovnom okne (obr. 7.40) sa v hornej časti zadá meno pre 3D súbor a vyberie sa typ interpolácie "type of interpolation", čo je v našom prípade „equidistant parallel 2D-lines without interpolation“ (často používaná štandardná možnosť). Ďalej sa zvolí možnosť „sort by filenames“ alebo „sort by coordinates“ a zadá parameter pre „line-increment“ (v našom prípade „sort by coordinates“ a vzdialenosť profilov 0.3 m). Do „filefilter“ sa zadá poradové číslo spracovaných súborov v adresári PROCDATA a cez „load 2D files“ sa vyberú mená všetkých spracovávaných súborov, ktoré budú použité na 3D vizualizáciu. Po stlačení tlačítka „Start“ sa otvorí okno „Ref3DProcessingForm“, kde sa zadáva spôsob, akým sa v týchto horizontálnych rezoch budú zobrazovať amplitúdy reflexov – či ako ich pôvodné amplitúdy (no), ich absolútne hodnoty (absolute values) alebo obálky amplitúd (envelopes). Často používanou voľbou je práve obálka amplitúdy a tá bola zvolená aj v našom prípade. Potom sa objaví hlavné okno pre zobrazenie 3D náhľadov (obr. 7.41), v ktorom je možné prehliadať interpolované 3D dáta pomocou rôznych spôsobov a pri nastavení rôznych parametrov.

Prvá dôležitá skutočnosť je smer generovania rezov (horizontálnych alebo vertikálnych), ktoré sa budú interpretovať. Vertikálne rezy sa volia pomocou možností na hornej pracovnej lište „X-cuts“ a „Y-cuts“ a horizontálne rezy sa získavajú pomocou možnosti „Slices“ (obr. 7.41, hore); pri možnosti „Slices“ je dôležité zapnúť myšou možnosť „free of distortion“, aby sa zobrazila X-ová a aj Y-ová os v správnych mierkach. Dobré je mať taktiež zvolenú možnosť „show name“, kedy sa v ľavom hornom rohu zobrazujú informácie o súradniciach zobrazeného rezu. Prehliadanie jednotlivých rezov sa realizuje pomocou posuvnej modrej lišty v centrálnej spodnej časti okna (použitím šípiek a ručičiek doľava a doprava). Dôležité je aj nastavenie farebnej škály na zobrazenie interpolovaných amplitúd – zvyčajne sa používa paleta Gray2 (maximálne hodnoty sú potom zobrazované čiernou farbou).

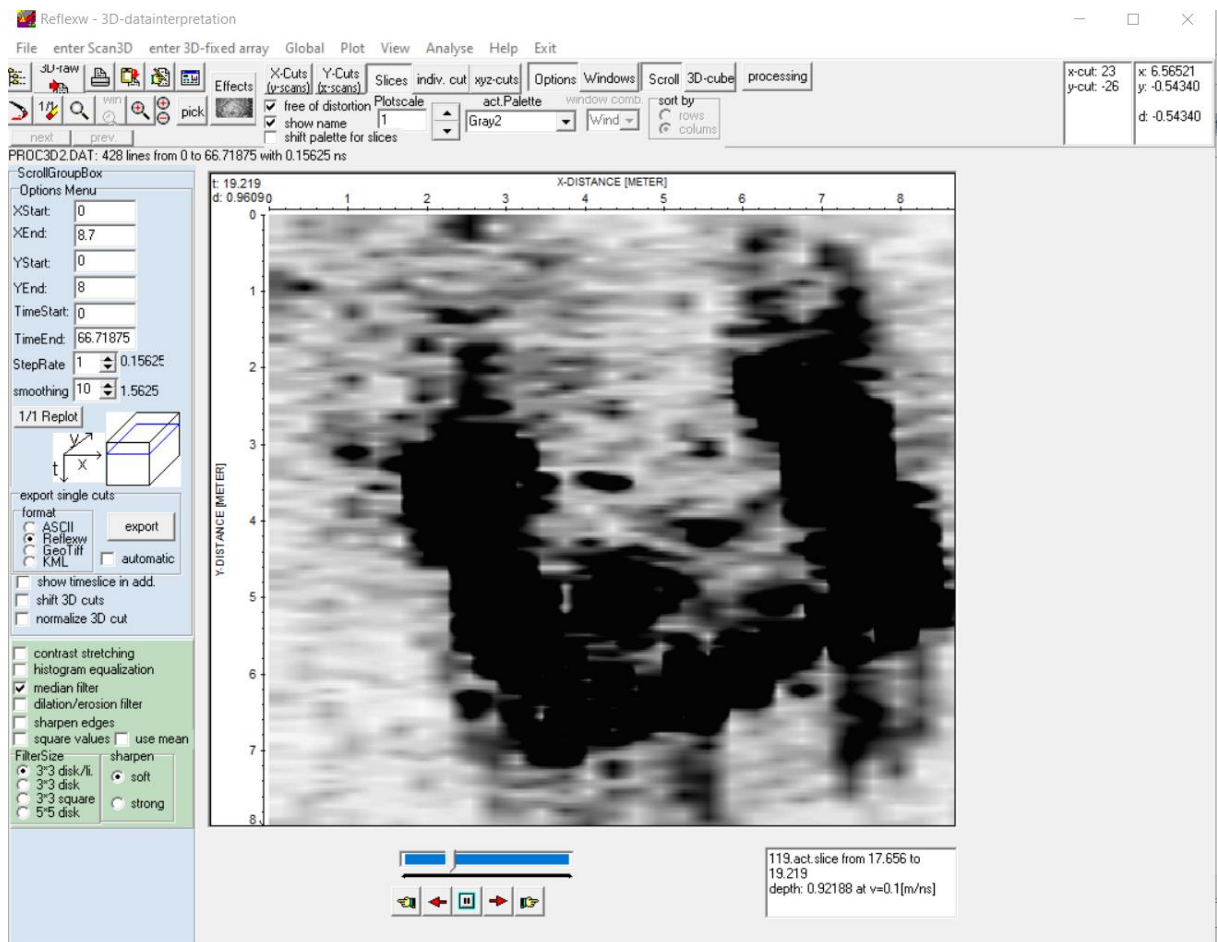


Obr. 7.41 Pracovné okno pre funkciu 3D-datainterpretation – začiatkový stav.

V pravej pracovnej lište okna sa nastavujú hranice zobrazovaných horizontálnych rezov („XStart“, „XEnd“, „YStart“, „YEnd“) a interval použitého času (TWT). Dôležitá je možnosť „smoothing“, pri ktorej sa zadáva počet po sebe idúcich horizontálnych rezov, ktoré sa spriemerujú do jedného, zobrazeného rezu (často sa nastavuje na počet 5 alebo 10). Na získanie kvalitnejšieho/čistejšieho obrazu, bez pásikov v smere meraných profilov, je dobré zaškrtnúť možnosť „median filter“ (vľavo v zelenom poli).

Ďalšie dôležité parametre zobrazenia sa nastavujú v okne aktivovanom ikonkou na hornej pracovnej lište „enter plot options“ (obr. 7.41, hore v červenom krúžku). V tomto okne sa nastavuje rýchlosť šírenia EM vln, s ktorou sa prepočítavajú hodnoty časov (TWT) na hĺbky (najčastejšie sa používa hodnota 0,1 m/ns) a tiež je potrebné zaškrtnúť možnosti „Autointerpolation“, „Tracenormalize“ a „Profilenormalize“. Príklad výsledku nastavenia uvedených parametrov pre 3D interpoláciu je zobrazený

na obr. 7.42, kde sú na horizontálnom reze z hĺbkovej úrovne 0,92 m pekne viditeľné prejavy zvyškov základov kaplnky tvaru „U“. Získané výsledky (vo forme rezov) je možné exportovať do súborov rôznych formátov (aj ako grid GS Surfer) pomocou možnosti „Export“ na ľavej pracovnej lište okna. Alebo ako video formátu MPG pomocou funkcie Analyse -> create MPEG file v hlavnom menu.



Obr. 7.42 Pracovné okno pre funkciu 3D-datainterpretation – konečný stav (výsledné zobrazenie z hĺbkovej úrovne 0,92 m).

Študenti majú možnosť získať od autorov skript uvedenú sadu súborov pre tento konkrétny prípad na vyskúšanie si 2D spracovania a 3D vizualizácie v programe ReflexW podľa uvedeného návodu.

7.4 Aplikácia georadaru pri inšpekcii vozoviek

Prvé testy inšpekcie vozoviek s georadarom (GPR), ako uvádza Saarenketo a Scullion (2000), sa uskutočnili v Škandinávii začiatkom 80. rokov 20. storočia v Dánsku (Berg, 1984) a vo Švédsku (Johansson, 1987), ale metóda v tom čase nezískala všeobecné uznanie. Väčšina výskumných a vývojových prác z tohto obdobia v oblasti inšpekcie vozoviek bola realizovaná vo Fínsku a vykonávala sa nízkofrekvenčnými anténami (100 – 500 MHz) s cieľom vyhodnotiť podložie a jeho medzivrstvy, zistiť hĺbku a preskúmať štrukturálne vrstvy vozovky. Začiatkom a v polovici 90. rokov 20. storočia sa pri projektovaní a kontrole kvality vozoviek začali testovať vysokofrekvenčné antény 1,0 – 1,5 GHz (Saarenketo a Roimela, 1998; Scullion a Saarenketo, 1998; Saarenketo, 1999).

V USA siaha história testov GPR pri inšpekcii vozoviek do polovice 70. rokov 20. storočia, keď podľa Moreyho (1998) Federálna správa diaľnic (FHWA - Federal Highway Administration) testovala možnosti použitia georadaru v tunelových aplikáciách a neskôr na mostových konštrukciách. Prvý systém GPR namontovaný na vozidle pre diaľnice bol vyvinutý na základe zmluvy s FHWA v roku 1985 (Morey, 1998). Odvtedy sa väčšina aplikácií zameraných na meranie hrúbky vozoviek (Maser, 1994), detekciu dutín pod betónovými doskami (Scullion a kol., 1994) a detekciu poškodených oblastí v mostných konštrukciách (Alongi a kol., 1992) realizuje meraniami, pri ktorých sú antény umiestnené na vozidle. Tieto georadarové merania sa vykonávajú prevažne s vysokofrekvenčnými (1,0, 1,5 alebo 2 GHz) anténami (Horn Antenna) umiestnenými nad vozovkou (Scullion a kol., 1992). Výhodou použitia takýchto antén je, že meracie vozidlo sa môže pohybovať po vozovke aj rýchlosťou 130 km za hodinu a teda neovplyvňuje premávku.

Na Slovensku je od roku 2012 platný technický predpis (TP03/2012) Ministerstva dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR s názvom VYUŽITIE GEORADARU (GPR) PRI NÁVRHU REHABILITÁCIE/REKONŠTRUKCIE VOZOVIEK“ s účinnosťou od: 01.10.2012. Predmetom TP je metodika merania a vyhodnocovania údajov slúžiacich na stanovenie hrúbok konštrukčných vrstiev vozovky a identifikáciu nehomogenity v konštrukcii vozovky a aktívnej zóne jej podložia pomocou georadaru.

Väčšina georadarových antén používaných v prieskumoch dopravnej infraštruktúry je bistatická, a to z dôvodu, že sa dajú použiť na určenie dielektrických vlastností vozovky pomocou techník zberu dát WARP (širokouhlého odrazu a lomu) alebo CMP (spoločného reflexného bodu). Pri takomto meraní sa dá určiť rýchlosť šírenia vysielanej vlny a na základe toho stanoviť skutočnú hrúbku asfaltu. Pri meraní s bistatickými anténami, kde sa používa aj kontinuálne meranie WARR alebo CMP, nie je potom nutné realizovať kalibračné vývrty. Tieto techniky merania sa dajú použiť aj s viackanálovými GPR systémami. Existuje niekoľko výhod, keď sa údaje zhromažďujú pomocou viacerých antén súčasne (Saarenketo, 2006):

(1) môžu sa súčasne použiť vysokofrekvenčné antény s dobrým rozlíšením v blízkosti povrchu vozovky a nízko-frekvenčné antény s väčšou penetráciou signálu,

(2) viacero kanálov umožňuje použitie techník zberu na určenie rýchlosti signálu (Davis a kol., 1994; Mesher a kol., 1995; Emilsson a kol., 2002),

(3) viackanálové systémy umožňujú zhromažďovanie údajov pomocou viacerých antén s rovnakou frekvenciou a tak súčasne zhromažďovať údaje z niekoľkých prieskumných línií, čo uľahčuje prípravu 3D modelu skúmaných štruktúr (Davidson a Chase, 1998; Manacorda a kol., 2002).

Konfigurácia anténneho systému môže byť kombináciou ktorýchkoľvek z týchto troch možností. Takéto systémy sú veľmi cenovo nákladné, vo väčšine trvalo inštalované na vozidle a vo veľa prípadoch ich používajú firmy, ktoré sa výhradne špecializujú na diagnostiku vozoviek.

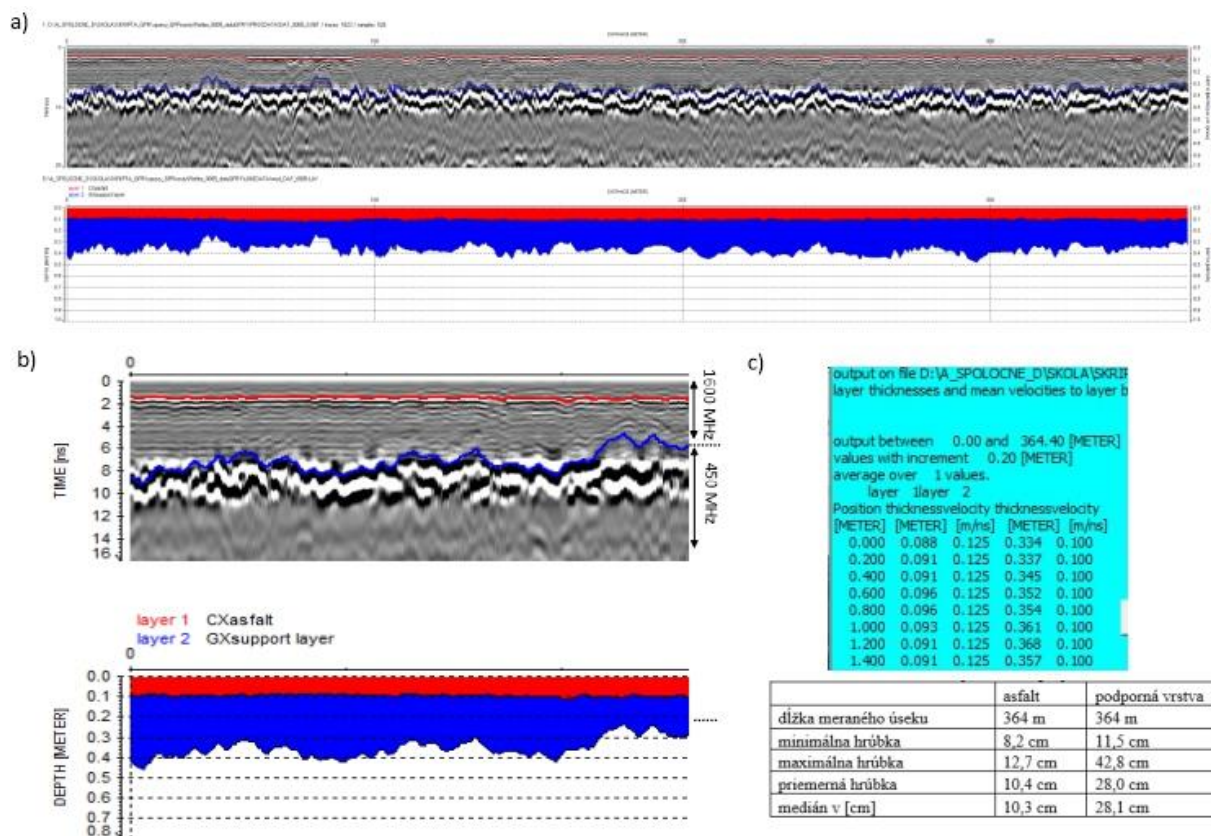
Diagnostika ciest dvojfrekvenčným GPR systémom GX a CX12 od firmy MALA

Táto prípadová štúdia je ukážkou využitia GPR pri diagnostike konštrukčných vrstiev vozovky s cieľom stanoviť hrúbku asfaltových a podporných vrstiev. Meranie bolo realizované dvojfrekvenčným GPR systémom CX a GX od firmy Mala - GX s anténou HDR 450 MHz a CX12 s vysokofrekvenčnou anténou so strednou vysielačou frekvenciou 1,6 GHz (obr. 7.43). Na meranie vzdialenosti bol použitý odometer a poloha merania bola zaznamenávaná pomocou diferenciálneho GPS prijímača s pripojením na sieť referenčných staníc SKPOS, prepojeného s aparátúrou GX. Meranie prebiehalo na suchej vozovke, za slnečného počasia pri teplote vzduchu 14 °C.



Obr. 7.43 Dvojfrekvenčný GPR systém CX a GX od firmy Mala - GX s anténou HDR 450 MHz a CX12 s vysokofrekvenčnou anténou so strednou vysielačou frekvenciou 1,6 GHz.

Nameraný záznamu bol spracovaný v programe Reflex W. Na radargramoch boli určené a vyznačené rozhrania medzi asfaltom a podpornými vrstvami vozovky (obr. 7.44 a, b - hore). Pretože v rámci meraní neboli na vozovke realizované odvrtý pre kalibráciu hĺbky interpretovaných rozhraní, bolo nastavenie rýchlosti šírenia elektromagnetickej vlny realizované na základe poskytnutých materiálov o konštrukcii vozovky a tabuľkových hodnôt rýchlostí (0,125 m/ns pre asfaltovú vrstvu a 0,1 m/ns pre podpornú vrstvu). Z interpretovaných radargramov boli vytvorené vrstevné modely (grafy hrúbok) jednotlivých interpretovaných vrstiev vozovky (obr. 7.44 a, b - dolu) a zo stanovených hrúbok vyznačených vrstiev boli vypočítané základné štatistické údaje o každom diagnostikovanom úseku (obr. 7.44 c)



Obr. 7.44 Ukážka výsledkov merania dvojfrekvenčným GPR systémom na diagnostikovanom úseku vozovky: a) interpretovaný radargram vytvorený zlúčením dáta z oboch meracích systémov (hore), vrstevný model (dolu), b) detail interpretovaného radargramu a vrstevného modelu, c) časť vygenerovaných parametrov vrstevného modelu (s hodnotami hrúbok vrstiev pre každú stopu) a vypočítané základné štatistické údaje o diagnostikovanom úseku.

Meranie dvojfrekvenčným GPR systémom GX a CX12 od firmy MALA

Pri meraní dvojfrekvenčným GPR systémom GX a CX12 od firmy MALA sú obe antény uložené na podložke RTC vozíka (RTC - Rough Terrain Cart) a pozičné informácie z RTK GPS zbiera systém GX cez sériový kábel (D-SUB9). Nastavenie je na strane GX kontrolera v systémovom menu, GPS ON/OFF: *On* a v podmenu GPS Parameters je potrebné nastaviť nasledujúce parametre:

GPS Interface/Unit: *COM*,

Select accuracy for green: *High(RTK fix only)*,

Com port Baud rate: *9600*,

Checksum validation: *On*.

Rýchlosť merania je limitovaná autostackingom v staršom systéme CX12, preto sa vzorkovací interval („point interval“) v parametroch merania jednotlivých GPR systémov nastavuje nasledovne: pre rýchlosť merania do 40 km/h na 20 cm (0,2 m),

pre rýchlosť merania do 60 km/h na 50 cm (0,5m) a pre rýchlosť 80-90 km/h na 100 cm (1 m).

Pred začiatkom merania musí byť pamäť kontrolérov vymazaná.

Procesné kroky pre ReflexW

V prípade, že sa v rámci procesingu bude využívať proces DataFusion (zlúčenie dát s rôznou frekvenciou signálu do výsledného radargramu) je potrebné si na začiatku upraviť názvy nameraných súborov dát, urobiť kontrolu a korekciu dĺžky profilov a zjednotenie trasovania (rozostupu stôp na profile „traceincrement“) pre dáta z CX a GX systému:

1. Súbory z oboch systémov premenujeme na DAT_00XX a k názvom súborov zo systému GX pridáme koncovku _1 (DAT_00XX_1) a k názvom súborov zo systému CX12 pridáme koncovku _0 (DAT_00XX_0).

2. Kontrola a korekcia dĺžky profilov a zjednotenie „traceincrementu“.

Po nainportovaní dát z oboch systémov si otvoríme surové dáta (RAW) z GX a v hlavičke profilu (fileheader) skontrolujeme dĺžku profilu (Xend) a „traceincrement“. Potom otvoríme zodpovedajúci profil z CX12 systému. Vo fileheader do „Xend“ napíšeme hodnotu dĺžky profilu z GX a nové nastavenie uložíme (SAVE). V ďalšom kroku si zvolíme procesingový krok Trace Interpolation/Resorting a vyberieme „traceincrement-resampling“, kde nastavíme „trace“ na šírku napr. 0,2 m. Po týchto krokoch majú dáta z GX a CX12 rovnakú dĺžku, rovnaký „traceincrement“ a rovnaký počet stôp na celý profil.

Takto pripravené dáta z GX i CX12 spracujeme.

3. Pre profily zo systému CX12 je potrebné najskôr urobiť povinné procesné kroky pre – Subtract DC-Shift a Subtract Mean Dewow. Pri GX sa tieto kroky nevyžadujú.

Ostatné procesingové kroky sú pre CX12 aj GX obdobné.

4. Oprava na nulový čas použitím funkcie move starttime z ponuky Static correction/muting. Určenie hodnoty nulového času, ktorý budeme v tomto kroku

zo záznamu odpočítavať, urobíme pomocou zobrazenia „WiggleWindow“, kde odčítame čas v ns v prvej polovici prvej kladnej amplitúdy.

5. Odstránenie air a ground wave z vrchnej časti profilu 2D filtrom background removal. Ak zostanú reziduá v zmysle horizontálnych pásov môžeme ich ešte odstrániť cez 2D filter Subtracting average.
6. Zosilnenie dát procesingovým krokom Gain. Najlepší výsledok pri meraniach na cestách má nastavenie AGC gain s voľbou „normalize“. Energy Decay je vhodný pri meraní na homogénnych materiáloch (napr. betónové konštrukcie), pri meraní na cestách nestačí. Zvolením možnosti Energy Decay si však môžeme jednoducho a rýchlo pozrieť ako je v profile distribuovaná energia a od akej hodnoty na vertikálnej osi vzniká šum, rezonancie a iné neužitočné informácie. Tento údaj môže využiť pri odrezávaní neužitočných zašumených dát.
7. Ak vieme, kde už dáta z CX12 a GX neobsahujú užitočné informácie, odrežeme spodok profilu v ponuke Static correction/muting, voľba time cut.
8. Ak úplne hore alebo úplne dole zostali na radargramoch ešte horizontálne „pásky“, môžeme tento jav odstrániť pomocou 2D filtra Subtracting average. Treba si však uvedomiť, že tento filter môže pri malom počte stôp odstrániť užitočné informácie.
9. Na záver procesingu, na potlačenie šumov a brumov (rušivých vplyvov), je vhodné použiť 2D filter Runnig average s koeficientom 2-3 (stopy). Výsledné profily sú pripravené na pikovanie (vyznačovanie reflexov alebo objektov).

Pre potreby zlúčenia spracovaných dát z CX12 a GX systému je nutné, aby procesné koncovky výsledných spracovaných radargramov z oboch systémov, ktoré budú vstupovať do Data Fusion boli rovnaké.

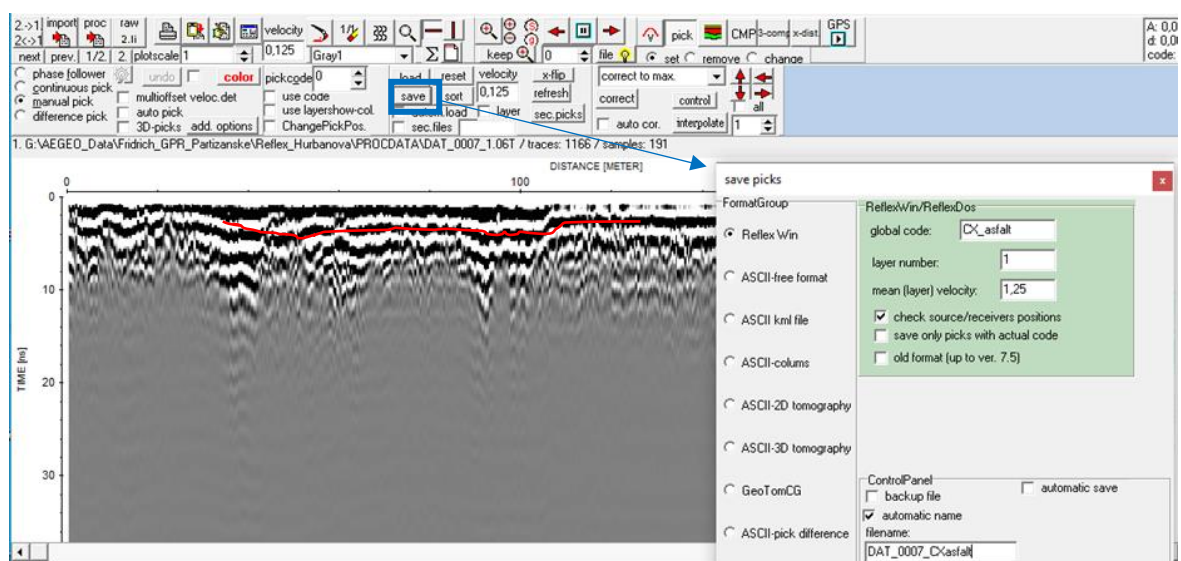
10. Zlúčenie dát dvojfrekvenčného zberu funkciou Data Fusion.

Tento krok zlúči dáta z oboch meracích systémov do výsledného radargramu so zachovaným rozlíšením vysokofrekvenčnej antény v plytších častiach a hĺbkovým dosahom z merania GX systémom. Ako už bolo spomenuté zlúčiť možno iba súbory s upraveným názvom, rovnakým krokom trasovania a s rovnakou dĺžkou profilu. Otvoríme výsledné spracovanie vysokofrekvenčných dát (CX12 systému), v procesingovej ponuke vyberieme FK-analysis/data-fusion, zvolíme Data Fusion a nastavíme parametre filtra:

„mix. time“ udávajúci koľko percent z časovej osi výsledného spojeného radargramu budú predstavovať vysokofrekvenčné dáta z CX12 (prekryt CX12 a GX dát, udáva sa v % z časovej osi vysokofrekvenčného signálu); „damping“ udáva útlm nízko-frekvenčných dát z GX systému až do zadanej hodnoty pre „mix.time“; „min. frequency“ a „max. frequency“ je nastavenie pásmového filtra potláčajúceho vysokofrekvenčný šum indukovaný pri zlučovaní dát.

Interpretácia a vytvorenie vrstevného modelu v ReflexW

V rámci interpretácie pri diagnostike ciest dvojfrekvenčným systémom, sa na výsledných radargramoch z každého meracieho systému, vyznačia (pikujú) reflexné rozhrania zodpovedajúce kontaktu jednotlivých konštrukčných vrstiev s rozdielnymi fyzikálnymi vlastnosťami. Pri pikovaní výrazných spojitých rozhraní je možné použiť automatické pikovanie „phase follower“ a prípadné chyby opraviť ručným pikovaním „continuous pick“. Na radargramoch z CX systému pikujeme maximum zápornej amplitúdy, pri GX prechod kladnej do zápornej. Vypikované rozhrania je potrebné uložiť s patričnými parametrami, aby ich bolo možné použiť na vytvorenie výsledného vrstevného modelu. Pikované dáta sa ukladajú vo formáte „Reflex Win“, pričom je treba nastaviť parametre vrstvy nad pikovaným rozhraním (obr. 7.45): „global code“ názov vrstvy, „layer number“ číslo/poradie vrstvy a „mean layer velocity“ vrstevnú rýchlosť potrebnú pre neskoršiu hĺbkovú konverziu.



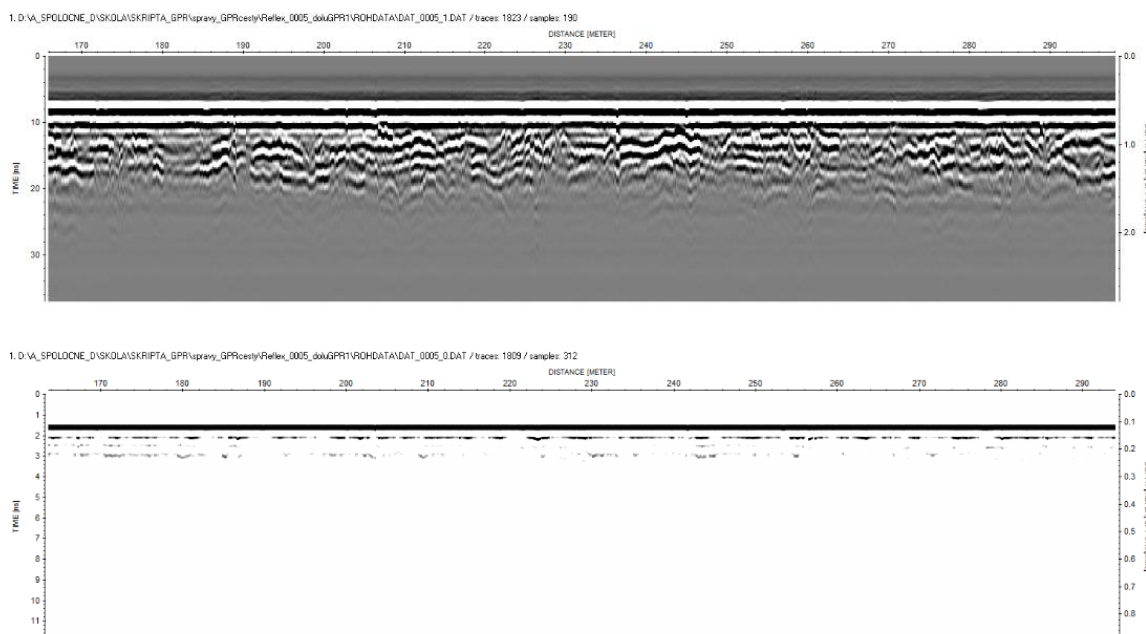
Obr. 7.45 Nastavenie parametrov pikovanej vrstvy pri ukladaní vypikovaných dát (červená línia – vyznačené reflexné rozhranie, modrý štvorec - označuje ikonku pre ukladanie dát a následne otvorené okno pre zadanie parametrov).

Z vypikovaných rozhraní je možné zapnutím modulu „Layer show“ v ponuke „Analysis“ vytvoriť vrstevný model. V ponuke modulu zvolíme „create“, kde vyberieme súbory s vypikovanými rozhraniami, z ktorých bude model vytvorený. Tento modul tiež umožňuje vyexportovať parametre vytvoreného modelu vo forme tabuľky s hodnotou hrúbky interpretovaných vrstiev pre každú stopu meraného profilu. Tieto údaje sú základom pre výpočet základných štatistických údajov o diagnostikovanom úseku cesty.

Ukážka spracovania profilu 0005

Názvy súborov meraných systémom CX12 s anténou s frekvenciou 1,6 GH a systémom GX s anténou 450 MHz boli upravené do požadovaného tvaru pre zlúčenie dát z oboch systémov - DAT_0005_1 pre GX systém, DAT_0005_0 pre CX12 systém.

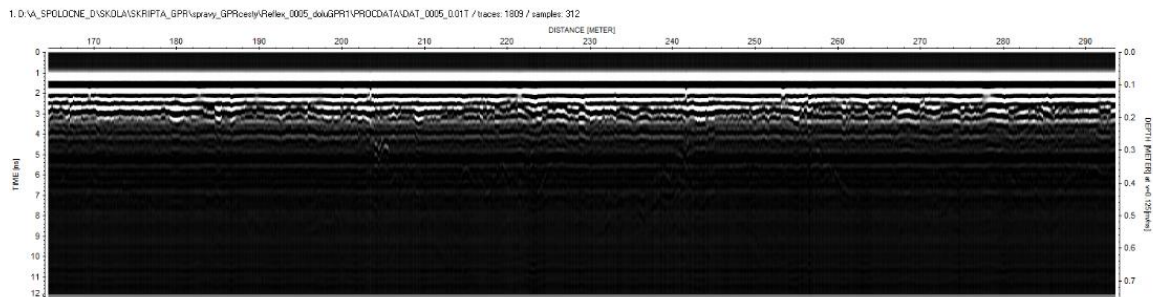
Dáta boli importované do programu ReflexW (obr. 7.46). Na začiatku procesingu bola urobená kontrola a korekciu dĺžky profilov a zjednotenie trasovania pre oba systémy podľa postupu popísaného v časti „Procesné kroky pre ReflexW“.



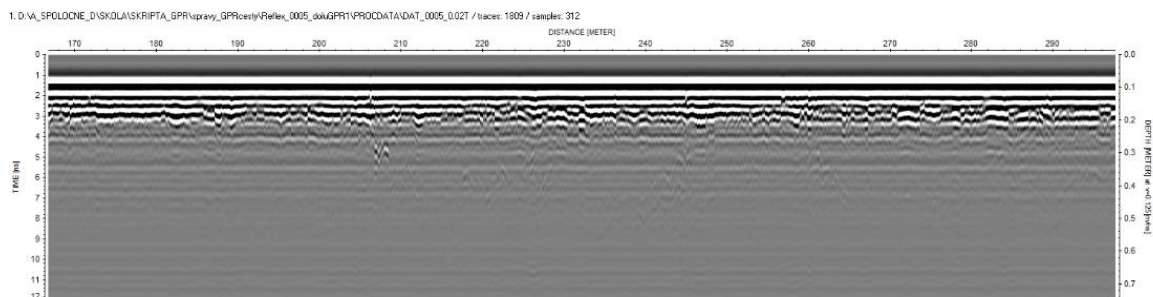
Obr. 7.46 Radargram bez spracovania - DAT_0005_1 (hore) a DAT_0005_0 (dolu).

Spracovanie vysokofrekvenčných dát zo systému CX - DAT_0005_0

Prvými krokmi pri spracovaní vysokofrekvenčných dát zo systému CX bolo použitie 1D filtrov, povinné pre staršie radary MALA: filter subtract-DC-shif (výsledok filtrácie je zobrazený na obr. 7.47) a následné aplikovanie filtra subtract-mean (dewow) s nastavením časového okna (timewindows) na hodnotu 0,625 ns. Výsledok filtrácie 1D filtra subtract-mean (dewow), je zobrazený na obr. 7.48.

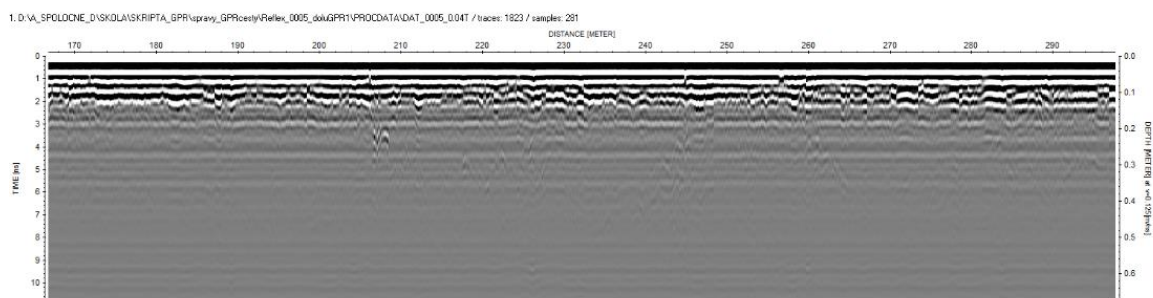


Obr. 7.47 DAT_0005_0 – zobrazený radargram po použití 1D filtra subtract-DC-shift.



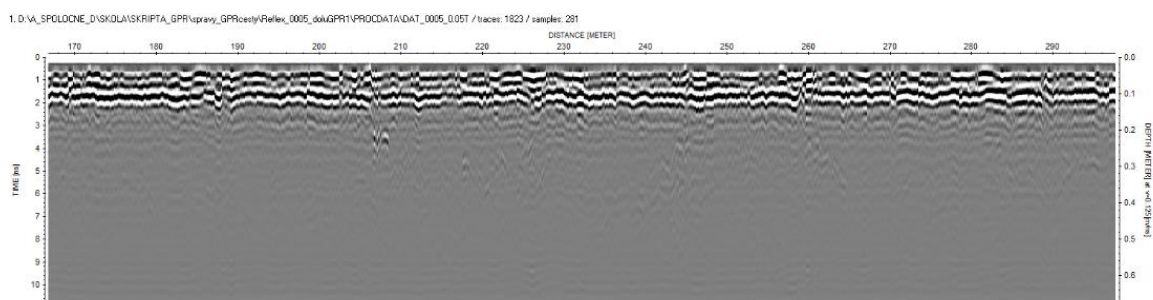
Obr. 7.48 DAT_0005_0 – zobrazený radargram po použití 1D filtra subtract-mean (dewow).

Ďalší krok spracovanie pozostával z korekcie na nulový čas move starttime s manuálnym nastavením hodnoty nulového času. V tomto prípade bola použitá hodnota na opravu nulového času -1,2 ns. Výsledok korekcie je na obr. 7.49.



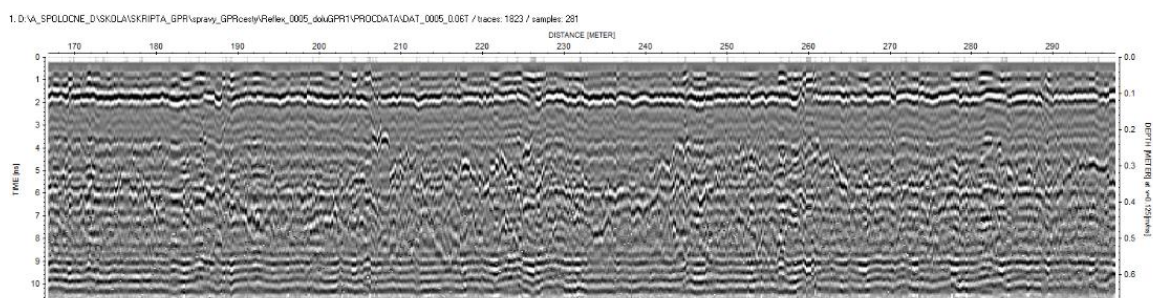
Obr. 7.49 GPR profil 1 – zobrazený radargram po použití kroku spracovanie – move starttime.

V ďalšom kroku bolo potrebné použiť 2D filter background removal na potlačenie prejavu vln so silnou energiou vo vrchných vrstvách radargramu. Výsledok je na obr. 7.50.



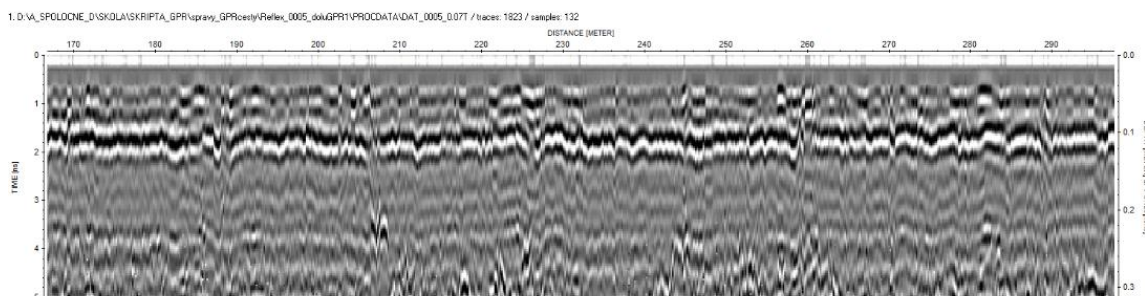
Obr. 7.50 DAT_0005_0 – zobrazený radargram po použití 2D filtra background removal.

Následne bolo na záznam radargramu aplikované zosilnenie signálu (Gain) použitím filtra AGC-Gain s nasledujúcimi nastaveniami: „windows lenght“ 3, „scaling value“ 1, „max. gain“ 4000, „max. normalize value“ 3000, označená možnosť „normalize“. Výsledok zosilnenie je na obr. 7.51.



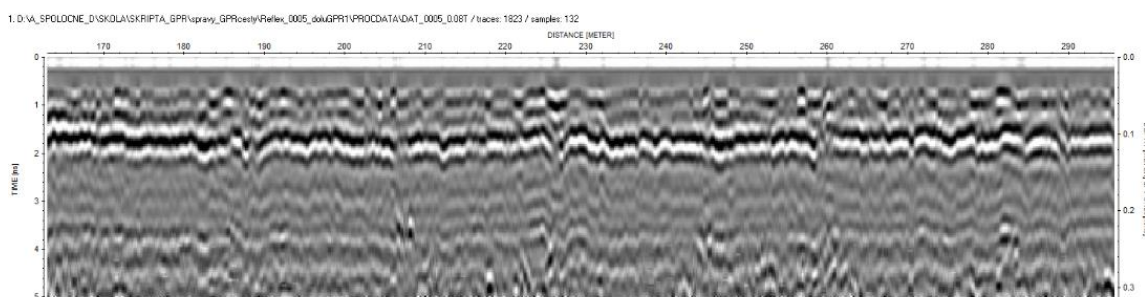
Obr. 7.51 DAT_0005_0 – zobrazený radargram po zosilnení signálu (gain).

Vzhľadom na to, že dáta v hlbších častiach radargramu už neobsahujú užitočné informácie, spodná časť profilu od hodnoty 5 ns bola odrezaná cez ponuku Static correction/muting, voľba time cut, nastavená hodnota 5. Výsledok je na obr. 7.52.



Obr. 7.52 DAT_0005_0 – zobrazený radargram po odrezaní spodnej časti dát „time cut“.

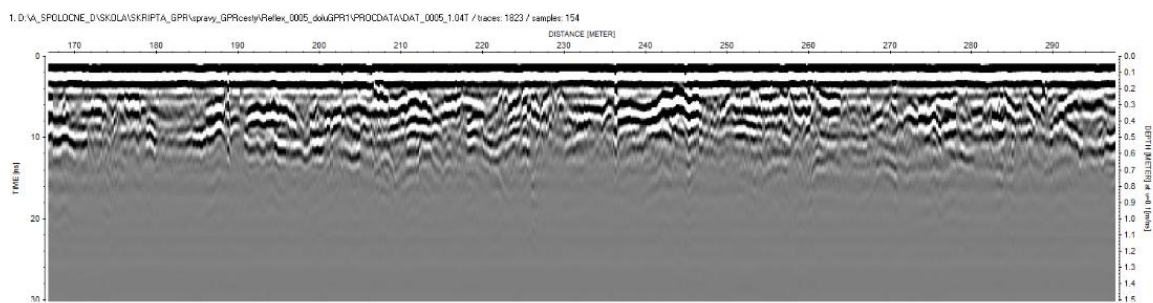
V poslednom kroku spracovania vysokofrekvenčných dát bol aplikovaný 2D filter „running average“ s hodnotou priemerovania stôp „average traces“ nastavenou na 3. Výsledok použitia tohto filtra a výsledný radargram s procesnou koncovkou 08T je na obr. 7.53.



Obr. 7.53 DAT_0005_0.09T – zobrazený radargram po použití 2D filtra running average.

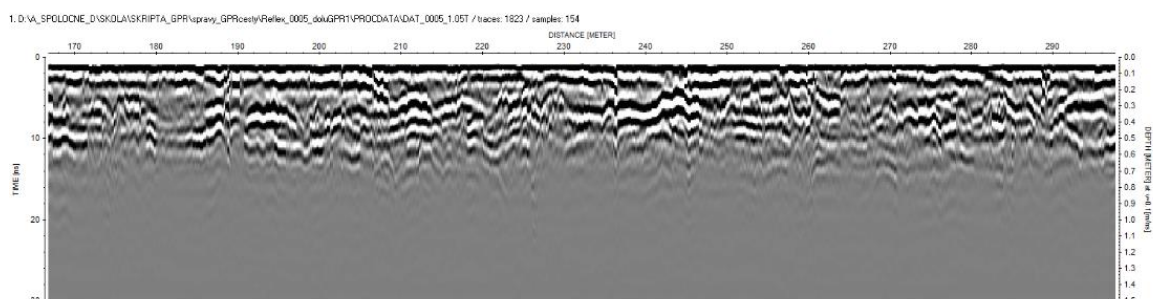
Spracovanie dát zo systému GX - DAT_0005_1

Pri spracovaní dát zo 450 MHz antény boli použité rovnaké procesingové kroky ako pri spracovaní vysokofrekvenčných dát z CX systému, okrem 1D filtrov (subtract-DC-shif a subtract-mean dewow). Prvým krokom bola teda korekcia na nulový čas „move starttime“ s manuálnym nastavením hodnoty nulového času, s hodnotou na opravu nulového času nastavenou na - 7,1 ns. Výsledok korekcie je na obr. 7.54.



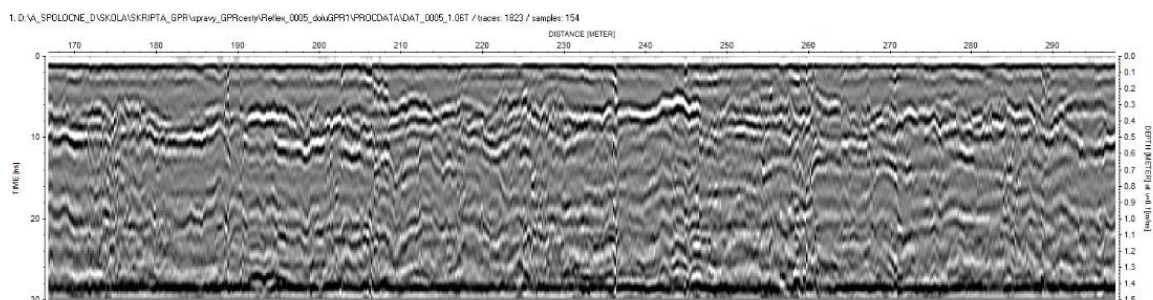
Obr. 7.54 DAT_0005_1 – zobrazený radargram po použití kroku spracovanie – move starttime.

Ďalej bol použitý 2D filter background removal. Výsledok je na obr. 7.55.



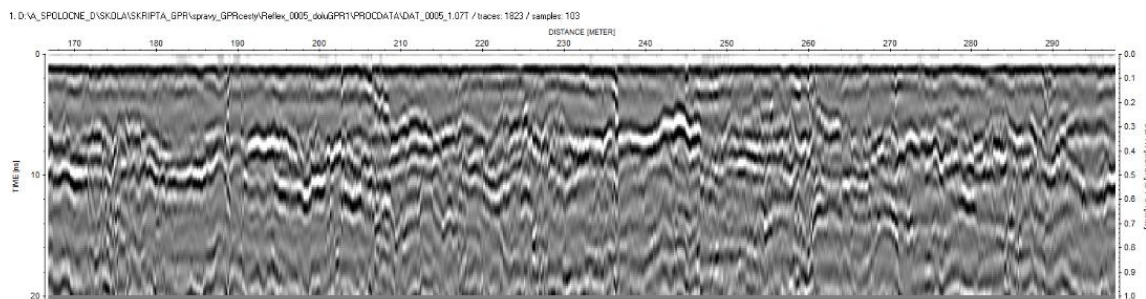
Obr. 7.55 DAT_0005_1 - zobrazený radargram po použití 2D filtra background removal.

Následne bolo na záznam radargramu aplikované zosilnenie signálu (Gain) použitím filtra AGC-Gain s nasledujúcimi nastaveniami: „windows lenght“ 10, „scaling value“ 1, „max. gain“ 3000, „max. normalize value“ 4000, označená možnosť „normalize“. Výsledok zosilnenie je na obr. 7.56.



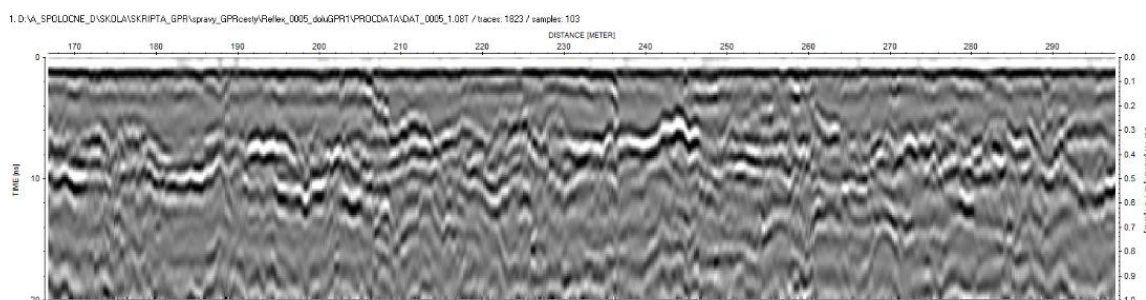
Obr. 7.56 DAT_0005_1 – zobrazený radargram po zosilnení signálu (gain).

Hlbšie časti radargramu bez užitočného signálu boli odrezané cez ponuku Static correction/muting, voľba time cut, nastavená hodnota 20. Výsledok je na obr. 7.57.



Obr. 7.57 DAT_0005_1 – zobrazený radargram po odrezaní spodnej časti dát time cut.

Na záver spracovania dát zo 450 MHz antény bol aplikovaný 2D filter running average s hodnotou priemerovania stôp „average traces“ nastavenou na 3. Výsledok použitia tohto filtra a výsledný radargram s procesnou koncovkou 08T je na obr. 7.58.

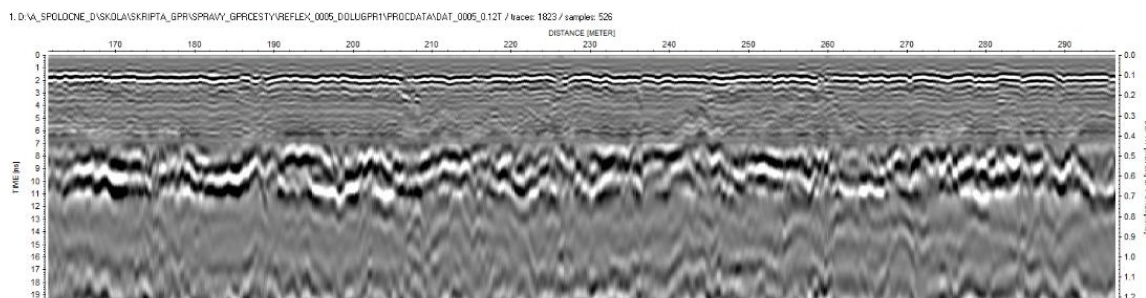


Obr. 7.58 DAT_0005_1.08T – zobrazený radargram po použití 2D filtra running average.

Zlúčenie dát z oboch systémov

Posledným krokom procesingu dvojfrekvenčného merania bolo zlúčenie spracovaných dát z 1600 MHz a 450 MHz antény. Do zlučovania vstupujú výsledné spracované radargramy z každého systému - DAT_0005_0.08T a DAT_0005_1.08T. Pri otvorení profilu DAT_0005_0.08T bola v procesingovej ponuke FK-analysis/data-fusion zvolená možnosť Data Fusion s aktivovaným „bandpassfiltering“ a „timezero correction“ a nasledovným nastavením parametrov filtra: „damping“ 40,

„mix. time“ 30, „min. frequency“ 250 , „max. frequency“ 2000 (maximálna frekvencia pre 1600 MHz anténu). Výsledok zlúčenia dát je na obr. 7.59.



Obr. 7.59 Výsledný radargram z profilu 0005 - výsledok Data Fusion.

Výsledný radargram po zlúčení spracovaných dát z oboch antén slúžil, po nahraní rozhraní vypikovaných na radargramoch z jednotlivých antén, na vytvorenie vrstevného modelu a vypočítanie základných štatistických údajov o diagnostikovanom úseku. Tieto výsledky diagnostiky sú uvedené na obr. 7.44.

7.5 Aplikácia georadaru pri detekcii nevybuchnutej munície

V rámci použitia georadaru pri detekcii nevybuchnutej munície (UXO – UneXploded Ordnance) existuje vo svete množstvo úspešne realizovaných projektov. Objekty nevybuchnutej munície (UXO) sú v absolútnej väčšine vyrobené z ocele, ktorá má vysoké hodnoty relatívnej elektrickej permitivity a aj magnetickej permeability. Takéto objekty potom predstavujú pri georadarovom prieskume vysoko reflektujúce ciele a jeho použitie dokáže byť vysoko efektívne (napr. Simms et al., 2004; Youn, 2007). Slabinou použitia georadaru je však veľkosť objektov UXO. K tomuto aspektu sa dostaneme neskôr v tejto podkapitole.

Detekcia objektov UXO na testovacej ploche v rámci vojenského areálu Rohožník

Ako príklad použitia georadaru pri tomto type aplikácie, uvádza táto prípadová štúdia výsledky overovacieho prieskumu, ktorý bol realizovaný na testovacej ploche vo vojenskom areáli Rohožník. V roku 2021 bola pracovníkmi Oddelenia pyrotechniky Kriminalistického a expertízneho ústavu Policajného zboru SR v spolupráci s odborníkmi z Katedry inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky Prírodovedeckej fakulty UM v Bratislave vytvorená testovacia plocha s rozmermi 15 x 15 m (Pašteka et al., 2021), na ktorej bolo v rôznych hĺbkach a polohách odborne umiestnených (zakopaných) niekoľko kusov inertnej munície (obr. 7.60, 7.61 a 7.62). Na takto vytvorenej skúšobnej ploche je možné testovať rôzne metódy detekcie UXO s tým, že odborníci majú ihneď spätnú väzbu v súvislosti so získanými výsledkami (bez potreby odkopávania a overovania objektov). Myšlienka zriadenia uvedenej testovacej plochy bola motivovaná existenciou podobných testovacích plôch v zahraničí, najmä teda na území USA (napr.: Jefferson proving ground; Curtis, 1999; Robitaille et al., 1999).



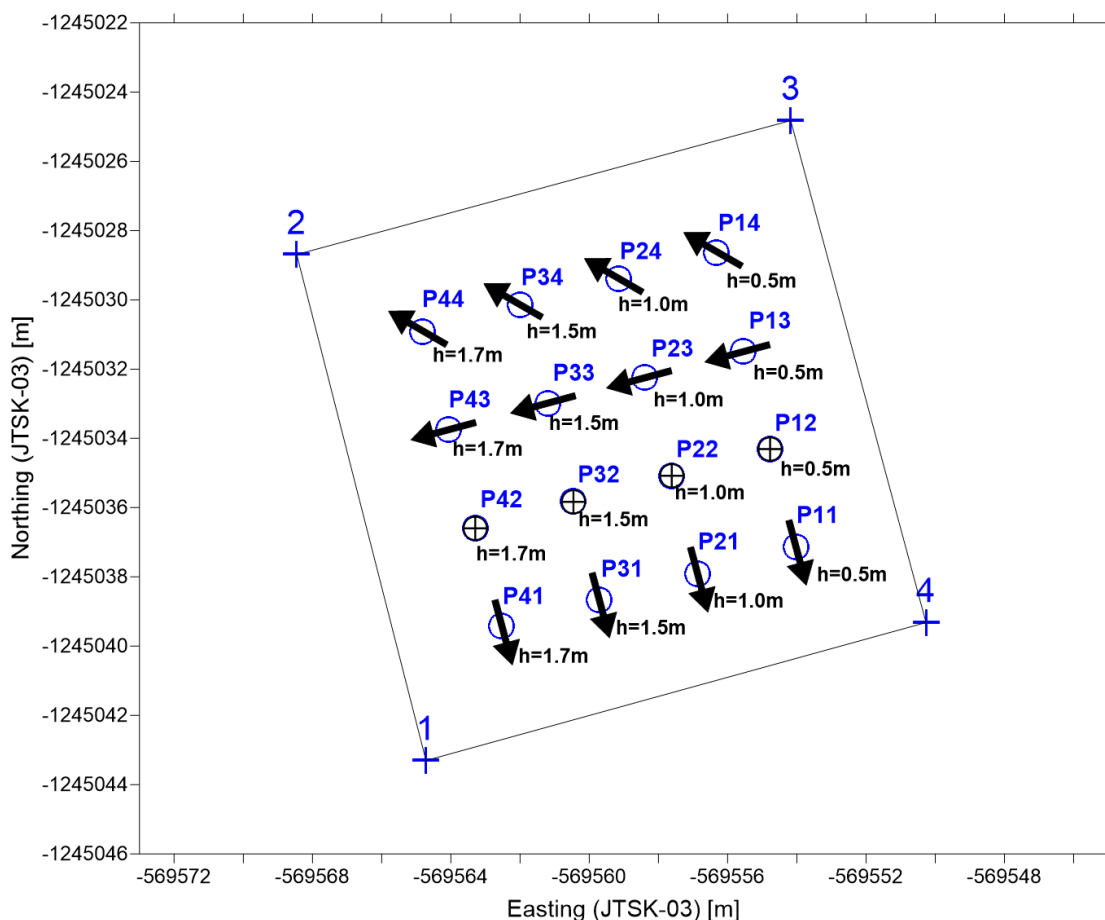
Obr. 7.60 Vľavo: fotografia zachytávajúca výkopové práce, ktoré boli potrebné na realizáciu umiestnenia projektílov 100 mm kalibru v rámci testovacej plochy na leteckej strelnici Rohožník. Vpravo: inertná tanková strela kalibru 100 mm, použitá v rámci vytvorenej testovacej plochy (projektil je položený na povrchu plochy, tesne pred jeho zakopaním).



Obr. 7.61 Poloha testovacej plochy vo výcvikovom priestore Rohožník na ortofoto snímke zo systému Google Earth. Čísla znázorňujú poradové čísla rohov plochy. Situácia je presnejšie znázornená na obr. 7.62 v použitom súradnicovom systéme JTSK03.

Projektily tankových 100 mm striel (obr. 7.60, vpravo) boli očíslované poradovými číslami P11-P14, P21-P24, P31-P34 a P41-P44. Všetkých 16 projektílov bolo zakopaných v sieti 3 × 3 m (obr. 7.63). Projektily boli rôzne orientované voči

geografickému severu, boli uložené buď v horizontálnej alebo vertikálnej polohe a umiestnené boli v rôznych hĺbkach: 0,5 m (P11 - P14), 1,0 m (P21 - P24), 1,5 m (P31 - P34) a 1,7 m (P41 - P44). Projektily P14, P24, P34 a P44 boli uložené v horizontálnej polohe nasmerované približne na SZ; projektily P13, P23, P33 a P43 boli taktiež v horizontálnej polohe a nasmerované približne na ZJZ; projektily P12, P22, P32 a P42 boli uložené vo vertikálnej polohe nasmerované zospodu nahor; a projektily P11, P21, P31 a P41 boli opäť v horizontálnej polohe nasmerované približne na JJV.

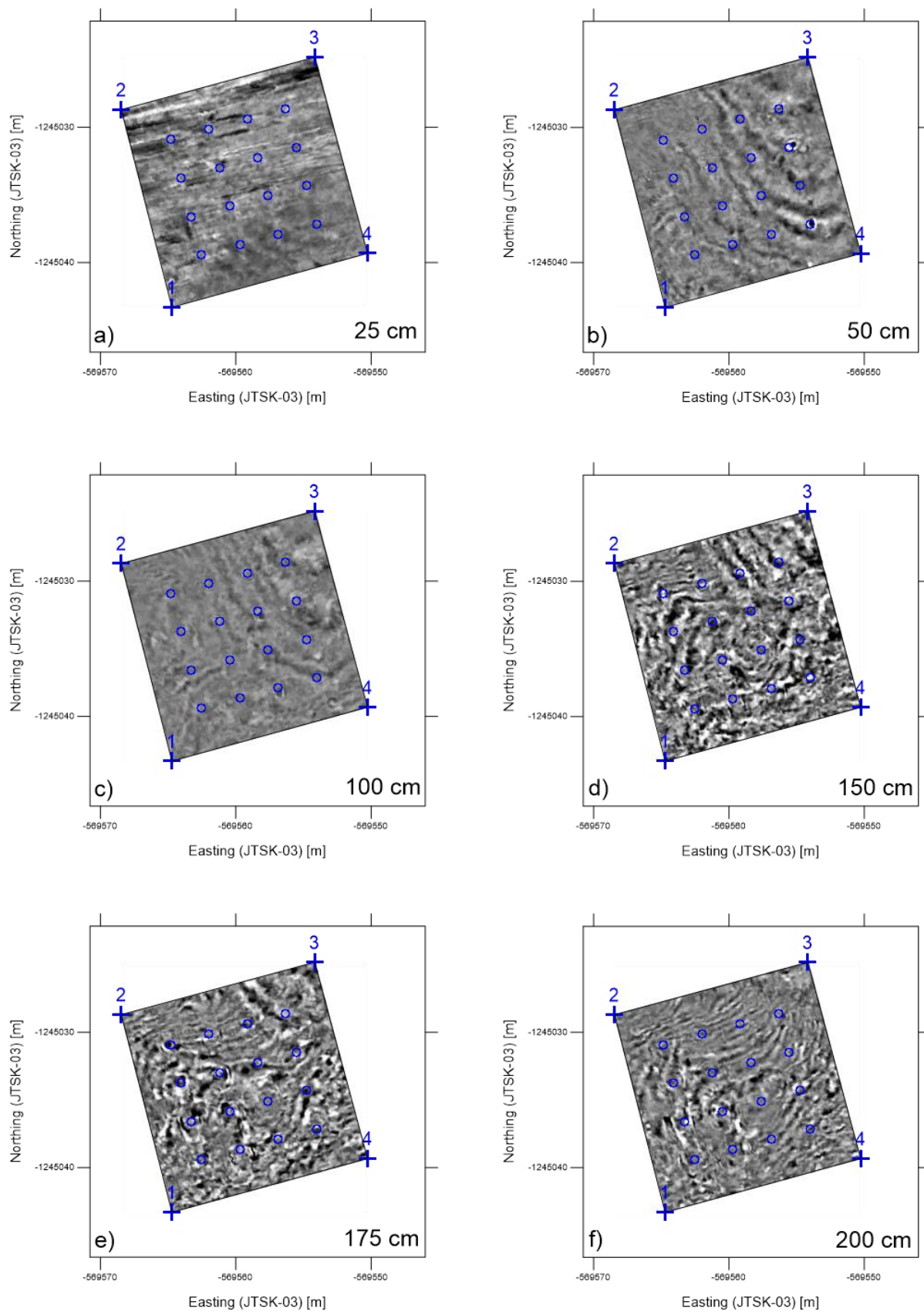


Obr. 7.62 Poloha a orientácia projektílov kalibru 100 mm v rámci vytvorenej testovacej plochy na leteckej strelnici Rohožníku. Šípky ukazujú orientáciu projektílov, krúžok s krížikom vo vnútri označuje polohu projektílov zakopaných vo vertikálnom smere (ich predná časť smeruje nahor). Zároveň sú na obrázku uvedené aj hĺbky a poradové čísla projektílov (P11 až P14, P21 až P24, P31 až P34, P41 až P44).

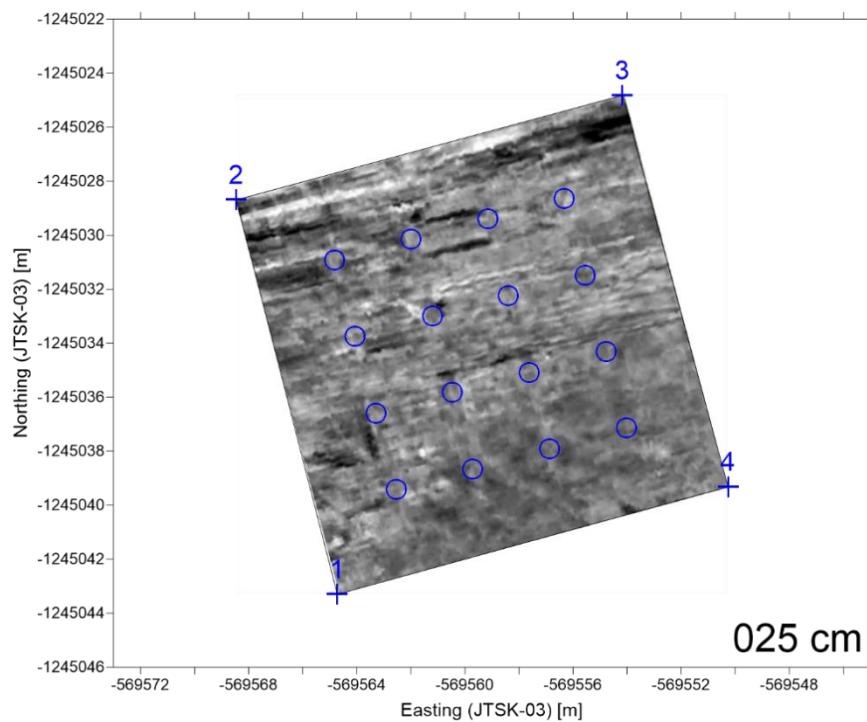
Na povrchu vytvorenej testovacej plochy boli následne realizované terénne geofyzikálne merania s rôznymi metódami – hlavne detailná magnetometria a georadarové merania (Pašteka et al., 2023). Merania boli situované v lokálnom

súradnicovom systéme, ktorý bol neskôr transformovaný na globálny systém JTSK03 na základe zmerania rohov plochy pomocou aparatury GNSS (Trimble R8s). Namerané geofyzikálne údaje boli následne spracované a interpretované, pričom bol kladený dôraz na aplikáciu a vývoj viacerých interpretačných metód, s cieľom presného určenia polôh detegovaných objektov. Ďalšia časť textu je zameraná na popis výsledkov GPR meraní.

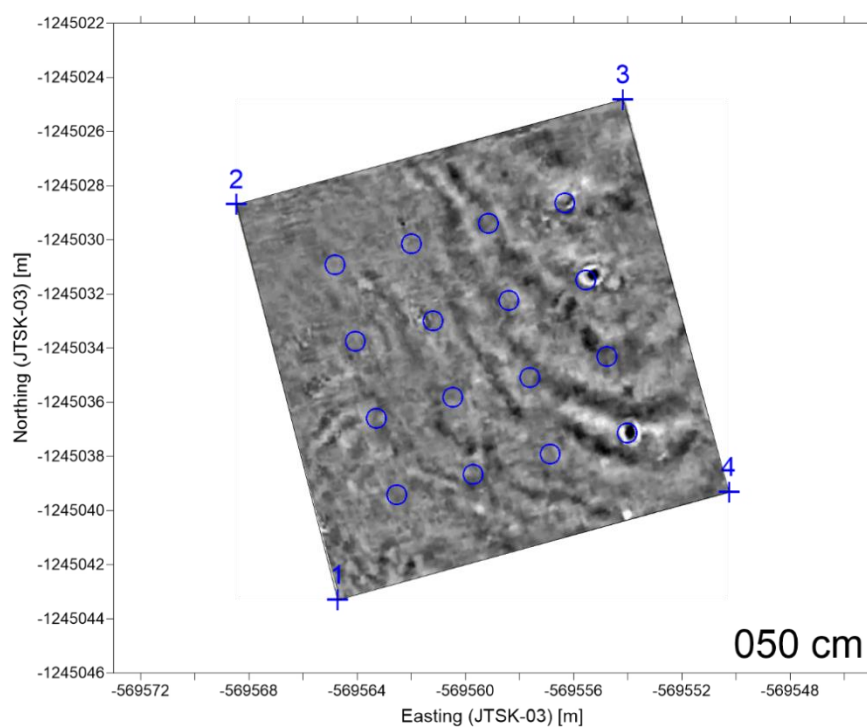
Pri GPR meraní bol použitý prístroj GSSI s radiacou jednotkou SIR-3000, spolu s 400 MHz anténou. Na základe skutočnosti, že detegované objekty majú veľmi malé rozmery (napríklad projektily vo vertikálnej polohe), bola plocha pokrytá hustou sériou profilov. Vzďialenosť medzi nimi bola iba 0,15 m. Získané údaje boli spracované pomocou programu REFLEXW (Sandmeier, 2019). V prvej etape spracovania boli z profilových meraní vytvorené 2D vertikálne radargramy. V rámci 2D spracovania boli z jednotlivých radargramov najskôr odfiltrované falošné signály a šum (použitím 1D pásmového filtra bandpassfrequency s hranicami 200/250/550/650 MHz). Ďalej bol získaný signál zosilnený pomocou tzv. zosilňovacej funkcie (gain - energy decay), čím sa zvýraznil užitočný signál v záujmových oblastiach. Rýchlosť šírenia elektromagnetických vĺn v pôdnom a horninovom prostredí bola určená pomocou analýzy tvaru (zakrivenia) difrakčných hyperbol a získaná hodnota ($v = 0,125 \text{ m/ns}$) bola použitá na prepočet času príchodu impulzov na hĺbky jednotlivých reflexov. Takto pripravené 2D vertikálne radargramy vstupovali do druhej etapy spracovania, do 3D vizualizácie (postup 3D vizualizácia profilových meraní je podrobne popísaný v podkapitole 7.3). 3D výstupy z rôznych hĺbkových úrovní sú zobrazené na obr. 7.62 až 7.69, pričom na obr. 7.62 je sumár výsledkov 3D vizualizácie a obr. 7. 63 až 7.69 ukazujú detailnejší pohľad na plošné radargramy (horizontálne amplitúdové rezy) z jednotlivých hĺbok. Na obr. 7.70 až 7.73 sú ukážky vybraných spracovaných 2D vertikálnych radargramov s interpretáciou.



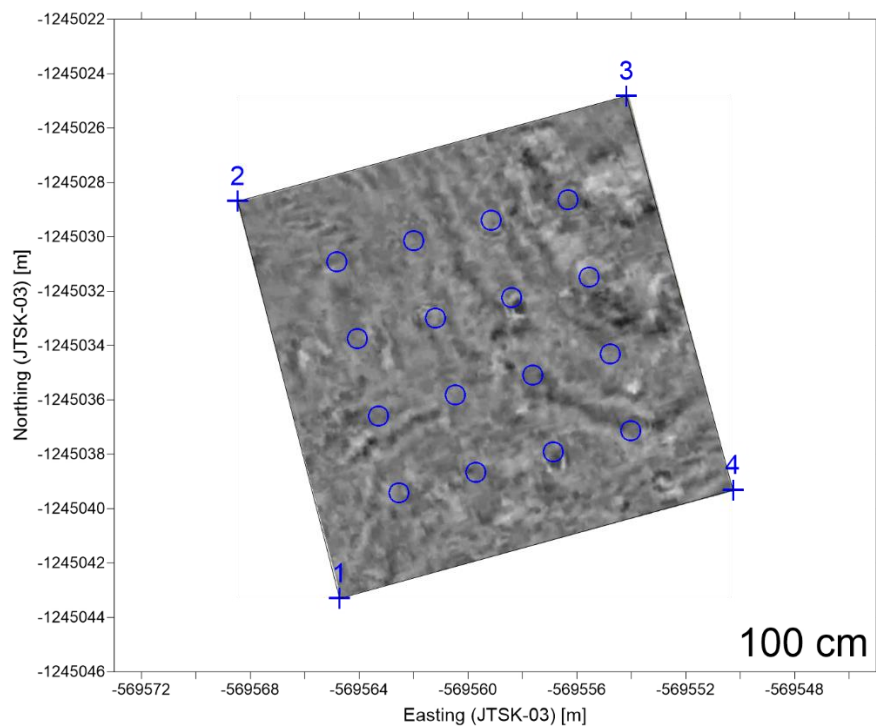
Obr. 7.63 Sumár výsledkov získaných pomocou GPR - amplitúdové horizontálne rezy pre rôzne hĺbky pod zemským povrchom: a) 25 cm, b) 50 cm, c) 100 cm, d) 150 cm, e) 175 cm, f) 200 cm.



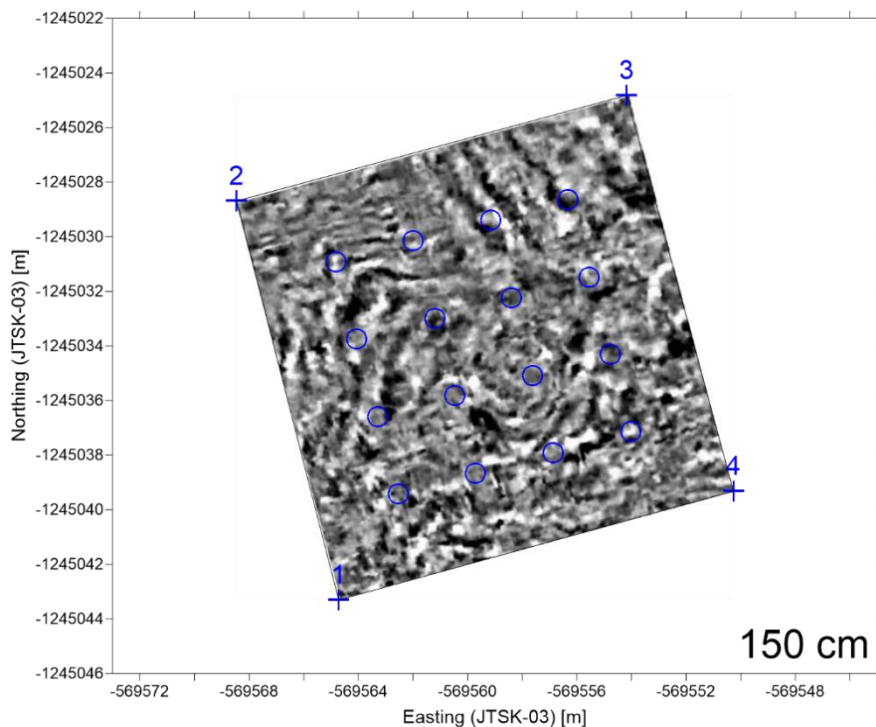
Obr. 7.64 Amplitúdový horizontálny rez z výsledkov GPR systému GSSI s 400 MHz anténou pre hĺbku 25 cm pod zemským povrchom. Polohy zakopanej munície sú znázornené modrými krúžkami.



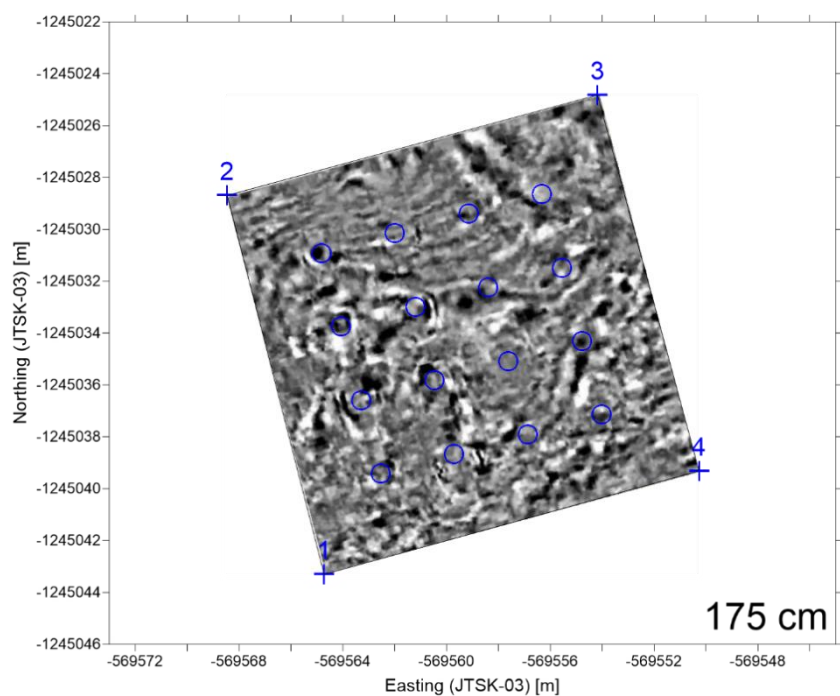
Obr. 7.65 Amplitúdový horizontálny rez z výsledkov GPR systému GSSI s 400 MHz anténou pre hĺbku 50 cm pod zemským povrchom. Polohy zakopanej munície sú znázornené modrými krúžkami.



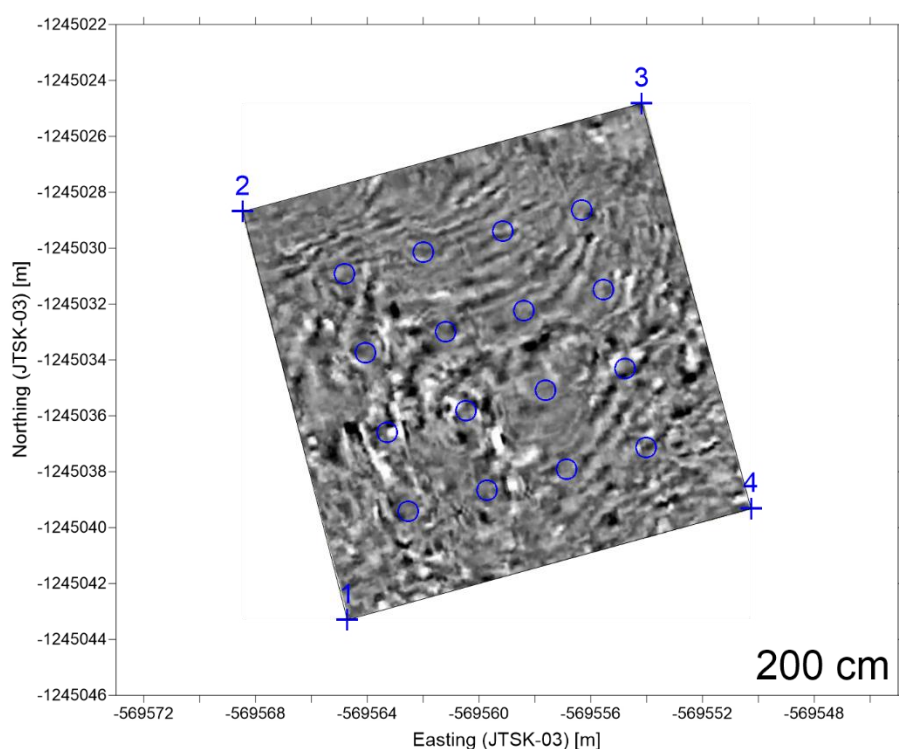
Obr. 7.66 Amplitúdový horizontálny rez z výsledkov GPR systému GSSI s 400 MHz anténou pre hĺbku 100 cm pod zemským povrchom. Polohy zakopanej munície sú znázornené modrými krúžkami.



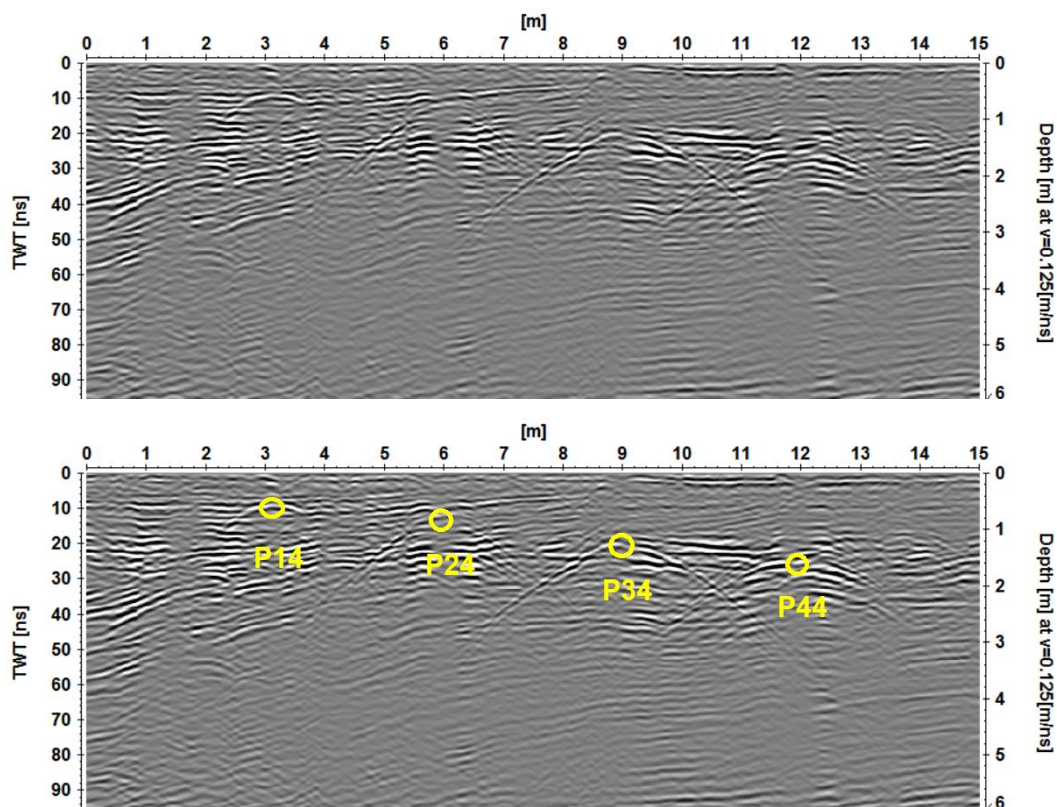
Obr. 7.67 Amplitúdový horizontálny rez z výsledkov GPR systému GSSI s 400 MHz anténou pre hĺbku 150 cm pod zemským povrchom. Polohy zakopanej munície sú znázornené modrými krúžkami.



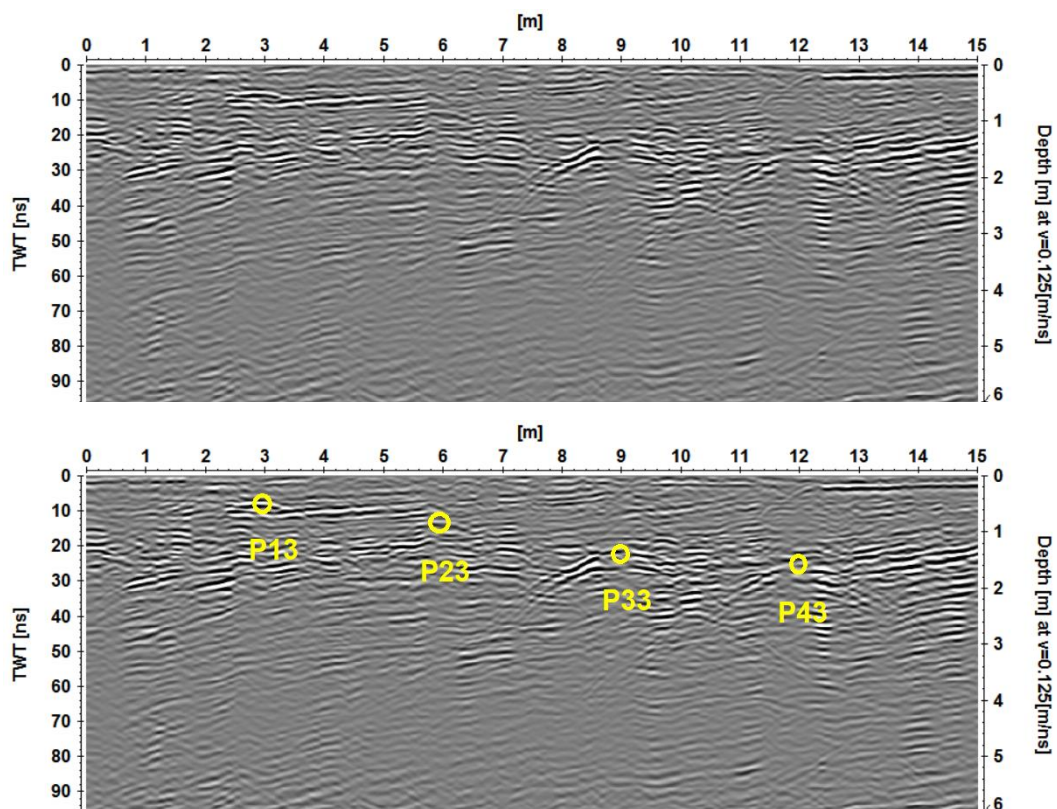
Obr. 7.68 Amplitúdový horizontálny rez z výsledkov GPR systému GSSI s 400 MHz anténou pre hĺbku 175 cm pod zemským povrchom. Polohy zakopanej munície sú znázornené modrými krúžkami.



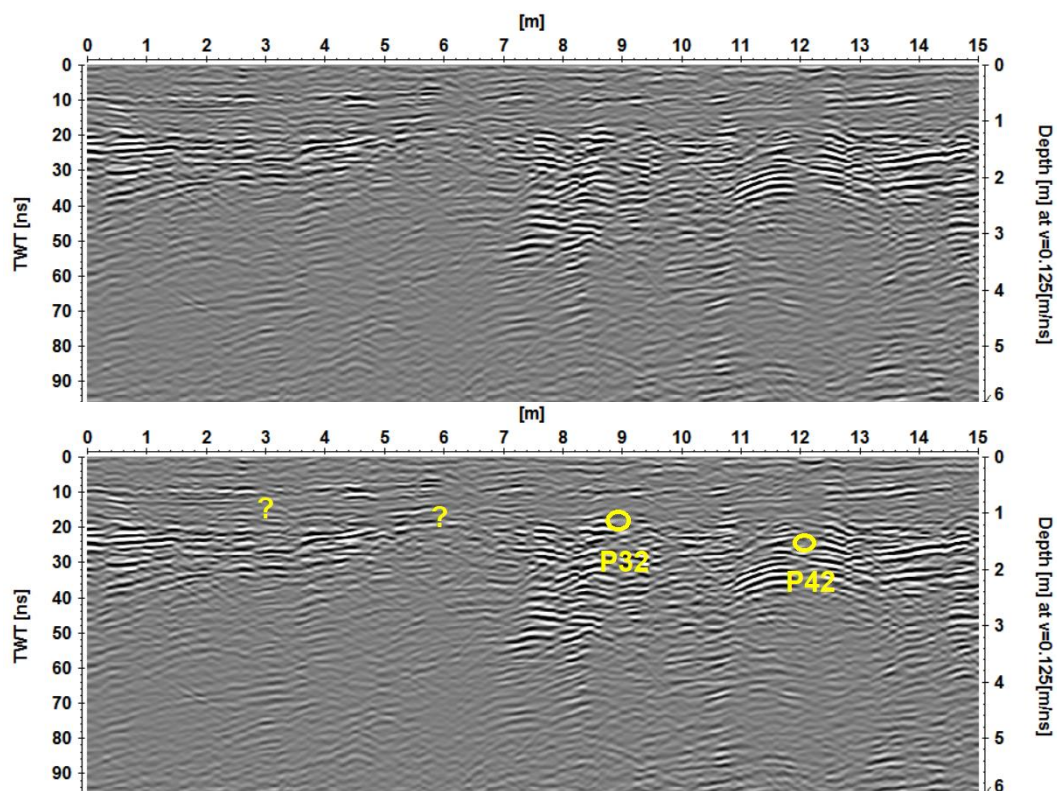
Obr. 7.69 Amplitúdový horizontálny rez z výsledkov GPR systému GSSI s 400 MHz anténou pre hĺbku 200 cm pod zemským povrchom. Polohy zakopanej munície sú znázornené modrými krúžkami.



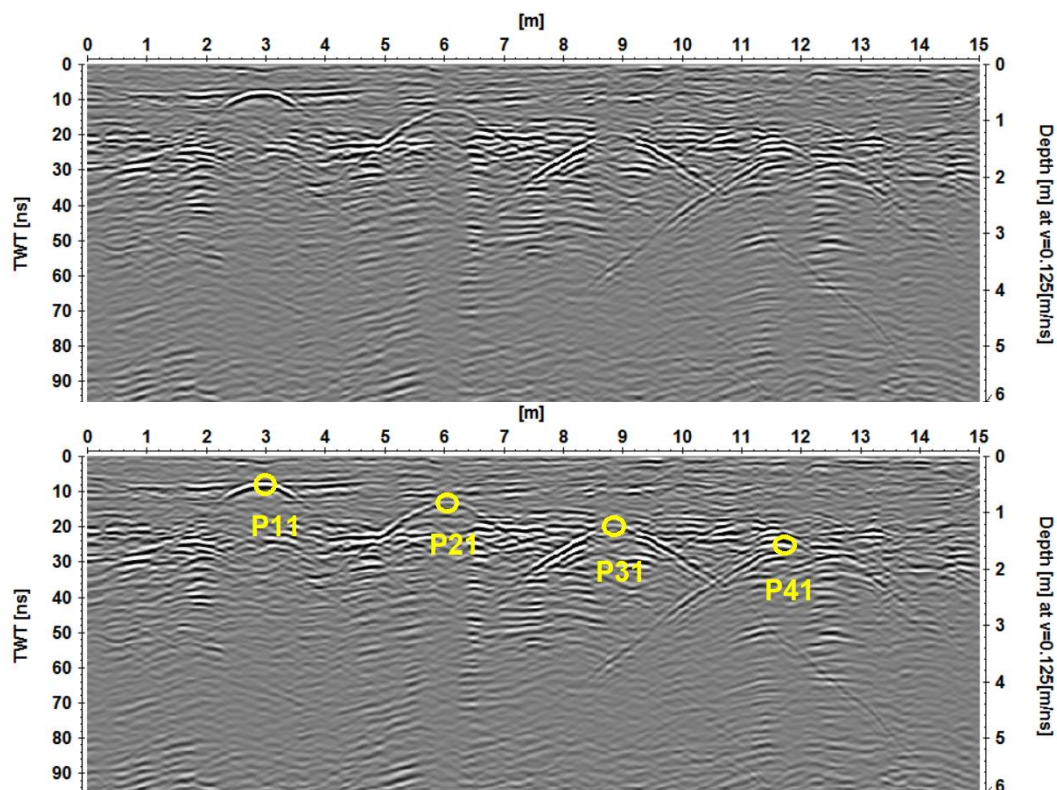
Obr. 7.70 Amplitúdový vertikálny rez z výsledkov GPR systému GSSI s 400 MHz anténou pozdĺž profilu ponad projektily P14-P44. Vrchná časť obrázka: pôvodný rez; spodná časť obrázka: rez s interpretáciou hĺbok detegovaných objektov (žlté krúžky predstavujú ich polohu).



Obr. 7.71 Amplitúdový vertikálny rez z výsledkov GPR systému GSSI s 400 MHz anténou pozdĺž profilu ponad projektily P13-P43. Vrchná časť obrázka: pôvodný rez; spodná časť obrázka: rez s interpretáciou hĺbok detegovaných objektov (žlté krúžky predstavujú ich polohu).



Obr. 7.72 Amplitúdový vertikálny rez z výsledkov GPR systému GSSI s 400 MHz anténou pozdĺž profilu ponad projektily P12-P42 (projektily uložené vertikálne, orientované zospodu nahor). Vrchná časť obrázka: pôvodný rez; spodná časť obrázka: rez s interpretáciou hĺbok detegovaných objektov (žlté krúžky predstavujú ich polohu).



Obr. 7.73 Amplitúdový vertikálny rez z výsledkov GPR systému GSSI s 400 MHz anténou pozdĺž profilu ponad projektily P11-P41. Vrchná časť obrázka: pôvodný rez; spodná časť obrázka: rez s interpretáciou hĺbok detegovaných objektov (žlté krúžky predstavujú ich polohu). Tento výsledok patrí medzi najlepšie získané výstupy z merania.

Ako je vidieť na obr. 7.63 až 7.69, na horizontálnych rezoch je možné lokalizovať jednotlivé projektily len pri najplytších hĺbkach ich uloženia, najlepšie pri hĺbke 0,5 m (obr. 7.65). V tomto prípade je dokonca možné rozpoznať aj orientáciu horizontálne uložených projektilov P11 a P13. Avšak pri zväčšovaní hĺbky sa stále viac a viac prejavujú pedologické a geologické črty okolitého prostredia (dokonca sa dá rozpoznať priebeh dún vo viatych pieskoch Záhorskej nížiny), čím sa zastierajú prejavy hlbšie uložených projektilov. Úplne iná situácia nastáva v prípade vertikálnych georadarových amplitúdových rezov (obr. 7.70 až 7.73). Na viacerých 2D vertikálnych radargramoch je možné veľmi dobre rozpoznať polohu detegovaných objektov UXO, ako vrcholy hyperbol difragovaných vln. Veľmi pekný príklad je vidieť práve na obr. 7.73, kde je zachytené postupné zväčšovanie sa hĺbky zakopaných projektilov P11 - P41. Pri najhlbšie zakopaných objektoch (v hĺbke 1,7 m) je však ich interpretácia už náročná a nie vo všetkých prípadoch sa podarilo tieto najhlbšie zakopané objekty úplne spoľahlivo interpretovať.

Uvedené výsledky použitia GPR metódy ukázali, že v prípade detekcie UXO objektov sú tieto lepšie definovateľné na 2D vertikálnych radargramoch, ako na horizontálnych amplitúdových rezoch z 3D vizualizácie. Treba si aj uvedomiť, že pri takomto prieskume musia profily pri meraní pokrývať študovanú plochu vo veľmi hustom usporiadaní, s malými rozstupmi (napr. so vzdialenosťou paralelných profilov iba 0,15 m), aby mohol byť zachytený každý potenciálny objekt. Je to dané aj tým, že objekty UXO môžu mať v niektorých smeroch veľmi malé rozmery (napr. v prípade tankových striel iba 10 cm).

7.6 Aplikácia georadaru v podzemí

Podzemné stavby závisia od horninového prostredia podstatne viac ako povrchové stavby. Sú vložené priamo do horninového masívu a je potrebné, aby stavba a prostredie spolu fungovali ako jeden celok. Preto sme sa rozhodli v rámci týchto skrípt uviesť aj príklad využitia georadaru v podzemnom stavitelstve, pričom informácie a výsledky uvedené v tejto podkapitole boli čerpané z rozsiahlej publikácie Bláha (2024).

Geofyzikálny prieskum pre podzemné diela je väčšinou používaný vo vyšších etapách prieskumu. Môže priniesť informácie o mieste vlastnej stavby alebo jej dôležitých častiach (napr. vstupné portály tunelov). Môže sa jednať o prieskum pre stavebné materiály, kontrolné merania pri prieskume a výstavbe, či práce pri prevádzke diela. Geofyzikálne metódy aplikované na stenách podzemných diel prinášajú informácie, ktoré následne umožnia optimálne navrhnuť a realizovať doplnkové geotechnické merania a skúšky do selektívne vybraných miest (cez geofyzikálnymi metódami definované anomálie a do stanovených kvázihomogénnych blokov), (Bláha, 2024).

Základným predpokladom na zaistenie bezpečnosti podzemnej stavby je znalosť horninového prostredia, jeho vlastností a zmien vyvolaných samotným podzemným dielom. Pri razení akéhokoľvek diela vznikajú v horninovom masíve zmeny. Na zmeny v týchto zónach má vplyv i pôvodná stavba a vlastnosti horninového masívu. Z geologických vlastností/zmien sa jedná o všetky diskontinuity (vrstevnatosť, lineácia, foliácia, smery porušenia,...), z fyzikálnych vlastností sú najzásadnejšie zmeny objemovej hmotnosti, rýchlosti elastických vĺn a u geotechnických vlastností sa zmeny týkajú všetkých druhov modulov pružnosti, Poissonovho čísla a stavu napätia masívu (Bláha, 2024).

Porušené zóny vzniknuté pri razení sú popisované ako Zóna poškodenia masívu (EDZ – Excavation Damage Zone). Na určenie skutočného obmedzenia EDZ zóny sa najčastejšie používajú práve georadarové merania. Treba si však uvedomiť, že princíp tejto metódy neumožňuje získať ucelené informácie akým spôsobom je masív za stenou banského diela porušený. Na to je potrebné doplniť GPR meranie meraním seizmickým (Bláha, 2024).

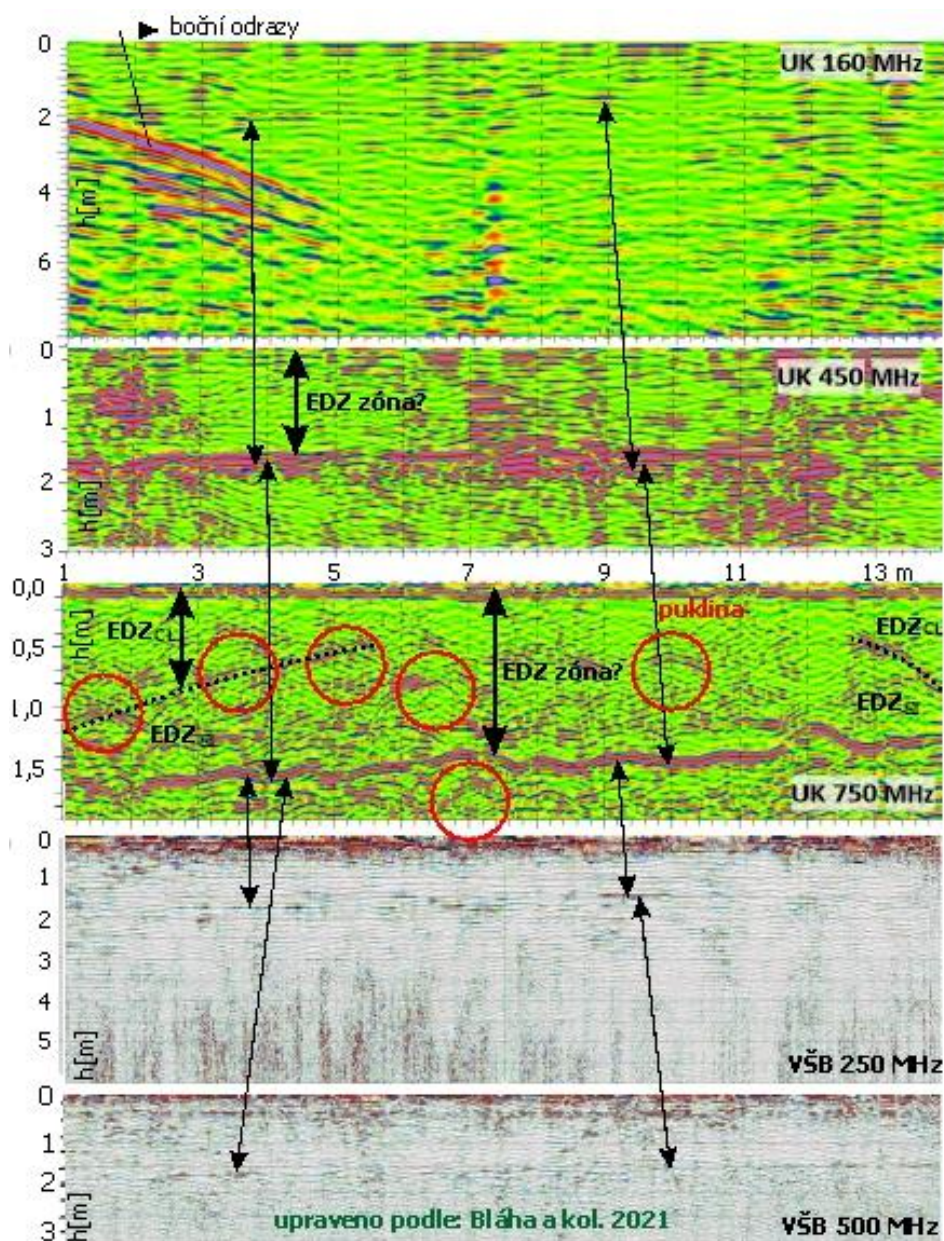
Určenie mocnosti a tvaru EDZ zóny

Táto prípadová štúdia je ukážkou využitia GPR pri zisťovaní mocnosti a tvaru EDZ zóny. Merania boli realizované na stene skúšobnej komory ZK-2 Bukov v rámci riešenia českého projektu „Rozvoj geotechnických a geofyzikálnych metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby“. Použité boli dve aparatúry RAMAC od výrobcu Malá, a to komplex označovaný ako VŠB tvorený modulom ProEx s tienenými anténami 100 MHz, 250 MHz a 500MHz; a novšia aparatúra MALA GX s novými typmi HDR antén označená ako UK. Uvádzané výsledky okrem stanovenia priebehu bázy EDZ zóny porovnávajú merania týmito dvoma systémami a tiež meria na vertikálnych a horizontálnych profiloch.

Na obr. 7.74 je zobrazených päť spracovaných radargramov, tri z merania systémom UK s anténami 160, 450 a 750 MHz a dva z merania systémom VŠB s anténami 250 a 500 MHz. Pri spracovaní bola na konverziu času na hĺbku použitá rýchlosť 0,10 m/ns. Na radargramoch získaných z merania systémom UK (obr. 7.74, prvé tri radargramy) je za stenou komory jasne zachytené výrazné rozhranie, ktoré je zhruba rovnobežné s jej stenou. Zobrazenie tvaru rozhrania sa so zvyšujúcou frekvenciou použitej antény zvyrazňuje, čo umožňuje lepšie sledovať jeho presný tvar. So zvyšujúcou frekvenciou sa tiež mierne zmenšuje vzdialenosť interpretovaného rozhrania od steny komory, pričom ale rýchlosť EM vlnenia je pre všetky frekvencie približne rovnaká. Bláha (2024) tento rozdiel pripisuje tomu, že ak má odrazná plocha (pásmo) určitú mocnosť, tak pri anténach s vyššou vysielačou frekvenciou nastáva odraz EM vln od hranice tejto zóny a pri nižších frekvenciách sa EM vlna odráža od odrazného pásma ako celku. Z geotechnického hľadiska je možné priebeh tohto výrazného rozhrania interpretovať ako bázu EDZ zóny. Na krajoch profilu meraného 750 MHz anténou boli zachytené ešte reflexné rozhrania (obr. 7.74, radargram v strede, označenie prerušovanou čiarou), ktoré by mohli oddeľovať zónu porušenia vyvolaného spôsobom prác pri razení (EDZ_{CL}, výrazné zmeny vlastností) od zóny nevratných porušení spôsobených napätím (EDZ_{SI}, veľké zmeny vlastností), (Bláha, 2024).

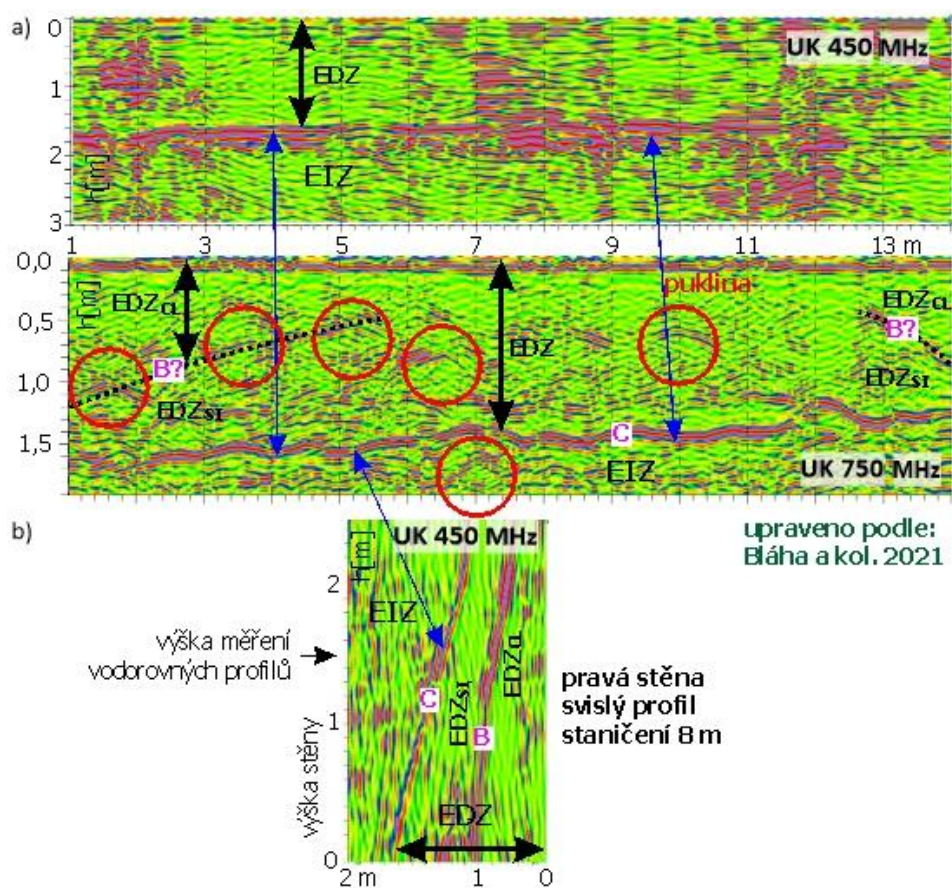
Na výsledkoch získaných meraním starším typom antén systému VŠB (obr. 7.74, dolné dva radargramy) by priebeh rozhrania bez poznatkov z merania novým typom radaru systému UK bol len ťažko interpretovateľný (Bláha, 2024).

Okrem spomínaného výrazného rozhrania predstavujúceho hranicu EDZ zóny, boli na radargrame UK 750 MHz (obr. 7.74, radargram v strede) zachytené aj prejavy rozmerovo obmedzených puklín (hyperbolický prejav rozsiahlejších puklín by mal dlhšie ramená hyperbol), označených na obr. 7.74 červenými krúžkami. Päť puklín bolo zistených v EDZ zóne, ich vznik je možné spájať s realizovanými banskými prácami. Vznik pukliny zachytenej pod EDZ zónou (v hĺbke cca 1,6 m) sa vzhľadom na predpoklad, že báza EDZ vylučuje hlbšie zmeny v masíve, pravdepodobne viaže na predchádzajúce geologické deje v horninovom masíve (Bláha, 2024).



Obr. 7.74 Výsledné radargramy z merania na pravej strane komory ZK-2, Bukov (Bláha, 2024). Šípky označujú výrazné rozhranie interpretované ako priebeh bázy EDZ zóny, kruhy označujú prejavy puklín.

Porovnanie výsledných radargramov z meraní na horizontálnych/vodorovných (obr. 7.75 a) a vertikálnych/zvislých profiloch (obr. 7.75 b) ukazuje, že na všetkých troch radargramoch je zachytená jediná identická plocha, a to báza zóny EDZ (označená C). Plocha označená na zvislom radargrame B (obr. 7.75 b) nebola na radargramoch z horizontálnych profilov detegovaná (Bláha, 2024).



Obr. 7.75 Výsledné radargramy z merania stene komory ZK-2, Bukov, porovnanie zvislého a vodorovného merania (Bláha, 2024). Šípky označujú výrazné rozhranie interpretované ako priebeh bázy EDZ zóny, kruhy označujú prejavy puklín.

Z predchádzajúcich výsledkov vyplýva, že georadarové meranie je vhodné realizovať na danom úseku banského diela po celej jeho dĺžke na viacerých profiloch, najlepšie vertikálnych i horizontálnych. Takéto merania potom umožňujú určiť priestorový priebeh výraznej odraznej plochy EM signálu, teda určiť rozsah zóny EDZ, prípadne ďalšie oblasti rôzneho stupňa porušenia horninového masívu za stenou banského diela, prípadne i zóny koncentrovaného napätia (Bláha a kol., 2021 v Bláha 2024).

Záver

Georadar (GPR) je kľúčovou geofyzikálnou technológiou pre jeho schopnosť detegovať kovové aj nekovové ciele. V posledných dekádach bol úspešne nasadzovaný pri riešení geologických úloh, v archeológii ale i rôznych iných úlohách, pri ktorých je potrebné zistiť, čo je skryté pod povrchom ako napr. aj pri vyhľadávaní nevybuchutej munície. Vďaka jednoduchosti a rýchlosti zberu dát sa stal populárnym nástrojom i v stavebníctve, ako rutinný nástroj je používaný na monitorovanie stavu konštrukcií, či kontroly výstuže v betónových konštrukciách budov. Aplikácie GPR sa rozšírili aj na mapovanie a lokalizáciu podzemných potrubí/káblov, kontrolu vozoviek, asfaltov a mostných konštrukcií.

Aj keď je využitie georadaru veľmi populárne a má mnoho výhod, musíme na druhej strane povedať, že získanie kvalitných informácií a ich interpretácia zostáva stále veľmi zložitou úlohou. To ako spoľahlivo bude georadar fungovať závisí od rôznych faktorov, ako sme sa snažili opísať v tomto učebnom texte. Hlavne to ovplyvňujú vlastností pôdy alebo hornín (ich minerálne a chemické zloženie) a stupeň vlhkosti, od ktorých závisí hĺbkový dosah a rozlíšenie georadaru. Meranie nedoporučujeme realizovať počas dažďa, alebo extrémneho sucha. Voda, ktorá sa zhromažďuje na povrchu pôdy, môže rušiť radarové vlny a intenzívne teplo môže zas ovplyvniť obsah vlhkosti v pôde. Ďalším rušivým faktorom pri meraní je samotný povrch terénu. Kvalitu merania vo veľkej miere môže ovplyvniť nerovný terén, skalnatý povrch či vysoká tráva a iná vegetácia. Čo sa týka samotnej aplikácie georadaru, tak vážnou výzvou je vytyčovanie inžinierskych sietí v mestských oblastiach. Pri detekcii podzemných inžinierskych sietí (IS) môže byť signál GPR skreslený environmentálnym šumom, ako sú korene stromov, rôzne skaly a tehly v navážkach a kultúrnych vrstvách, ktorý môže viesť k falošnej detekcii IS alebo môže maskovať slabé odrazy od IS nachádzajúcich sa hlbšie pod povrchom. Taktiež si treba uvedomiť, že je nemožné rozlíšiť funkčné inžinierske siete od nefunkčných.

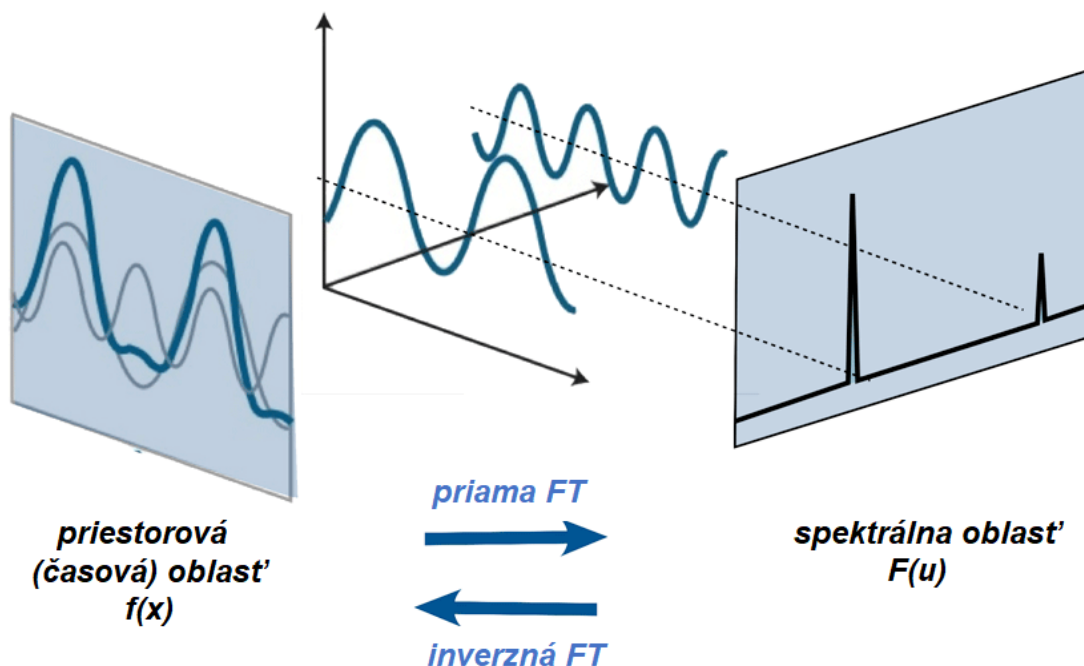
Napriek spomenutým obmedzeniam, je GPR efektívnou geofyzikálnou metódou na skenovanie podzemných štruktúr a objektov a pri správnej aplikácii sa z neho stáva veľmi silný nástroj.

Príloha – matematické základy spektrálnej analýzy a filtrácie

1 Základy spektrálnej analýzy

Pri spracovaní a interpretácii nameraných údajov v prírodných a technických vedách sa často používa **spektrálna analýza**, pri ktorej sa pracuje so spektrami vypočítanými z pôvodných (nameraných) údajov pomocou špeciálnych transformácií. Ako pôvodné údaje chápeme v geofyzike také, ktoré boli získané v **priestorovej oblasti** (merané pozdĺž profilov alebo plošne) alebo v **časovej oblasti** (merané v čase – to je prípad záznamov z observatórií, ale aj georadarových záznamov). Spektrum pre spektrálnu analýzu sa získava z pôvodných údajov pomocou špeciálnych transformácií, založených väčšinou na integrácii pôvodných údajov na určitom intervale alebo ploche. Existuje veľké množstvo takýchto transformácií, a tým pádom aj spektier. Medzi najznámejšie patrí tzv. **Fourierova transformácia** (FT). FT poskytuje určitý druh informácie o tom, akým spôsobom (podielom) sú v pôvodných údajoch zastúpené časti signálu, ktoré je možné aproximovať pomocou sínusových a kosínusových funkcií. Prechod z priestorovej (časovej) do spektrálnej oblasti zabezpečuje tzv. **priama FT**, návrat späť zo spektrálnej oblasti má na starosti **inverzná FT** (obr. A.1). S presnými matematickými základmi FT sa dá oboznámiť vo viacerých zahraničných a domácich učebniciach (napr.: Bracewell 1965, Červený 1977, James 1995, Hvoždara a Pašteka 2000, Brokešová 2008) a preto sa v tomto učebnom texte nimi nebudeme podrobnejšie zaoberať. Veľmi stručne sa však dá tento typ transformácie nazvať ako integrálna transformácia – nakoľko je v rámci nej integrovaná pôvodná funkcia, násobená so sínusovou alebo kosínusovou funkciou (pri priamej FT) a získané spektrum je potom opäť integrované s týmito funkciami pri návrate späť do priestorovej/časovej oblasti (pri inverznej FT).

Výsledkom priamej FT je tzv. **Fourierove spektrum** – funkcia $F(u)$. Funkcia $F(u)$ je komplexnou funkciou (má reálnu a imaginárnu zložku) **spektrálnej premennej** u . Spektrálna premenná u sa často označuje ako **frekvencia** f , keď ide o analýzu časových údajov (s fyzikálnou jednotkou [Hz], resp. $[s^{-1}]$) alebo sa označuje ako **vlnové číslo** k , keď ide o analýzu priestorových údajov (fyzikálna jednotka je $[m^{-1}]$, resp. [cycles/m]).



Obr. A.1 Prechod medzi priestorovou (časovou) a spektrálnou oblasťou pomocou priamej a inverznej Fourierovej transformácie (u – spektrálna premenná). Obrázok je upravený z podkladu od Spritle Software (internetový zdroj 8).

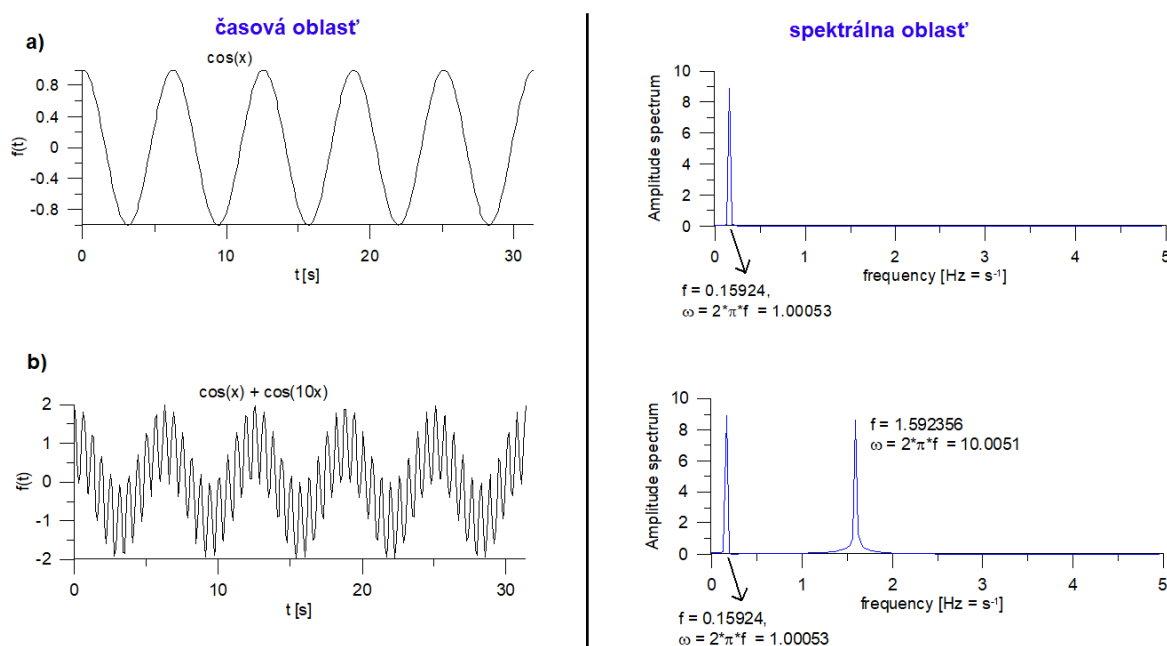
Keďže je Fourierove spektrum v zásade komplexnou funkciou, vyvinuli sa rôzne techniky na jeho grafickú prezentáciu. Namiesto samostatného zobrazenia jeho reálnej a imaginárnej zložky sa často zobrazuje tzv. **amplitúdové** spektrum $\text{Amp}(u)$ alebo **výkonové** (power) spektrum $\text{Pow}(u)$:

$$\text{Amp}(u) = \sqrt{\text{Re}^2 \{F(u)\} + \text{Im}^2 \{F(u)\}} \text{ alebo } \text{Pow}(u) = \text{Re}^2 \{F(u)\} + \text{Im}^2 \{F(u)\}, \quad (\text{A-1})$$

kde $\text{Re}\{\}$ a $\text{Im}\{\}$ predstavujú reálnu a imaginárnu zložku Fourierovho spektra $F(u)$. Okrem uvedených základných spektier existujú vo Fourierovej spektrálnej analýze aj tzv. fázové a logaritmické spektrá (viac detailov je možné nájsť v uvedených literárnych zdrojoch).

Vo Fourierových spektrách je možné okrem hlavných zložiek analyzovaného signálu (funkcie) vidieť aj prejav šumu a nesystematických chýb vo vstupných údajoch. Hlavné zložky signálu sa väčšinou ukazujú v spektrách ako izolované vrcholy (tzv. spikes, obr. A.1 a A.2, vpravo) pri nižších hodnotách spektrálnej premennej. Šum a nesystematické chyby sa prejavujú pri vyšších hodnotách spektrálnej premennej, v pravej časti spektra. Hraničná (najvyššia) hodnota spektrálnej premennej

sa nazýva ako **Nyquistova frekvencia** alebo **číslo** a je daná vzťahom $u_N = 1/(2\Delta t)$, kde Δt je vzorkovací krok v časovej (priestorovej) oblasti. Ak je pôvodný signál ovzorkovaný s nedostatočne malým krokom, inými slovami: ak je Nyquistova frekvencia príliš malá, tak dochádza ku deformácii spektra v oblasti vyšších hodnôt spektrálnej premennej (tzv. aliasing), t.j. neovzorkované zložky signálu sa presúvajú spoza Nyquistovej frekvencie do vysokofrekvenčnej časti spočítaného spektra a deformujú ho.



Obr. A.2 Príklad amplitúdového spektra pre signál pozostávajúci z jednej kosínusovej funkcie (a) a z dvoch zložených kosínusových funkcií (b). Polohy vrcholov (špicov) v amplitúdovom spektre definujú uhlové frekvencie hlavných zložiek analyzovaného signálu: $1 \text{ rad}\cdot\text{Hz}$ a $10 \text{ rad}\cdot\text{Hz}$ (f – bežná frekvencia, ω – uhlová frekvencia).

Amplitúdové alebo výkonové spektrum nemusí mať vždy charakter výskytu izolovaných vrcholov, ako je to viditeľné na jednoduchom príklade uvedenom na obr. A.2. Často sa hlavná časť informácií koncentruje v jeho ľavej časti (pre nižšie hodnoty spektrálnej premennej), v niektorých odvetviach teoretickej a aplikovanej fyziky sa to zvykne nazývať ako tzv. „červené spektrum“. Takéto spektrum sa síce kvalitatívne ťažšie posudzuje (v porovnaní s jednoduchým vrcholovým spektrom),

napriek tomu však poskytuje cenné informácie o prítomnosti šumu a chýb v pôvodných údajoch (tieto sa prejavujú v časti spektra s vyššími hodnotami spektrálnej premennej).

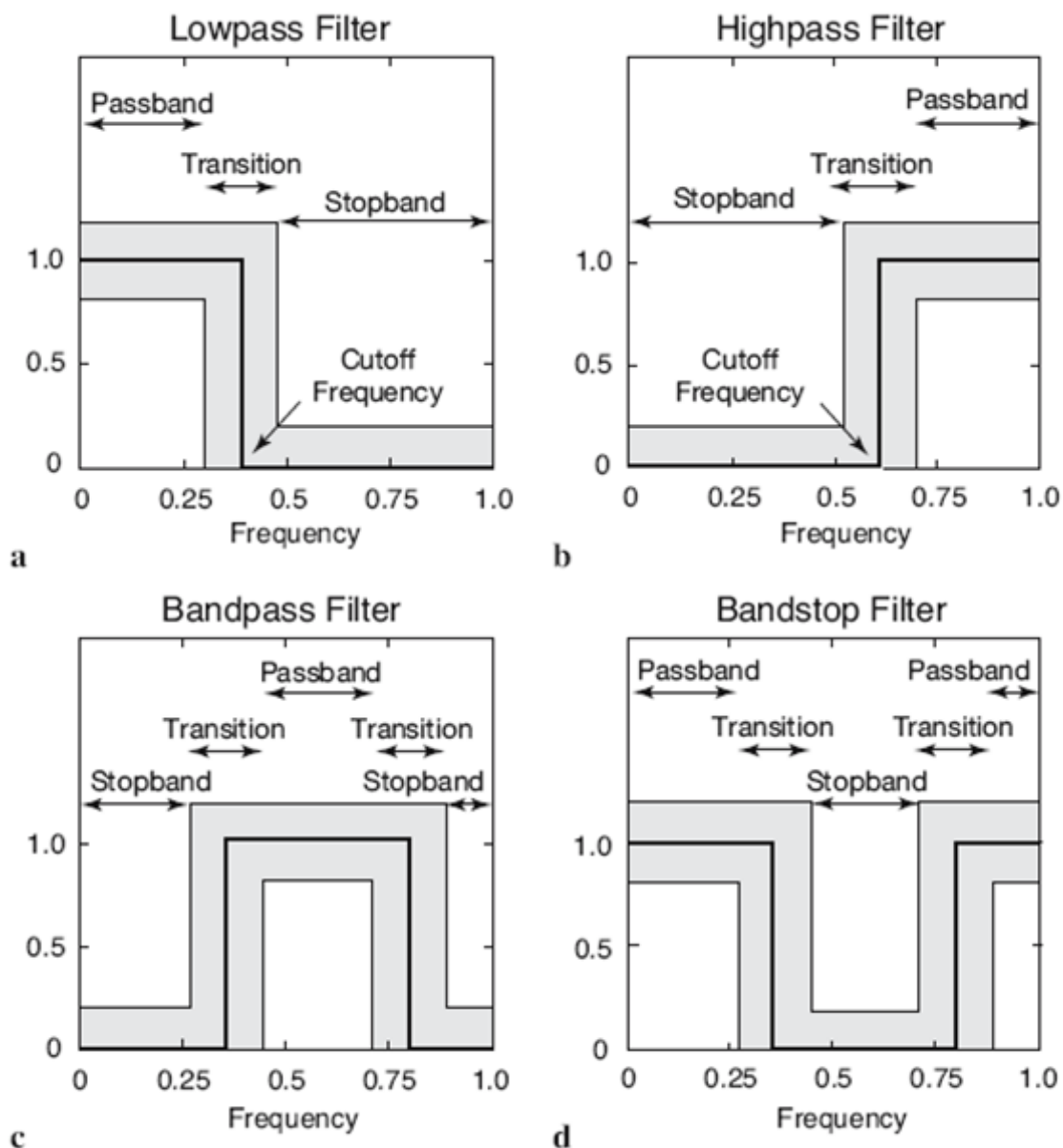
Pri niektorých pokročilých spracovateľských krokoch sa používajú aj dvojrozmerné spektrá, označované aj ako tzv. f-k spektrá (Sandmeier, 2020). V prípade ich výpočtov sa realizuje Fourierova transformácia zvlášť pozdĺž časovej osi radargramu (TWT) a zvlášť pozdĺž horizontálnej vzdialenosti na radargrame. Viac informácií o dvojrozmerných spektrách je možné získať v odporúčanej literatúre (napr. Červený 1977, Sandmeier 2020).

Poznámka: Pri práci so spektrálnou premennou (frekvenciou) v rámci spektrálnej analýzy je potrebné si uvedomiť, že táto frekvencia je úplne rozdielna oproti frekvencii, na ktorej vysiela georadrová anténa (napr. 100, 200 alebo 400 MHz). Frekvencia v spektrálnej analýze súvisí s krokom, s akým je ovzorkovaný signál na jednotlivých stopách georadarového záznamu. Napríklad: ak máme v aparátúre GSSI nastavený rozsah zaznamenananej stopy na 40 ns a počet záznamov na 2048, tak uvedený záznam stopy bude ovzorkovaný s krokom $\Delta t = 40 \cdot 10^{-9} / (2048) = 1,9531 \cdot 10^{-11}$ s. Nyquistova hraničná frekvencia bude potom rovná hodnote: $u_N = 1 / (2\Delta t) = 2,56 \cdot 10^{10}$ Hz = 25 600 MHz.

2 Filtrácia údajov v spektrálnej oblasti

Filtrácia údajov je založená na potlačení/zvýraznení určitých zložiek v pôvodných nameraných údajoch (v signáli). Existuje mnoho rôznych spracovateľských a interpretačných dôvodov pre realizovanie filtrácie, často je však zameraná na odstránenie šumu a nesystematických chýb z pôvodného signálu. Samotnú filtráciu je možné realizovať priamo v priestorovej (časovej) alebo v spektrálnej oblasti. Práve spektrálna oblasť umožňuje zhodnotiť (kategorizovať) filtre podľa ich schopností prepúšťať/zachovať určité zložky a časti z filtrovaných údajov. Z tohto pohľadu sa často stretávame s tzv. **dolnopriepustnými (lowpass)** a **hornopriepustnými (highpass)** filterami – podľa toho, akú časť spektra dokážu prepustiť (obr. X-3). Nízko-priepustné filtre majú vo všeobecnosti vyhladzujúce vlastnosti – potláčajú vysokofrekvenčné zložky (často šum). Okrem uvedených dvoch základných typov filtrov poznáme aj filtre, ktoré prepúšťajú (**bandpass, pásmová priepusť**) alebo zastavujú (**bandstop, pásmová zdrž**) určitú časť obsahu spektra

(napríklad pri niektorých meraniach je potrebné odstraňovať prejav premenlivej zložky EM spektra v okolí používanej frekvencie 50 Hz siete striedavého prúdu). Grafy v obrázku A.3 sa často nazývajú ako **spektrálne charakteristiky filtrov** a v tomto prípade majú ideálny tvar – prechody (transitions) medzi ich časťami sú skokové.

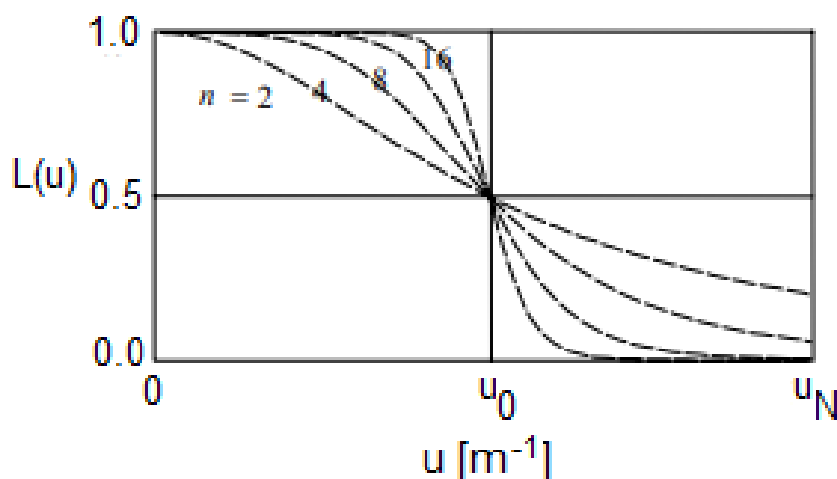


Obr. A.3 Ideálne spektrálne charakteristiky rôznych typov filtrov.

Skutočné tvary týchto grafov sú však často iné – prechody medzi ich časťami bývajú hladšie. Ako typický príklad uvedeného typu filtra si tu uvedieme charakteristiku $L(u)$ tzv. Butterworthovho filtra (Butterworth 1930, Geosoft Magma tutorial 2004):

$$L(u) = \frac{1}{1 + (u/u_0)^n}, \quad (\text{A-2})$$

kde u_0 je tzv. centrálna spektrálna premenná filtra a n je stupeň filtra. Obr. A.4 ukazuje priebehy $L(u)$ pre rôzne hodnoty stupňa filtra ($n = 2, 4, 8, 16$) vo vzťahu (A-2), pričom je vidieť že pre vyššie hodnoty tohto stupňa (napr. $n = 16$) sa približuje ku ideálnemu tvaru lowpass filtra z obr. A.3a. Účinkovanie tohto filtra je treba chápať tak, že v jeho prvej polovici (pre $u < u_0$) prepustí informácie zo spektra filtrovaného signálu a v jeho druhej polovici (pre $u > u_0$) ich potlačí (obr. A.4).



Obr. A.4 Tvary spektrálnej charakteristiky $L(u)$ pre Butterworthov lowpass filter pre rôzne hodnoty stupňa filtra n (upravené podľa Geosoft Magmap tutorial, 2004).

V spracovateľskom programe ReflexW je použitie Butterworthovho filtra (menu Processing -> 1D-Filter -> bandpassbutterworth) upravené takým spôsobom, že sú aplikované dva tieto filtre a vytvárajú prepúšťanie (bandpass) časť obsahu spektra podľa nastavených hodnôt frekvencií „lower cutoff“ a „upper cutoff“. Typické hodnoty parametra „lower cutoff“ sú 50 až 100 MHz, pri parametri „upper cutoff“ to býva 400 až 500 MHz, avšak uvedené hodnoty sa môžu meniť pri menej a viac zašumených dátach.

Použitá literatura

- Alongi, T., Clemena, G.G., Cady, P.D., 1992: Condition Evaluation of Concrete Bridges relative to Reinforcement Corrosion, Vol. 3, SHRP Report SHRP-S/FR-92-105, Washington, D.C.
- Annan, A.P. 2004: GPR Principles, Procedures & Applications. Sensors & Software Inc., Canada, p 293.
- Berg, F., 1984: Ikke destruktiv måling af lagstykkelser i vejbe fastelser. Vejdirektoratet, Statens vejlaboratorium, Notat 157, Denmark.
- Birtwistle, A., Utsi, E., 2008: The use of ground penetrating radar to detect vertical subsurface cracking in airport runways. In Proceedings of the 12th International Conference on Ground Penetrating Radar.
- Bláha, P., 2024: Geofyzika pro podzemní stavitelství. Geotest, a.s., Brno, 372 s.
- Bláha, P., Duras, R., Gebauer, J., 2021: Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby FV20294, Závěrečná správa etapy B, Výzkum použití geofyzikálních metod. Geotest, Brno, s. 331.
- Bracewell, R.N., 1965: The Fourier Transform and Its Applications. McGraw Hill (Third Edition, 2000).
- Brokešová, J., 2008: Teoretické základy Fourierovy spektrální analýzy. MFF UK Praha.
- Butterworth, S., 1930: On the Theory of Filter Amplifiers. Experimental Wireless and the Wireless Engineer, 7, 536–541.
- Cabrera, R.A., 2007: Geoscanners AB. AN002112109ENrev2.0. [cit 2.3.2025] Dostupné na: <http://geoscanners.es/apnotes/antres.pdf>
- Cassidy, N., 2008: Introduction to gpr. In Workshop at the 12th International Conference on Ground Penetrating Radar.
- Curtis, J.O., 1999: An Overview of Jefferson Proving Ground UXO Technology Demonstration (Phase III). Technical Report EL-99-12, U.S. Army Environmental Center and U.S. Army Corps of Engineers, Washington DC.
- Červený, V., 1977: Fourierova spektrální analýza. MFF UK, Praha.
- Daniels, J.J., 2000: Ground penetrating radar fundamentals, Prepared as an appendix to a Report to the U.S. EPA, Region V, Nov. 25, Ohio State University, Columbus, 1-21.
- Daniels, D., 2004: Ground penetrating radar. The Institution of Electrical Engineers.
- Daniels, D. J., Gunton, D. J., Scott, H. F., 1988: Introduction to subsurface radar: IEE Proceedings, 135, F, 4, 278–320.

- Davidson, N.C., Chase, S.B., 1998: Radar Systems for Topographic Bridge Deck Inspection. Proceeding of the Seventh International Conference on Ground Penetrating Radar, May 27–30, 1998, Lawrence Kansas. Volume 2: 747–751.
- Davis, J.L., Rossiter, J.R., Mesher, D.E., Dawley, C.B., 1994: Quantitative Measurement of Pavement Structures Using Radar. Proceedings of 5th International Conference on Ground Penetrating Radar, Kitchener, Ontario, Canada, 319–334.
- Dojack, L., 2012: Ground Penetrating Radar Theory, Data Collection, Processing, and Interpretation: A Guide for Archaeologists. [cit 18.3.2025] Dostupné na: <https://open.library.ubc.ca/collections/graduateresearch/42591/items/1.0086065>.
- Emilsson, J., Englund, P., Friberg, J., 2002: A Simple Method for Estimation of Water Content of Roadbeds Using Multi-Offset GPR. Proceedings of the Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, April 29–May 2, 2002, Santa Barbara, California. Eds S Koppenjan & H Lee. roc. of SPIE, Vol 4758: 422–426.
- Everett, M. E., 2013: Near-Surface Applied Geophysics. Cambridge University Press, 442 p.
- Gajdoš, V., 2013: Elektromagnetické vlastnosti hornín. VŠ skriptá, KAEG PriF UK, Bratislava, 97 s.
- Geosoft Magmap tutorial, 2004: Geosoft Oasis Montaj Magmap (2D-FFT) tutorial. Manuskript, manuál, 72 s.
- Goodwin, R., Cassidy, N., 2008: Gpr characteristics of magnetite-rich layered igneous bodies. In Proceedings of the 12th International Conference on Ground Penetrating Radar.
- Johansson, H.G., 1987: Användning av georadar I olika vägverksprojekt. Vägverket, Serviceavdelning Väg och brokonstruktion, Sektionen för geoteknik, Publ. 1987:59, Sweden.
- Hvoždara, M., Pašteka, R., 2000: Matematické základy teórie geofyzikálnych metód II. PriF UK Bratislava.
- James J.F., 1995: A Student's Guide to Fourier Transform. Cambridge University Press (Third Edition, 2011).
- Jol, H.M., 2009: Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 509 p.
- Keithley, J.F., 1999: The story of electrical and magnetic measurements: from 500 B.C. to the 1940s. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, New York.

- Manacorda, G., Morandi, D., Sparri, A., Staccone, G., 2002: A Customized GPR System for Railroad Tracks Verification. Proceedings of the Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, April 29– May 2, 2002, Santa Barbara, California. S Koppenjan & H Lee (Eds) Proc. of SPIE, Vol 4758: 719–723.
- Maser, K.R., 1994: Highway speed radar for pavement thickness evaluation. Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar, Vol. 2 of 3, June 12–16, Kitchener, Ontario, Canada, pp. 423–432.
- Maxwell, J. C., 1861: On physical lines of force [online]. Philosophical Magazine and Journal of Science. [cit 13.12.2015] Dostupné na: <http://goo.gl/nfk1Fk>.
- Maxwell, J. C., 1865: A Dyanamical Theory of the Electromagnetic Field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 155: 459–512. doi:10.1098/rstl.1865.0008 [cit 13.5.2025] Dostupné na: <https://www.bem.fi/library/1865-001.pdf>.
- Mesher, D.E., Dawley, C.B., Davies, J.L., Rossiter, J.R., 1995: Evaluation of New Ground Penetrating Radar Technology to Quantify Pavement Structures. Transportation Research Record 1505: 17– 26.
- Morey, R., 1998: Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities. Synthesis of Highway Practice 255, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Academy Press.
- Pašteka, R., Putiška, R., Nogová, E., Andrásy, E., Kadecký, J., 2021: Výskumná úloha PPZ-OAI1-2021/004009-104: „Tvorba testovacej plochy na detekciu nevybuchnutej munície pomocou geofyzikálnych metód“. Záverečná správa, manuskript Katedry inžinierskej geológie, hydrogeológie a aplikovanej geofyziky, 39 s.
- Pašteka, R., Karcol, R., Kušnirák, D., Nogová, E., Andrásy, E., 2023: Creation of the first UXO detection test site in Slovakia at the Rohožník military training range. Contributions to Geophysics and Geodesy, Vol. 53/1, 23–42. [cit 30.5.2025] Dostupné na: <https://www.bem.fi/library/1865-001.pdf> <https://journal.geo.sav.sk/cgg/article/view/439>
- Persico, R. , Catapano, I., Esposito, G. , Morelli, G., De Martino, G., Capozzoli, L., 2024: GPR Mapping of Cavities in Complex Scenarios with a Combined Time–Depth Conversion. Sensors, 24, 3238. <https://doi.org/10.3390/s24103238>.
- Putiška, R., Brixová, B., Bednarik, M., Budinský, V., Prekopová, M., Kultam, V., 2024: GPR detection of voids under concrete communications (case study). EGRSE, 31, 2 , s. 57-73. [cit 30.5.2025] Dostupné na: https://www.caag.cz/egrse/2024-02/04_putiska.pdf
- Saarenketo, T., 1999: Road analysis, an advanced integrated survey method for road condition evaluation. Proceedings of the COST Workshop on Modelling and Advanced testing for Unbound and Granular materials, January 21–22. Lisboa, Portugal.

- Saarenketo, T., 2006: Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys. Acta Universitatis Ouluensis. A Scientiae Rerum Naturalium 471, Finland: University of Oulu. [cit 17.5.2025] Dostupné na: <https://oulurepo.oulu.fi/bitstream/handle/10024/37460/isbn951-42-8222-.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Saarenketo, T., Roimela, P., 1998: Ground penetrating radar technique in asphalt pavement density quality control. Proceeding of the Seventh International Conference on Ground Penetrating Radar, Vol. 2, May 27–30, 1998, Lawrence KS, pp. 461–466.
- Saarenketo, T., Scullion, T., 2000: Road evaluation with ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics, Volume 43, Issues 2–4, Pages 119-138, ISSN 0926-9851. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X)
- Sandmeier, K.J., 2020: REFLEXW, Version 9.5. User's guide, Manuscript, Karlsruhe.
- Schmelzbach, C., Huber, E., 2015: Efficient Deconvolution of Ground-PenetratingRadar Data. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 53, NO. 9, p. 5209 - 5217. [cit 4.8.2023] Dostupné na: www.researchgate.net/publication/276124774_Efficient_Deconvolution_of_Ground-Penetrating_Radar_Data.
- Scullion, T., Saarenketo, T., 1998: Applications of ground penetrating radar technology for network and project level pavement management survey systems. Proceedings of the 4th International Conference on Managing Pavements, Durban, South Africa, 17th–21st May 1998.
- Scullion, T., Lau, C.L., Chen, Y., 1992: Implementation of the Texas Ground Penetrating Radar System, Report No. FHWA/TX-92/1233-1, Texas Department of Transportation.
- Scullion, T., Lau, C.L., Chen, Y., 1994: Pavement evaluations using ground penetrating radar. Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar, Vol. 1 of 3, June 12–16, Kitchener, Ontario, Canada, pp. 449–463.
- Simms, J.E., Larson, R.J., Murphy W.L., Butler D.K. 2004: Guidelines for Planning Unexploded Ordnance (UXO) Detection Surveys. US Army Corps of Engineers. ERDC/GSL TR-04-8. Správa, 88 s. [cit 30.5.2025] Dostupné na: <https://erdc-library.erdcdren.mil/server/api/core/bitstreams/81b728f8-89c7-4ef8-e053-411ac80adeb3/content>
- Reynolds, J.M., 2011: An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons, Ltd., ISBN 9778-0-471-48535-3, 712 p.
- Robitaille, G., Adams, J., O'Donnell, C., Pope, B., 1999: Jefferson Proving Ground Technology Demonstration Program Summary. Army Environmental Center Report Number: SFIM-AEC-ET-TR-99030, 20 p.

- Tábořík, P., 2022: Sdružené interpretace geofyzikálních měření jako klíč k pochopení vývoje reliéfu. Disertační práce. Univerzita Karlova Přírodovědecká fakulta, Praha,
- Terray , M., 2021: Podklady ku meraniu, spracovaniu a interpretácii GPR meraní. Písomná komunikácia a konzultácie.
- Wai-Lok Lai, W., Dérobert, X., Annan, P., 2018: A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis. NDT & E International, Volume 96, 58-78. [cit 18.3.2025] Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869517300178>.
- Warren, C., 2009: Numerical modelling of high-frequency Ground-Penetrating Radar antennas. Thesis or Dissertation, The University of Edinburgh, 225 p. [cit 18.3.2025] Dostupné na: <https://era.ed.ac.uk/handle/1842/4074>.
- Yelf, R., Yelf, D., 2004: Where is True Time Zero? Conference Paper In Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, Delft, The Netherlands, 21–24 June 2004; Univ. of Technology: Delft, The Netherlands. [cit 4.3.2023] Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/4095801_Where_is_true_time_zero#fullTextFileContent.
- Yilmaz, O., 2001: Seismic data analysis. Society of Exploration Geophysicists Tulsa, Okla.
- Youn, H.S., 2007: Development of unexploded ordnances (UXO) detection and classification system using ultra wide bandwidth fully polarimetric ground penetrating radar (GPR) [Doctoral dissertation, Ohio State University]. OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center. [cit 30.5.2025] Dostupné na: http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1174510001
- Young, H.D., Freedman, R.A., 2004: Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics. 11th Edition, Pearson Addison Wesley, San Francisco, 1374.
- Internetový zdroj 1: <https://kf.fei.tuke.sk/video/elektromagneticke-pole-v-okoli-anteny.html>
- Internetový zdroj 2: <https://www.guidelinegeo.com/help-articles/high-dynamic-range/>
- Internetový zdroj 3: <https://www.land-scope.com/designing-a-gpr-survey/>
- Internetový zdroj 4: http://www.terray.sk/?mala_gpr&gid=18
- Internetový zdroj 5: <https://scantech.ie/scantech-about-gpr.html>
- Internetový zdroj 6: <https://www.gp-radar.com/manuals/ground-penetrating-radar-dielectrics>
- Internetový zdroj 7: <https://sk.wikipedia.org/wiki/Bet%C3%B3n>
- Internetový zdroj 8: <https://www.spritle.com/>

Bibiana Brixová, René Putiška, Roman Pašteka

Georadar – základy merania, spracovania a interpretácie

Vydala Univerzita Komenského v Bratislave, 2025

Rozsah 157 strán, 12,50 AH, prvé vydanie,
vyšlo ako elektronická publikácia

ISBN 978-80-223-6082-1 (online)

ISBN 978-80-223-6082-1 (online)