

UNIVERZITA PARDUBICE

DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

Jiří Kölbl

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Mapování inženýrských sítí pomocí GPR
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jiří Kölbl**
Osobní číslo: **D20825**
Studijní program: **B0732A260009 Dopravní stavitelství**
Téma práce: **Mapování inženýrských sítí pomocí GPR**
Zadávající katedra: **Katedra dopravního stavitelství**

Zásady pro vypracování

Na základě rešerše literatury a vlastních zkušeností z měření a zpracování GPR dat vypracujte analýzu možností využití GPR pro mapování inženýrských sítí. Uveďte základní principy fungování této technologie a zhodnoťte současné metody. Dále popište Vámi používané zařízení a programové vybavení. V praktické části proveďte sérii měření na vybraných lokalitách. Proveďte vyhodnocení získaných dat a formulujte vlastní doporučení a závěry.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

TILLARD, Sylvie. Analysis of GPR data: wave propagation velocity determination. Journal of applied geophysics [online]. 1995, 33(1-3), 77-91. ISSN 0926-9851.

- DANIELS, David J. Ground penetrating radar [online]. B.m.: let, 2004 [vid. 2015-08-11].
- TP 233 – Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací

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

Datum zadání bakalářské práce: **12. října 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2024**

LS.

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

Ing. Aleš Šmejda, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 13. října 2023

Prohlašuji:

Práci s názvem „Mapování inženýrských sítí pomocí GPR“ jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 14. 05. 2024

Jiří Kölbl v.r.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladislavu Boreckému, Ph.D. za neocenitelnou pomoc, odborné vedení a cenné rady, které mi poskytl v průběhu vypracování této práce.

Mé rodině za motivaci a podporu při studiu.

ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá možností využití georadaru při lokalizaci podzemních inženýrských sítí. V teoretické části jsou popsány základní principy a vlastnosti georadaru, metody práce, nastavení georadaru a je zde vypracována, na základě rešerše literatury, analýza současného použití GPR při lokalizaci inženýrských sítí. V praktické části se práce věnuje experimentálnímu měření na vybraném úseku ulice Národní v Trutnově. Součástí práce je vyhodnocení získaných dat a následné porovnání nalezené geometrické polohy inženýrských sítí se skutečnou polohou zaměřenou při pokládce inženýrských sítí.

KLÍČOVÁ SLOVA

georadar, inženýrské sítě, mapování, nedestruktivní metoda

TITLE

Utility mapping using GPR

ANNOTATION

The bachelor thesis explores the potential Ground Penetrating Radar (GPR) in locating underground utilities. The theoretical part covers the basic principles and characteristics of GPR, working methods, GPR setup and a analysis of the current use of GPR in utility location based on a literature review. The practical part of the thesis is focused on the implementation of experimental measurements on a selected section of the Národní Street in Trutnov. This work involves evaluating the obtained data and comparing the geometric position of utilities found with th actual position measured during their installation.

KEYWORDS

ground penetrating radar, utility, mapping, non-destructive method

OBSAH

ÚVOD A CÍLE PRÁCE	12
1 TEORETICKÁ ČÁST	13
1.1 Historie GPR.....	15
1.2 Princip fungování GPR.....	17
1.2.1 Elektromagnetické vlnění	17
1.2.2 Konstrukce GPR	19
1.2.3 Antény a jejich frekvence	20
1.3 Metody sběru a zpracování dat	22
2 APLIKACE GPR.....	25
2.1 Použití GPR při lokalizaci IS.....	26
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
3.1 Použitý HW a SW.....	30
3.1.1 Řídící jednotka DAD Fast Wave	31
3.1.2 Použité antény.....	32
3.1.3 Programové vybavení	33
3.2 Lokalita a způsob měření.....	34
3.3 Zpracování naměřených dat.....	39
3.3.1 2D zpracování dat	39
3.3.2 3D zpracování dat	40
3.4 Interpretace výsledků měření.....	40
3.4.1 Interpretace dat z oblasti A	40
3.4.2 Interpretace dat z oblasti B	43
3.4.3 Interpretace 2D dat z oblasti C	44
3.4.4 Interpretace 3D dat z oblasti C	47
3.5 Shrnutí experimentální části	48
4 ZÁVĚR	49
POUŽITÁ LITERATURA	50

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1: Systém RDMap+ (Radeton Brno, 2024).....	13
Obrázek 2: Inspekční kamera se sondou (Zikmund Electronics, 2024)	14
Obrázek 3: Christian Hülsmeier a jeho patentový spis (Wolff, 2024).....	15
Obrázek 4: GPR na Měsíci (Grimm, 2018, s. 390).....	16
Obrázek 5: Schéma standardního systému GPR (Takahashi, et al., 2012, s. 156)	20
Obrázek 6: Schéma metody CMP (Annan, 2009, s. 31).....	22
Obrázek 7: Schéma metody transiluminace (Annan, 2009, s. 32).....	22
Obrázek 8: Princip vytvoření hyperbolického obrazu (Borecký, 2017, s. 39)	23
Obrázek 9: Typický postup zpracování naměřených dat (Cassidy, 2009b, s. 147).....	25
Obrázek 10: Obecný rámec přístupu ke zpracování obrazu GPR (Hasimah, 2021, s. 13)	26
Obrázek 11: Soustava systému GPR STREAM EM (Sářácin, 2017, s. 218).....	27
Obrázek 12: Použitá sestava GPR při měření (vlastní zpracování)	30
Obrázek 13: Použitá kontrolní a řídicí jednotka DAD FAST WAVE (vlastní zpracování).....	32
Obrázek 14: Antény použité při měření (vlastní zpracování).....	33
Obrázek 15: Použitý SW K2 FAST WAVE (vlastní zpracování)	33
Obrázek 16: Použitý SW ReflexW (vlastní zpracování)	34
Obrázek 17: Místa měření ve vybrané lokalitě (vlastní zpracování)	35
Obrázek 18: Geometrie lokality A (vlastní zpracování)	36
Obrázek 19: Schéma měření na lokalitě A (vlastní zpracování)	36
Obrázek 20: Geometrie lokality B (vlastní zpracování)	37
Obrázek 21: Schéma měření na lokalitě B (vlastní zpracování).....	37
Obrázek 22: Schéma měření na lokalitě C (vlastní zpracování).....	38
Obrázek 23: Radargram před zpracováním dat (vlastní zpracování)	39
Obrázek 24: Surová data po aplikaci základních filtrů (vlastní zpracování).....	39
Obrázek 25: Průběh sítí na profilu A01, frekvence 400 a 600 MHz (vlastní zpracování)	41
Obrázek 26: Průběh sítí na profilu A04, frekvence 400 a 600 MHz (vlastní zpracování)	42
Obrázek 27: Průběh sítí na profilu B01, frekvence 600 MHz (vlastní zpracování)	43
Obrázek 28: Průběh sítí na profilu B04, frekvence 600 MHz (vlastní zpracování)	44
Obrázek 29: Průběh sítí na profilu CL03, frekvence 200 a 600 MHz (vlastní zpracování)	45
Obrázek 30: Průběh sítí na profilu CT22, frekvence 200 a 600 MHz (vlastní zpracování)	46
Obrázek 31: 3D průběh kanalizační stoky v oblasti C (vlastní zpracování).....	47
Obrázek 32: 3D půdorysné zobrazení IS na profilech CL01 – CL22 (vlastní zpracování).....	47
Obrázek 33: Geometrie měření přenesená na terén (vlastní zpracování)	48
Tabulka 1: Hodnoty relativní permitivity	18
Tabulka 2: Vztah mezi délkou trvání pulsu, frekvencí, hloubkou průniku a rozlišením.....	21
Tabulka 3: Technické parametry řídicí jednotky	31
Tabulka 4: Technická specifikace použitých antén	32

SEZNAM VZORCŮ

(1) Rychlost průniku elektromagnetických vln	17
(2) Relativní permitivita	18
(3) Vlnová délka	19
(4) Hloubka šíření vln	23

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

CMP	Common Midpoint
COM	Common Offset
DFJP UPCE	Dopravní fakulta Jana Pernera Univerzita Pardubice
DCL	Detect Connection Line
DML	Detect Main Line
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPR	Ground Penetrating Radar
HW	Hardware
IS	Inženýrské síť
KDS	Katedra dopravního stavitelství
MTU	Mapping the Underworld
NASA	National Aeronautics and Space Administration
SW	Software
TIPDW	Translation Invariant Wavelet Packet Detection

ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je na základě rešerše literatury vypracování analýzy možností využití Ground Penetrating Radar [GPR] pro mapování inženýrských sítí [IS] a provedení experimentálního měření jejich průběhu. Přesná znalost polohy, trasy potrubí a podzemních kabelů, které tvoří inženýrské sítě je nezbytná a zásadní při plánování a realizacích všech druhů stavebních činností. Při rekonstrukcích či projektování nových staveb je potřeba minimalizovat škody na stávajících sítích a pro efektivitu těchto prací je nutné znát trasu a hloubku jejich uložení.

Bakalářská práce je rozdělena na dvě části. První, teoretická část, stručně seznamuje s historií vývoje georadarových systémů, uvádí základní principy jejich fungování. Dále popisuje metody sběru a zpracování měřených dat, uvádí stručný přehled druhů a oblastí použití georadarové techniky. Druhá, experimentální část, obsahuje popis použitého hardware [HW] RIS Hi-Pave a software [SW] ReflexW, které budou využity v této bakalářské práci k naměření a následnému zpracování dat.

Pro experimentální měření s jednotkou GPR přímo na vybraném úseku ulice v intravilánu města budou navržena místa měření průběhu inženýrských sítí, poté bude navržen způsob geometrie měření a použité frekvence antén. Následně, po zpracování a vyhodnocení výstupních dat, bude porovnán naměřený průběh inženýrských sítí s jejich skutečným průběhem, který bude získán z přesného geodetického zaměření při rekonstrukci ulice.

Postup tvorby bakalářské práce a dílčí úkoly, kroky k dosažení cíle:

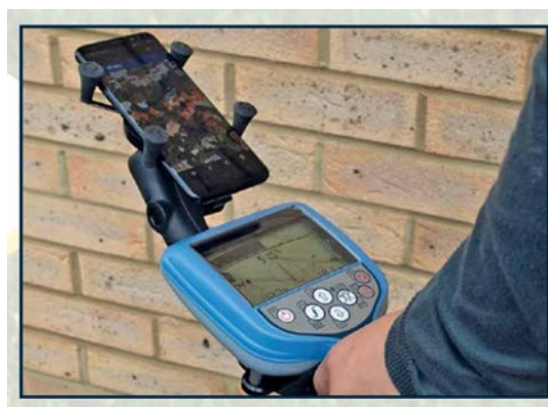
- osvojit si znalosti a dovednosti práce s GPR při detekci IS,
- v dostupné literatuře vyhledat a nastudovat způsob využití GPR pro lokalizaci IS,
- navrhnout a zrealizovat experimentální měření,
- vyhodnotit naměřená data pomocí specializovaného softwaru,
- formulovat závěry a doporučení pro použití GPR při detekci IS.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Inženýrské sítě tvoří složitý komplex, převážně podzemních vedení, s mnoha správci a vlastníky. Toto vedení je tvořeno různými druhy materiálů a IS jsou vedeny v různých hloubkách pod povrchem. Tvoří jakýsi páteří systém nezbytný pro fungování měst a obcí. Jde však o systém skrytý pod povrchem, na první pohled obtížně detekovatelný. Při stavebních činnostech, ať se již jedná o novou výstavbu, či o rekonstrukce, potřebujeme znát přesnou polohu těchto IS, jinak hrozí jejich porušení a v případě některých sítí (plyn) i havárie, veřejné ohrožení, škody na majetku či životech.

Problémem podzemních inženýrských sítí je ovšem obtížné zjištění přesného vedení trasy, zvláště pak u menších vlastníků, správců. Typicky se jedná o vedení veřejného osvětlení, které bylo často budováno živelně a bez potřebných podkladů a dále o potrubí dešťové kanalizace, které často vznikalo při výstavbě „nových“ systémů oddílné kanalizace z původní historické jednotné kanalizace.

U sítí tvořených vodivými materiály je, vzhledem k jejich rozsáhlosti, zjištění přesného vedení spíše problémem finančním než technickým. Moderní metody trasování sítí pomocí lokátorů, které pracují na principu elektromagnetické indukce v režimu vysílač – snímač, umožňují v kombinaci s přesným externím polohovacím zařízením vytvoření mapy sítě. Příklad takového zařízení je znázorněn na obrázku 1. Indukční cívka v přístroji vyšle signál, který jakmile narazí na vodivý materiál, začne v něm indikovat proud, jenž je schopen přijímač zachytit a změřit. Výhodou tohoto principu je možnost bezkontaktního měření, nevýhodou je poměrně malá přesnost informací o hloubce uložení IS.



Obrázek 1: Systém RDMAP+ (Radeton Brno, 2024)

Pro sítě tvořené nevodivými materiály je vytvoření přesné mapy sítě složitější, technicky i finančně náročnější. Nejpresnější je fyzické zaměření odhalené sítě ve výkopu, tento způsob zjišťování uložení IS je však v praxi použitelný pouze při nové výstavbě a rekonstrukcích. U sítí od průměru 150 mm výše lze použít vyhledávání pomocí sondy umístěné na samohybné kameře, jak lze vidět na obrázku 2. Nejmodernější způsob takového trasování představuje digitální skenování pomocí více širokoúhlých fotoaparátů, které umožňují vytvoření skutečného 3D vnitřního pohledu na trasovanou síť. Tyto systémy lze použít s jakýmkoliv materiálem potrubí, pasportizaci lze ovšem provést pouze nad hladinou vody, přičemž je potřeba zajistit přístup do potrubí a jeho neporušenost (EPA, 2009, s. 41). Tímto způsobem lze vytvořit poměrně přesnou mapu se zákresem příslušné sítě. Tato zařízení využívají kombinaci měření vzdálenosti, ať již na principu mechanického měření odvinutého lanka, či na principu měření otáček kola a detekce vyslaného signálu ze sondy.



Obrázek 2: Inspekční kamera se sondou (Zikmund Electronics, 2024)

Sítě menšího průměru, porušené nebo jinak nepřístupné, se dají pasportizovat pouze z povrchu a jednou z metod, která nám umožňuje zjistit nedestruktivním způsobem průběh IS je GPR.

1.1 Historie GPR

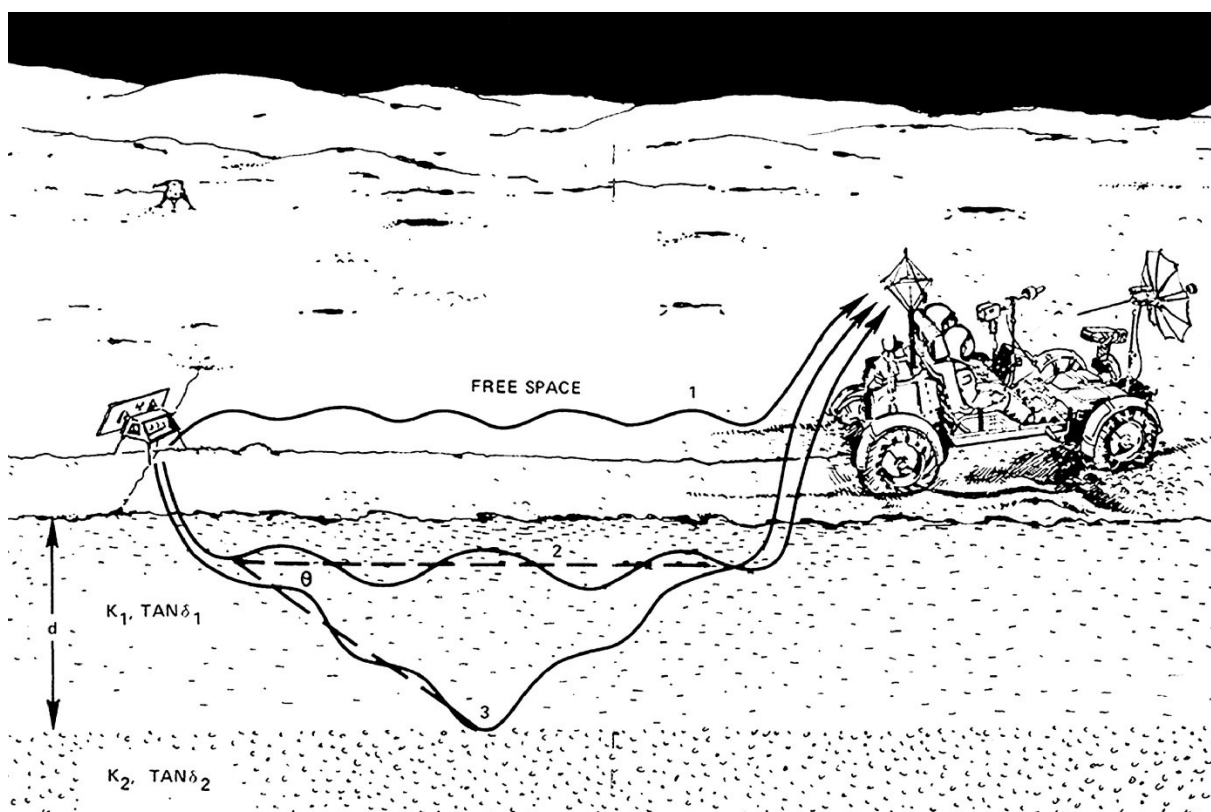
Georadar je relativně nová geofyzikální technika. Byl vyvinut z radarových systémů, které vznikly na začátku 20. století při výzkumu šíření a odrazu elektromagnetických vln. Samotné slovo radar je zkratka ze slov RADio Detection And Ranging, tedy radiová detekce a určování vzdálenosti. Jeden z prvních doložených patentů, viz. obrázek 3, v oblasti radarových systémů podal Christian Hülsmeier v roce 1904.



Obrázek 3: Christian Hülsmeier a jeho patentový spis (Wolff, 2024)

V následujících letech bylo podáno množství dalších patentů na radarové technologie a započalo i využití radaru jako nástroje pro geofyzikální průzkum (Rasol, et al., 2022, s. 707). Prvním známým praktickým použitím GPR v terénu se v roce 1929 stalo měření průzkumů mocnosti ledovce v Rakousku, které provedl W. Stern (Olhoeft, 1988, s. 468). Během několika následujících desetiletí se s vývojem radarové technologie a techniky zdokonalovaly i možnosti GPR. Technologie GPR však zůstala z velké části nevyužitou a poněkud opomíjenou oblastí radarové technologie, na kterou bylo především z důvodu náročného vyhodnocení naměřených dat pohlíženo širokou vědeckou veřejností skepticky. Většina aplikací GPR v tomto období sloužila pro vojenské účely. GPR byl použit ve Vietnamu při vyhledávání tunelů a při lokalizaci nevybuchlých min (Amara, 2021, s. 15). Jednalo se však spíše o ojedinělé a nepřilíš rozšířené použití GPR. To se začalo měnit v 70. letech 20. století, kdy se GPR stal součástí vesmírného výzkumu NASA programu Apollo 17, ve kterém byl proveden průzkum podpovrchové struktury Měsíce až do hloubky 1,6 km. Princip znázorňuje obrázek 4.

Elektromagnetické vlny byly vysílány ortogonálními elektrickými dipólovými anténami umístěnými v blízkosti lunárního modulu a jejich odrazy byly detekovány na lunárním vozítku. Ačkoliv se i při této misi ukázala omezení tehdejší technologie GPR spočívající v komplikovaném analogovém zpracování naměřených dat, neboť signály z antén byly natočeny kamerou na filmový pás, tak data z tohoto experimentu dodnes slouží jako zdroj k novým výzkumným pracím. Současné moderní numerické metody dokáží překonat původní obtíže při interpretaci dat (Grimm, 2018, s. 390).



Obrázek 4: GPR na Měsíci (Grimm, 2018, s. 390)

Další rozvoj GPR tedy nastal až v 80. letech 20. století, kdy se s postupující digitalizací zpracování dat, miniaturizací přístrojů a rozvojem počítačové techniky stalo přístrojové vybavení pro GPR relativně cenově dostupné a zpracování dat rychlejší a méně náročné na zkušenost obsluhy (Cao, et al., 2007, s. 21).

Od 90. let minulého století dochází k prudkému rozvoji používání technologie GPR při různých aplikacích. V současnosti je technologie GPR široce používaným nástrojem od geologického průzkumu přes průzkum hladiny podzemní vody až po aplikace v infrastruktuře a stavebnictví,

jako jsou např. vyhledávání inženýrských sítí, zjišťování poruch dopravních cest a detekce výztuží v železobetonových konstrukcích (Saarenketo, 2006, s. 15).

Dnešní výkonnost digitálního zpracování dat převyšuje naše současné možnosti jeho použití (Annan, 2002, s. 266). Výsledkem je vývoj SW a algoritmů pro zpracování dat, který směřuje k přechodu z 2D na 3D systémy zobrazování výsledků měření a používání numerického modelování a strojového učení systému umělé inteligence.

1.2 Princip fungování GPR

Georadar, jak je překládán anglický název Ground Penetrating Radar, v doslovném překladu znamená radar pronikající do země. V jeho názvu je obsažena podstata fungování této metody. GPR je přístroj, který pracuje na principu detekce vyslaných a odražených elektromagnetických radiových vln pod povrch země. Když vyslaná vlna narazí na předmět nebo rozhraní materiálů s odlišnými elektrickými vlastnostmi, dojde k jejímu částečnému pohlcení, rozptýlení a odražení. Přijímací anténa pak zaznamená změny ve vráceném signálu.

1.2.1 Elektromagnetické vlnění

GPR vysílá elektromagnetické signály ve formě vln, které jsou složeny z oscilujícího elektrického a magnetického pole. Jejich vlastnosti a chování výstižně popisují Maxwellovy rovnice, které jsou shrnutím poznatků a pokusů prováděných badateli v 19. století. Z těchto základních vztahů lze odvodit všechny klasické vztahy pro elektromagnetické jevy – indukci, radiové vlny, odpor, teorie obvodů atd. (Annan, 2009, s. 6).

Materiály interferují s elektromagnetickou energií různým způsobem. Materiálové vlastnosti, které mají nepříznivý vliv na elektrická a magnetická pole tvořící elektromagnetické vlny, jsou permitivita a vodivost. Volným prostorem, myšleno vakuem, se elektromagnetické vlny šíří konstantní rychlostí srovnatelnou s rychlostí světla.

Rychlost průniku elektromagnetických vln prostředím je dána vztahem:

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

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

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

ϵ_r - relativní permitivita prostředí.

Relativní permitivita ϵ_r (dielektrická konstanta) se nejčastěji používá pro popis vlastností materiálů. Jedná se o poměr permitivity látky k permitivitě vakua. Relativní permitivita je dána vztahem:

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

kde: ϵ_r - relativní permitivita materiálu (dielektrická konstanta),
 ϵ - permitivita materiálu,
 ϵ_0 - permitivita vakua, fyzikální konstanta, jejíž hodnota je $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

Hodnota dielektrické konstanty je pro každý materiál odlišná, ovlivňuje ji především množství obsažené vody (Daniels, 1996, s. 167). Hodnoty dielektrické konstanty pro vybrané druhy materiálu jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 1: Hodnoty relativní permitivity

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

Zdroj: (TP-233, 2011)

Schopnost elektromagnetických vln pronikat do hloubky materiálů je ovlivněna vodivostí (σ) a frekvencí vlnění (ω). Materiály s nízkou vodivostí mají poměrně malý útlum, ztrátu

nebo rušení signálu a umožňují penetraci do větších hloubek (10 - 100 m). Čím je vodivost vyšší, tím se zvyšuje i ztráta a útlum vln a dosah vln může být velmi malý, i méně než 1 m (Kurel, 2018, s 24).

Elektromagnetické vlny charakterizuje její frekvence. Dlouhé vlny jsou generovány nízkými frekvencemi, zatímco vysoké frekvence generují kratší vlny. Délku opakujícího úseku vlny nazýváme vlnovou délkou λ . Ta je nepřímo úměrná frekvenci f , která vyjadřuje počet opakování za sekundu. Vyjadřuje se vztahem:

$$\lambda = \frac{v}{f} : [\text{m}] \quad (3)$$

kde: λ - vlnová délka (m)

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

f - frekvence (1/s).

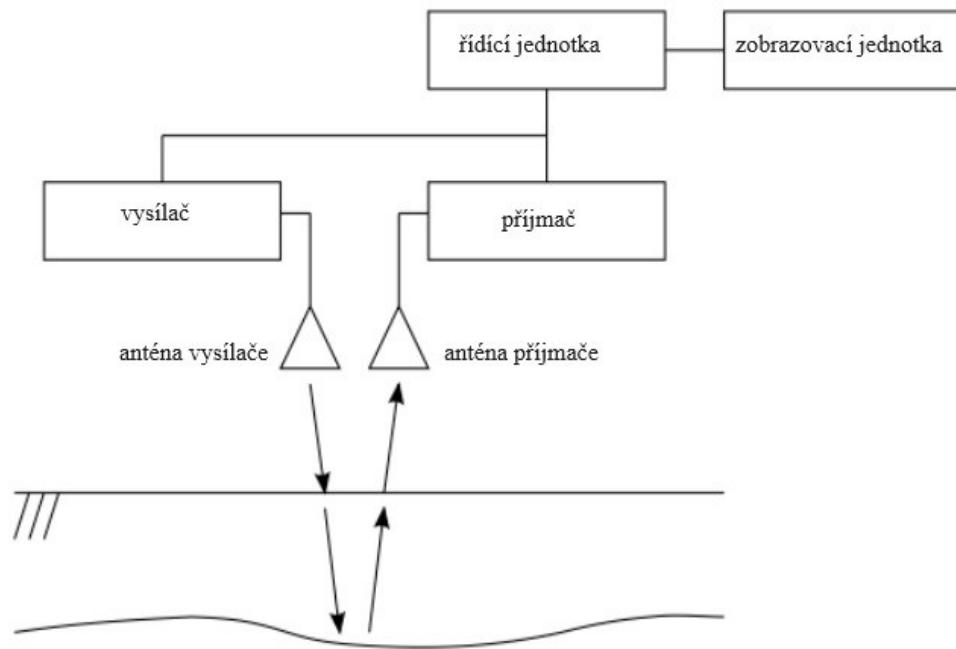
Signál elektromagnetické vlny putuje rychleji v prostředí s nižší relativní permitivitou než prostředím s permitivitou vyšší. Vodivost materiálu pak určuje rychlost útlumu signálu a tím udává, jak hluboko do materiálu elektromagnetická vlna pronikne. Je tedy důležité si uvědomit, že útlum signálu GPR je úměrný frekvenci a je jí silně řízen, vyšší frekvence zeslabují signál výrazně více než frekvence nižší. Frekvenční závislost útlumu je tak důvodem, proč signály GPR s nižší frekvencí pronikají do větších hloubek než signály s vyššími frekvencemi (Cassidy, 2009a, s. 60).

1.2.2 Konstrukce GPR

Sestava standardního GPR je složena z řídicí jednotky, která může být jedno nebo více kanálová, k ní připojenému anténnímu systému, ze zařízení sloužícího pro určení polohy, což je např. odometr nebo Global Navigation Satellite System (GNSS), a ze zobrazovací jednotky, typicky notebooku. Schéma takovéto sestavy ilustruje obrázek 5.

Notebook je potřebný k ovládní řídicí jednotky, k zadávání parametrů sběru dat pomocí specializovaného softwaru a k uchování získaných naměřených dat. Dalšími součástmi sestavy jsou potřebné datové, propojovací kabely a napájecí zdroj, obvykle 12 V akumulátor. Systém může být volitelně doplněn o další měřicí přístroje, např. laserové či ultrazvukové snímače, kamerové systémy, čímž může být vytvořena komplexní jednotka pro předpokládaný účel použití (Malinská, 2016, s. 25).

Sestava bývá v závislosti na způsobu předpokládaného použití variantně namontována na různé typy nosičů. Pro diagnostiku pozemních komunikací bývá umístěna na osobním automobilu, pro vyhledávání inženýrských sítí může být připevněna k ručnímu vozíku či přímo tažena po měřeném povrchu.



Obrázek 5: Schéma standardního systému GPR (Takahashi, et al., 2012, s. 156)

Anténní systémy užívané pro sestavy GPR se od sebe odlišují především vysílací frekvencí. V současnosti existuje velké množství typů antén, které jsou nejdůležitějšími složkami GPR. Volba druhu a vysílací frekvence antény je jednou ze zásadních částí práce s GPR, a proto jim je věnována následující samostatná kapitola.

1.2.3 Antény a jejich frekvence

Nejvýznamnější částí GPR systémů jsou antény, na nichž je vytvářeno elektromagnetické vlnění s různými frekvencemi. Čím vyšší je frekvence, tím je kratší vlnová délka produkované elektromagnetické energie.

GPR systémy mohou být bistatické nebo monostatické. Bistatické systémy mají dvě antény, jednu pro vysílání a druhou pro přijímání signálu. Monostatické systémy obsahují pouze jednu anténu, která má dva provozní stavy, jeden pro vysílání a druhý pro detekci vln. Z hlediska směru vysílání elektromagnetických vln lze antény rozdělit do dvou obecných tříd, na směrové

a všesměrové. Směrové antény vyzařují energii ve formě laloků nebo paprsků, které se rozšiřují v jednom směru pro danou polohu antény. Všesměrové antény vysílají energii do všech směrů současně (Daniels, 2009, s. 100).

Výrobci dnes produkují velké množství typů antén lišících se od sebe centrální vysílací frekvencí, konstrukcí a typem určení. Typ dané antény volíme dle konkrétní řešené problematiky a materiálového vybavení, kterým disponujeme. Větší objekty můžeme detekovat nižšími frekvencemi ve větších hloubkách, pokud potřebujeme detekovat malé objekty, musíme zvolit anténu o vyšší frekvenci. Je však nemožné detekovat malé objekty ve velkých hloubkách, jak vyplývá z tabulky 2.

Tabulka 2: Vztah mezi délkou trvání pulsu, frekvencí, hloubkou průniku a rozlišením

centrální frekvence antény (MHz)	rozlišení velikost cíle (m)	dosah signálu (m)	délka pulsu (ns)
31	1,6	16	32
63	0,8	8	16
125	0,4	4	8
250	0,2	2	4
500	0,1	1	2
1 000	0,05	0,5	1
2 000	0,03	0,25	0,5

Zdroj: (Daniels, 1996, s. 169)

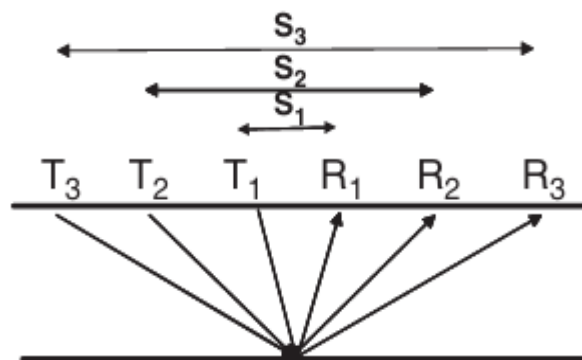
Pro georadarové měření při vyhledávání IS se převážně používají anténní systémy s centrální vysílací frekvencí od 100 MHz do 2,0 GHz.

Anténní systémy můžeme, s ohledem na postup měření a pozici antény nad terénem, rozdělit na dvě kategorie ground-coupled a air-coupled (Malinská, 2016, s. 26). Air-coupled antény jsou navrženy pro použití se vzduchovou vrstvou mezi terénem a anténou, čehož se využívá pro měření velkých ploch při vyšších rychlostech až 200 km/h. Nejčastěji pracují na frekvencích 500 MHz - 2,5 GHz, přičemž nejvíce používanou je frekvence 1,0 GHz, a jimi vysílané signály pronikají do hloubky 0,5 - 0,9 m. Naproti tomu ground-coupled antény pracují na širokém spektru frekvencí od 80 - 1500 MHz a hloubka průniku může dosahovat ke 30 m. Při měření jsou umístěny těsně nad povrchem v konstantní vzdálenosti nebo se přímo dotýkají povrchu. Umožňují větší penetraci vln do terénu, nicméně je možné je použít pouze při menších rychlostech (Saarenketo, 2006, s. 51). Lze také použít vícekanálové systémy, které umožňují

sběr dat pomocí mnoha antén, a tím provádět měření několika profilů současně, což po následném zpracování dat umožňuje získání 3D obrazu.

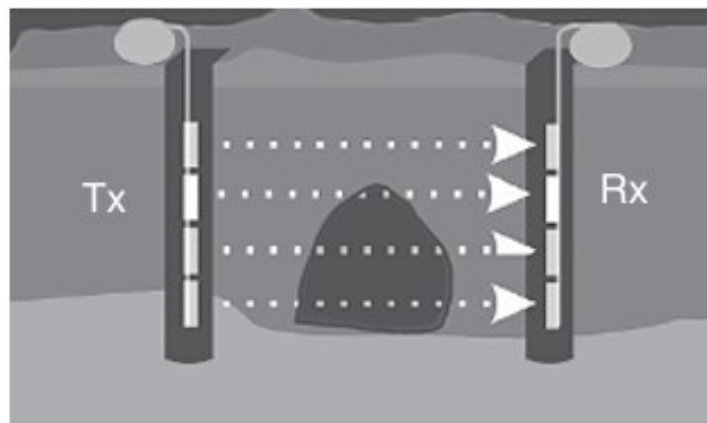
1.3 Metody sběru a zpracování dat

Pro průzkum v terénu se používají 3 hlavní režimy sběru dat. Obrázek 6 znázorňuje aplikaci metody společného středového bodu (common midpoint – CMP), kterou lze použít pro určení rychlosti šíření elektromagnetických vln v daném prostředí.



Obrázek 6: Schéma metody CMP (Annan, 2009, s. 31)

Metoda transiluminace, znázorněna na obrázku 7, byla původně vyvinuta pro použití v geologii a při archeologických výzkumech. Tato metoda využívá umístění antén přímo ve vrtech, ve kterých se zaznamenávají odrazy elektromagnetických signálů.



Obrázek 7: Schéma metody transiluminace (Annan, 2009, s. 32)

Nejrozšířenější metodou sběru dat je metoda společného posunu (common offset – COM), která se používá k mapování podpovrchových struktur. Cílem měření je pomocí odrazů vysílaných vln zjistit jednotlivé podpovrchové struktury. GPR měří čas mezi vysláním signálu

vysílačem a přijetím signálu přijímačem. Z časových údajů lze vyjádřit hloubku pomocí rychlostí šíření vln

$$h = \frac{v \cdot t}{2} : [\text{m}] \quad (4)$$

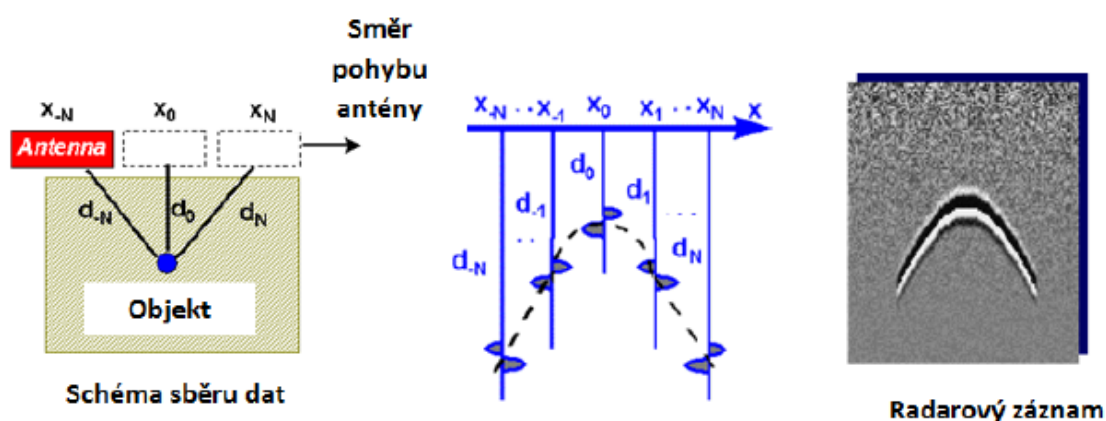
kde: h - hloubka (m)

v – rychlost šířících se elektromagnetických vln (m/s)

t - čas průchodu signálu (s).

Při použití metody COM je důležitá především vzájemná vzdálenost antén, jejich frekvence, orientace a vzdálenost linií, na kterých se měření provádějí (Annan, 2009, s. 32).

Vysílané signály z antén GPR mají ve skutečnosti přibližně tvar rotačního kužele a jejich rozptyl se pohybuje v hodnotách kolem 60° . Proto přijímací anténa zaznamenává odražené signály, přestože se nenachází přímo nad předmětem. U menších či liniiových objektů, např. kabelů a trubek, je vlivem rozptylu signálu a pohybu antény směrem přes objekt výsledný obraz ve tvaru části hyperboly, jak ukazuje obrázek 8. Skutečná poloha objektu se nachází u vrcholu hyperboly a její tvar je dán rychlostí šíření vlny definovanou materiálovou charakteristikou prostředí, ve kterém se vlna šíří (Borecký, 2017, s. 39).



Obrázek 8: Princip vytvoření hyperbolického obrazu (Borecký, 2017, s. 39)

Pomocí GPR lze sbírat data pouze v jednom bodě, ve kterém detekujeme jednu stopu signálu, záznam z tohoto měření se nazývá A-Scan. Pokud měříme profil jako sérii opakujících se měření s přesunováním antény podél měřeného profilu, nazýváme tento záznam B-Scan.

Vysílač a přijímač se současně pohybují podél měřeného profilu s určitým přírůstkem vzdálenosti. Pomocí B-Scanu tak vytvoříme 2D matici měřeného profilu, ve které každý řádek představuje jeden vzorek na sloupci, kdy daný sloupec představuje jednotlivou stopu. Hodnota prvku matice je amplituda napětí pro danou stopu a vzorek (Borecký, 2017, s. 36).

Rozvoj výpočetní techniky, kapacity řídicích a záznamových jednotek a rychlosti primárního zpracování dat nám v současnosti umožňuje provádět velké množství měření na rozsáhlých plochách, které se provádí jednou anténou na předem definovaném rastru nebo pomocí anténních soustav. Výsledky měření lze spojit do 3D obrazu nazývaného C-Scan. Díky možnosti vytvářet horizontální nebo vertikální řezy takového skenu v libovolném místě měřeného profilu, je mnohem snadnější interpretace dat a identifikace cílů. Nejnovějším speciálním případem C-Scanů je 4D obraz snímaného profilu, který vzniká porovnáním zobrazované oblasti v čase. Hustotu vzorkování obvykle stanovujeme s ohledem na požadované cíle měření a výstupů, jejich hodnoty se pohybují v rozmezí 0,1 - 0,5 m (Tess, et al., 2019, s. 38).

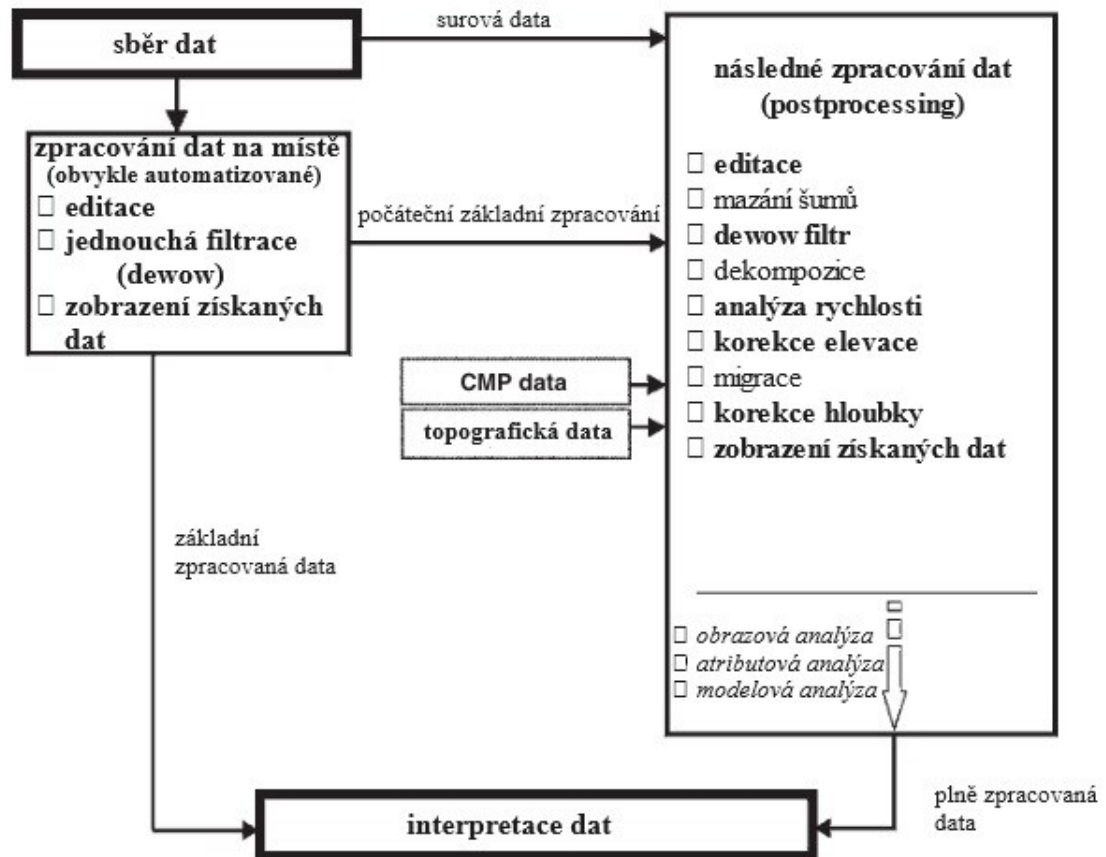
Pokud nejsou při zpracování signálu použity velmi sofistikované rozpoznávací algoritmy, nedokáže vzhledem ke své fyzikální podstatě GPR žádným způsobem rozlišit konkrétní cíle měření (Daniels, Utsi, 2013, s. 2). Velmi důležitou součástí při měření pomocí GPR je tedy zpracování a interpretace získaných dat, jehož postup lze rozdělit do čtyř fází:

- 1) předzpracování a zpracování dat
- 2) interpretace dat
- 3) vizualizace dat
- 4) tvorba výstupů.

Všechny tyto čtyři fáze jsou navzájem úzce provázány a jsou tvořeny množstvím dílčích kroků, jejichž posloupnost není přesně definována a neexistuje žádný jediný správný způsob jejich provádění. Veškeré následné úpravy získaných surových dat by měly být aplikovány s detailní znalostí jejich principů, tak aby výsledná data nebyla příliš zkreslena a vzdálena původním získaným informacím (Borecký, 2017, s. 113).

Obrázek 9 popisuje obvyklý průběh zpracování dat. Tučně znázorněné části jsou zásadní pro interpretaci dat a neměly by být nikdy vynechány. Zaměřují se na odstranění šumů, ozvěn či interferencí a minimalizaci dalších nepřesných hodnot zaznamenaných při měření, jako jsou např. staničení, určení rychlosti šíření signálu (Cassidy, 2009b, s. 147).

Tento proces je souhrnně nazýván postprocessing a používají se k němu specializované SW jako například ReflexW, Condor, GPRSoftTM, GRED HD 3D, CAD a další.



Obrázek 9: Typický postup zpracování naměřených dat (Cassidy, 2009b, s. 147)

Nedílnou součástí georadarového zpracování dat je jejich interpretace. Všechna georadarové data vyžadují před samotnou interpretací určitou formu zpracování. Pro zaručení realistických interpretací je nutné, aby byla data shromážděna a zpracována pomocí těchto metod vyškoleným a kompetentním personálem. Zpracování je pomůckou pro interpretaci dat, a pokud některý prvek chybí v surových datech, je pravděpodobné, že bude chybět i v datech interpretovaných (Cassidy, 2009b, s. 172).

2 APLIKACE GPR

I když je GPR poměrně nová geofyzikální technika, škála jeho aplikací je velmi široká a neustále se rozšiřuje, mnohé výzkumné týmy po celém světě vyvíjejí modelovací nástroje

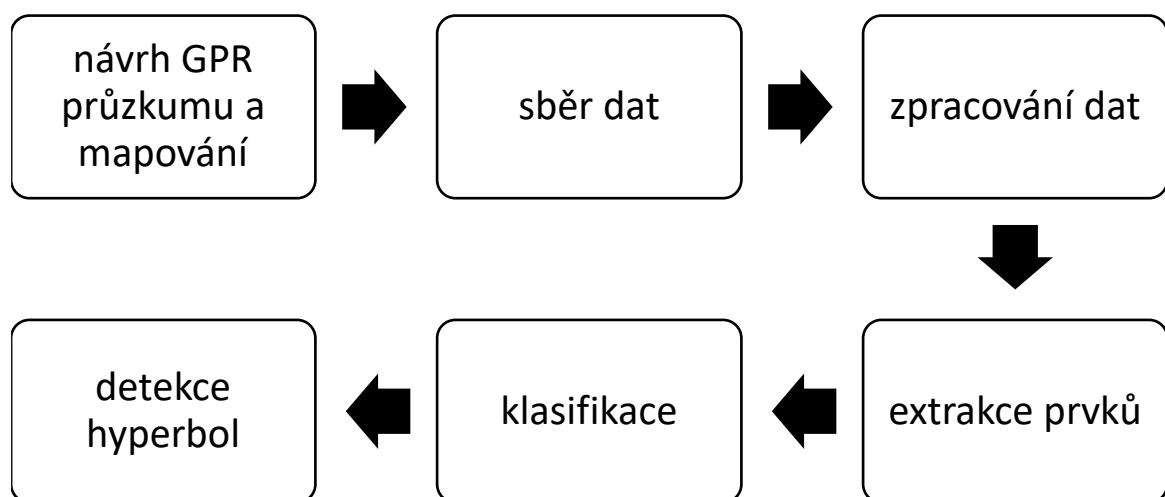
a nástroje na analytické zpracování dat. Přístroje pro GPR jsou stabilní, spolehlivé a patrným trendem je posun od zdokonalování přístrojového vybavení k okamžitému získávání „uživatelských informací“ přímo na místě měření (Annan, 2002, s. 263).

Dnešní použití GPR tedy zahrnuje nejen aplikace, které stály na samotném počátku jeho vývoje, jako jsou glaciologické a geologické, ale také hydrologické, ekologické a v neposlední řadě aplikace pro použití v infrastruktuře a stavebnictví. Mezi další možnosti využití patří archeologický průzkum a forenzní vyšetřování. Zajímavým použitím GPR je detekce kořenového systému stromů a odhadu jejich biomasy (Butnor, 2011, s. 213). Vzhledem k zaměření této práce, jsou dále uvedeny příklady aplikací GPR používaných ve stavebnictví a infrastruktuře.

2.1 Použití GPR při lokalizaci IS

Technologie GPR při lokalizaci podzemních IS má velký potenciál zvláště ve vysoce urbanizovaných oblastech dnešních měst. Porsani (2012) uvádí, že umožňuje detekci a mapování podpovrchových prvků bez nutnosti výkopových prací, což poskytuje bezpečnější a nákladově efektivnější přístup k plánování měst a správě infrastruktury.

Hasimah (2021) ve své práci ukazuje obecný rámec přístupu ke zpracování dat, jehož schéma je na obrázku 10, a rozděluje studie a výzkumy pro lokalizaci podzemních IS na dvě oblasti.



Obrázek 10: Obecný rámec přístupu ke zpracování obrazu GPR (Hasimah, 2021, s. 13)

První oblast zahrnuje provádění experimentálních měření v terénu, ať již v reálném či v simulovaném, s mnoha odlišnými parametry systémů GPR s cílem nalézt optimální

hodnoty nastavení pro úspěšnou detekci IS. Druhá oblast výzkumu se soustředí na zpracování naměřených dat.

Gokhan (2014) zdůrazňuje, že pro GPR lokalizaci IS je zásadním aspektem výběr vhodné frekvence antény. Ta určuje rozlišení a hloubku průniku radarového signálu. Vysokofrekvenční antény, obvykle v rozsahu 1 GHz až 2 GHz, nabízejí vynikající rozlišení a jsou ideální pro detekci IS v malých hloubkách a umožňují detailní zobrazování podpovrchových prvků. Jejich nevýhodou je omezená hloubka průniku. Naproti tomu Prego (2017) používá nízkofrekvenční antény o frekvencích 200 MHz až 400 MHz, které mohou pronikat hlouběji, ale poskytují menší rozlišení, takže jsou vhodné pro lokalizaci větších a hlouběji uložených IS.

Příkladem komplexního přístupu použitým Sářácinem (2017) je systém GPR STREAM EM, jehož podoba je vidět na obrázku 11, který využívá sběr dat ze dvou anténních matic zároveň. Přední antény jsou na frekvenci 200 MHz a tvoří matici DML (Detect Main Line) s vertikální polarizací určenou k detekci souběžných IS a zadní antény pracují na frekvenci 600 MHz a tvoří matici DCL (Detect Connection Line) s horizontální polarizací k detekci příčných IS. Získaná data lze kompatibilně kombinovat s informacemi o poloze poskytovanými GNSS nebo totální stanicí.



Obrázek 11: Soustava systému GPR STREAM EM (Sářácin, 2017, s. 218)

Druhá oblast výzkumu se soustředí na zpracování naměřených dat s využitím výpočetních modelů založených na procesech umělé inteligence, neuronových sítí a technik strojového

učení. Všechna zaznamenaná data jsou vždy kontaminována rušivými vlivy pozadí, terénu a nadbytečnými odrazy způsobenými vzájemnými vlnovými interakcemi. Pro správnou interpretaci výsledků je potřeba data vyčistit a zesílit. Al-Nuaimy (2000) k tomu používá proces, který je kombinací neuronových sítí a technik zpracování obrazu tak, aby poskytoval obraz podpovrchových vrstev s vysokým rozlišením v reálném čase, což usnadňuje přímou interpretaci dat a poskytuje přesné informace o hloubce a směru průběhu IS.

Při procesu zpracování dat je hlavní snahou lokalizovat polohu a tvar hyperbolické křivky pomocí použití mnoha různých filtrů. Mezi běžné metody patří filtry pro průměrování a úpravy zesílení signálů. Jako velmi účinné se ukázaly i pokročilejší algoritmy, např. zpracování rozděleného spektra a řádové statistické filtry. Afrasiabi (2023) k tomu používá Kalmánův filtr, naproti tomu Lester (2007) využívá filtr TIPDW (Translation Invariant Wavelet Packet Detection).

Také vývoji technik pro automatickou detekci hyperbol se dostalo velké pozornosti ze strany výzkumné komunity GPR. Bylo vyzkoušeno mnoho technik k lokalizaci a charakterizaci hyperbol v GPR snímcích, které jsou odrazem polohy, hloubky, velikosti a materiálu detekovaných IS. Dle Yanga (2023) je jednou z metod automatické detekce technika porovnávání šablon. Šablona nemusí obsahovat přesnou křivku hyperboly, ale musí být schopna rozlišovat mezi hyperbolou a pozadím.

Metje (2007) navrhnul multisenzorový lokalizační nástroj MTU (Mapping the Underworld), který vzájemnou kombinací vyhledávacích metod GPR, kvazi-statických polí a akustiky, umožňuje překonávat fyzikální omezení jednotlivých metod. Myšlenkou této metody je vzájemně zkombinovat různé typy senzorů se schopnostmi detekovat mechanické, dielektrické, magnetické a vodivé vlastnosti podpovrchových IS.

Použití GPR pro mapování IS bylo zdokumentováno v různých projektech po celém světě. Porsani (2012) lokalizoval pomocí georadaru, s frekvencí antén 200 MHz v kombinaci s průzkumnými vrty a kopanými sondami, v São Paulu IS podél trasy výstavby tunelu metra. V Singapuru Yan (2019) použil GPR pro 3D mapování IS, které je nutné, vzhledem k existujícím legislativním nařízením, provádět integrovaně s katastrálními daty.

V Tunisu Ghozzi (2018) použil GPR systém s frekvencí 400 MHz k detekci a lokalizaci kanalizačních potrubí. Ke snížení množství shromážděných dat provedl fyzické měření pouze na několika podoblastech, ve kterých analyzoval data z GPR. Následně byl průběh

kanalizačního vedení interpolován pomocí výsledků GPR a umístění šachet viditelných z povrchu.

V Mece provedl Metwaly (2015) průzkum průběhu IS pod asfaltovou silnicí s GPR systémem pracujícím na frekvenci 400 MHz. Shokri (2020) v Malajsii ověřila schopnost GPR lokalizovat zkorodované potrubí, přičemž k tomu použila kombinaci GPR a senzoru půdní vlhkosti TDR.

Přestože GPR při detekování a lokalizaci IS dosáhl pozoruhodných úspěchů, zůstává získávání relevantních informací o jejich poloze náročným úkolem. Určování průběhu a materiálového složení podzemních IS v městských oblastech je, jak uvádí Hasimah (2021), pravděpodobně nejsložitějším výzkumem v oblasti GPR. Je tomu tak proto, že interpretace skutečné polohy IS pomocí hyperbolického odrazu je vysoce subjektivní a do značné míry závisí na znalostech a zkušenostech operátora, což může vést k chybné klasifikaci.

Ve všech dostupných zdrojích autoři uvádějí, že GPR systémy poskytují při správném použití přesné a stabilní informace o IS, i když cesta k získání obrazového výstupu není snadná. Všechny výše uvedené studie prokázaly účinnost GPR při lokalizaci průběhu IS, avšak byly provedeny spíše v lokálním měřítku. Na rozsáhlý výzkum průběhu IS ve velké oblasti zatím, vzhledem k časové a finanční náročnosti takového úkolu, nedošlo.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část práce zahrnuje realizaci terénního měření průběhu IS v předem vybrané lokalitě a profilech měření, následné zpracování naměřených dat ve specializovaném programu ReflexW, tvorbu výstupů a formulování doporučení.

3.1 Použitý HW a SW

Pro experimentální měření průběhu inženýrských sítí byla použita sestava GPR, viditelná na obrázku 12. Jejím vlastníkem je KDS DFJP UPCE a výrobcem je společnost IDS GeoRadar, s.r.l. Tato sestava má obchodní označení RIS Hi-Pave, a dle výrobce je určena pro rychlý, flexibilní průzkum pozemních komunikací. Sestava je tvořena vícekanálovou řídicí jednotkou DAD Fast Wave, toughbookem Panasonic CF-20 pro záznam a zpracování dat, dvojicí ground-coupled antén, měřicího odometru pro záznam vzdálenosti, 12 V akumulátorem, propojovacími a datovými kabely.



Obrázek 12: Použitá sestava GPR při měření (vlastní zpracování)

3.1.1 Řídící jednotka DAD Fast Wave

Vícekanálová řídicí jednotka DAD Fast Wave, popsána na obrázku 13, je zodpovědná za řízení antén a digitalizaci naměřených dat. Její technická specifikace je následující:

Tabulka 3: Technické parametry řídicí jednotky

Frekvence pulzů	400 kHz
Rychlost skenování	až 4760 skenů za sekundu
Dosah	až 9999 ns
Počet A/D převodníků	2
Frekvence sběru dat (A/D clock)	400 kHz
Vzorkování	16 bit
Rozlišení	> 5 psec
Počet vzorků na sken	128 - 8192 (1 kanál)
	128 - 4196 (2 kanály)
	128 - 2048 (4 kanály)
Skládání (Stacking)	až 32786 skenů
Porty	anténa 1, anténa 2, odometr, LAN, baterie
Maximální počet antén	2 standard; až 8 TR s rozšiřujícím boxem; až TR DUAL F
Počet kanálů	8
Rozměry	22 x 17 x 5,5 cm
Váha	1,5 kg
Zdroj napětí	12 V +/- 10 %
Odolnost proti prachu a vodě	IP 64
Průměrná spotřeba	< 10 W

Zdroj: (IDS Ingegneria Dei Sistemi S.p.A.)



Obrázek 13: Použitá kontrolní a řídicí jednotka DAD FAST WAVE (vlastní zpracování)

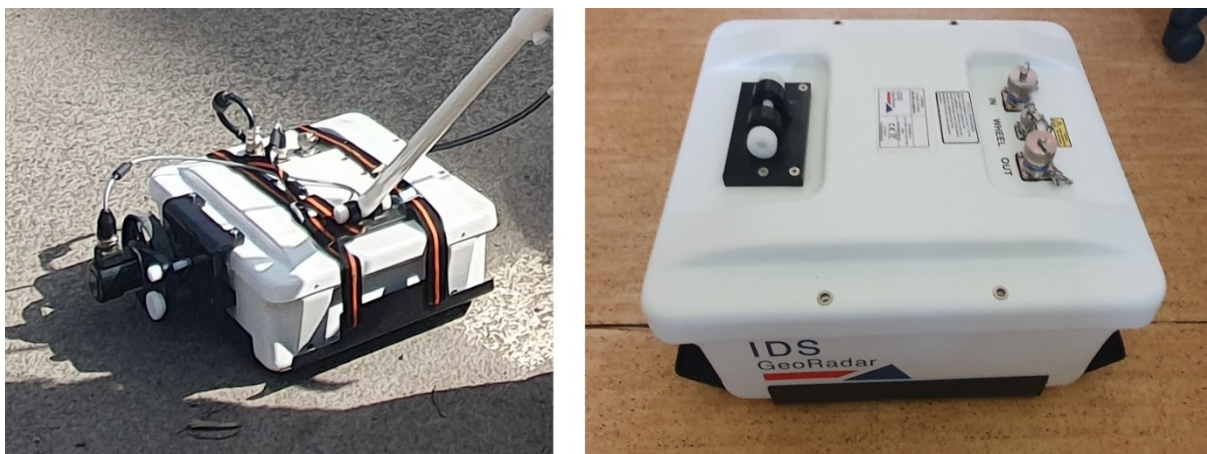
3.1.2 Použité antény

Obrázek 14 představuje antény výrobce IDS GeoRadar, s.r.l., které byly použity při měření. Jedná se o duální ground-coupled antény s následujícími technickými specifikacemi:

Tabulka 4: Technická specifikace použitých antén

	Anténa TR DUAL-F 400/900	Anténa TR DUAL-F 200/600
Typ antény	stíněná dipólová	stíněná dipólová
Počet kanálů	2	2
Frekvence kanálů	400 MHz a 900 MHz	200 MHz a 600 MHz
Zapojení	sériové plug and play	sériové plug and play
Rozměry (cm)	43 x 37 x 20	43 x 37 x 20
Váha	6 kg	6 kg
Provozní vlhkost	< 90 %	< 90 %
Odolnost proti vodě	IP 65	IP 65
Provozní teplota	-40°C až 50°C	-40°C až 50°C

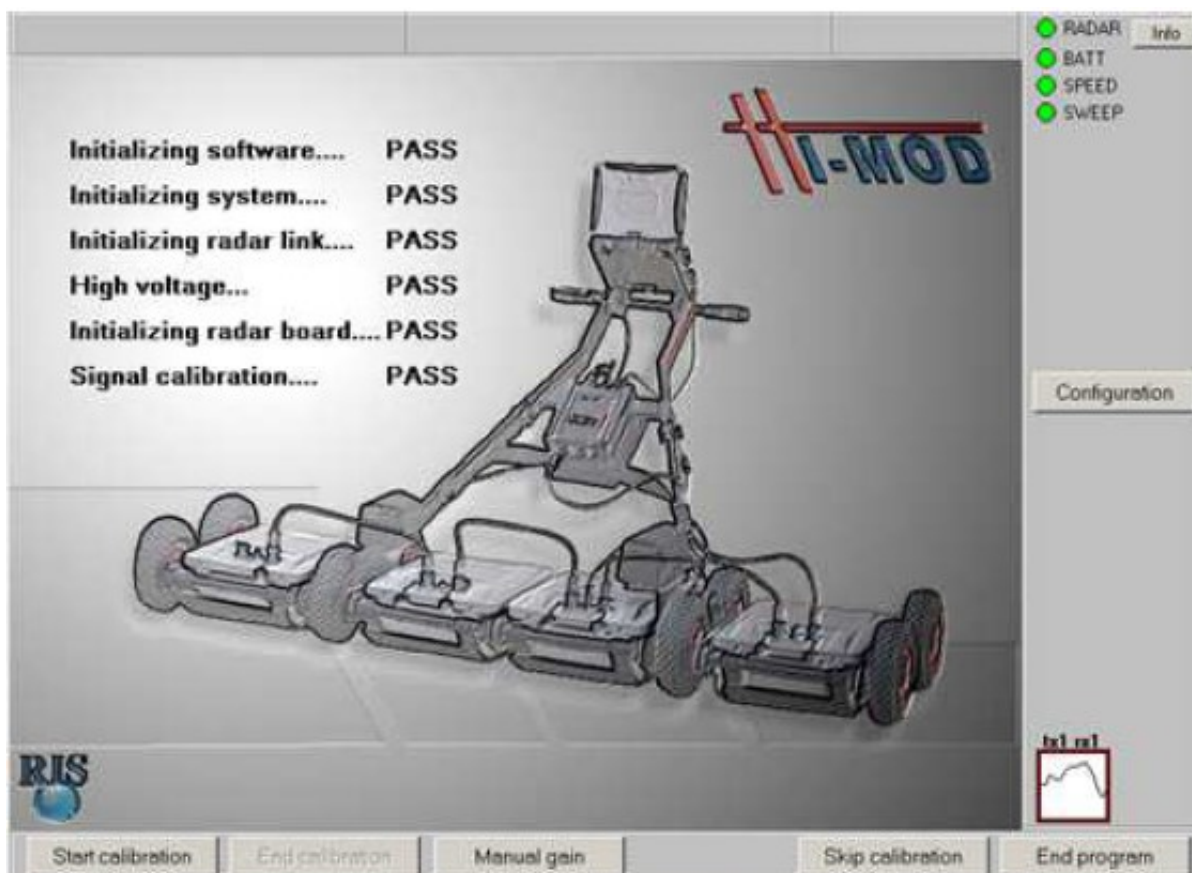
Zdroj: (IDS GeoRadar s.r.l.)



Obrázek 14: Antény použité při měření (vlastní zpracování)

3.1.3 Programové vybavení

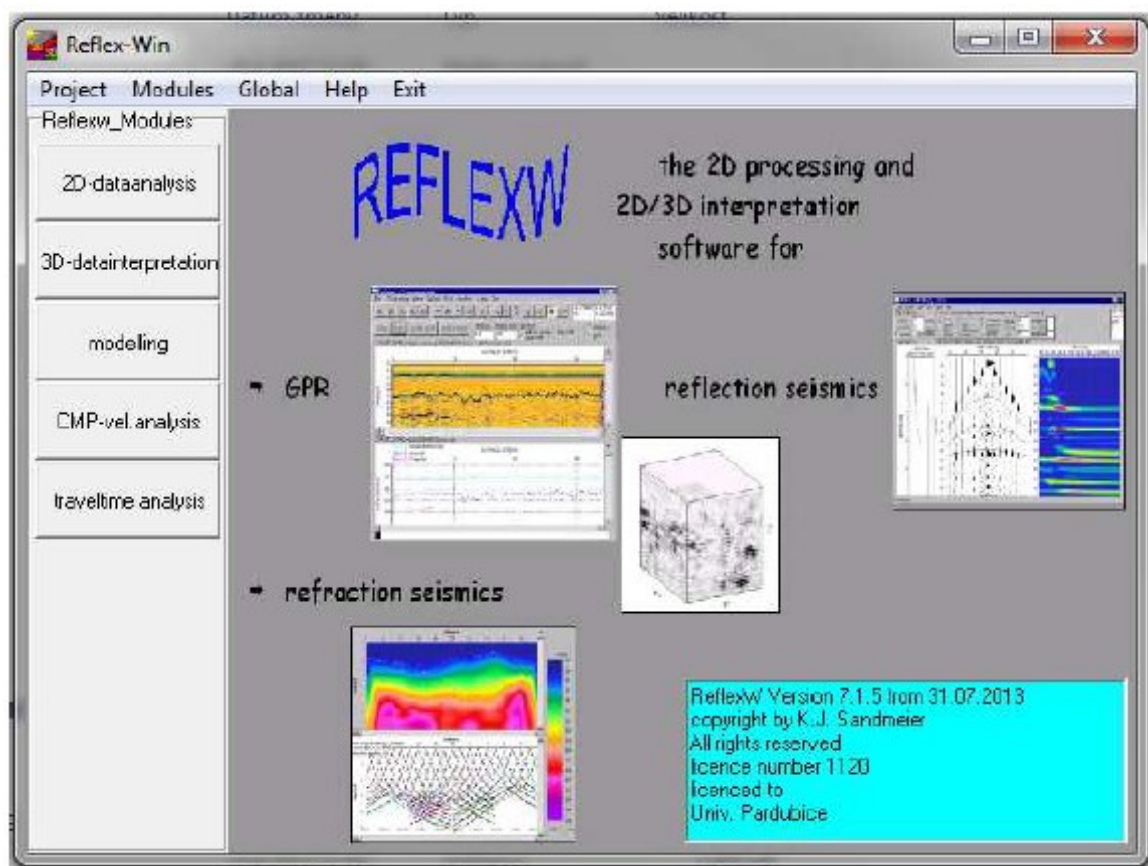
Pro prvotní sběr, zápis a zpracování dat byl použit program K2 FAST WAVE, který je znázorněn obrázkem 15, a tvoří integrovanou součást georadarové sestavy použité pro experimentální měření. Tento program ovládá antény a umožňuje změnit nastavení parametrů pro samotné měření.



Obrázek 15: Použitý SW K2 FAST WAVE (vlastní zpracování)

Po uskutečnění všech plánovaných měření byl pro následný postprocessing a publikování grafických výstupů použit specializovaný program ReflexW, jehož úvodní stránku zobrazuje obrázek 16. Tento SW představuje velmi rozsáhlý nástroj, původně vyvinutý pro zpracování dat ze seizmických průzkumů, jenž v současnosti umožňuje zpracování dat z celé škály vlnových měření, jako jsou GPR, ultrazvukové, akustické či seizmické analýzy. Součástí programu je mnoho funkcí pro filtrování a editaci dat. Zahrnuty jsou speciální algoritmy pro různé datové typy GPR a pro import ze všech známých GPR formátů.

Zpracování může být prováděno, jak na jednotlivých profilech, tak i na množině profilů jako sekvenční zpracování. ReflexW dále obsahuje moduly pro modelování elektromagnetického pole a pro zpracování a vizualizaci 3D dat (sandmeier-geo, 2024).

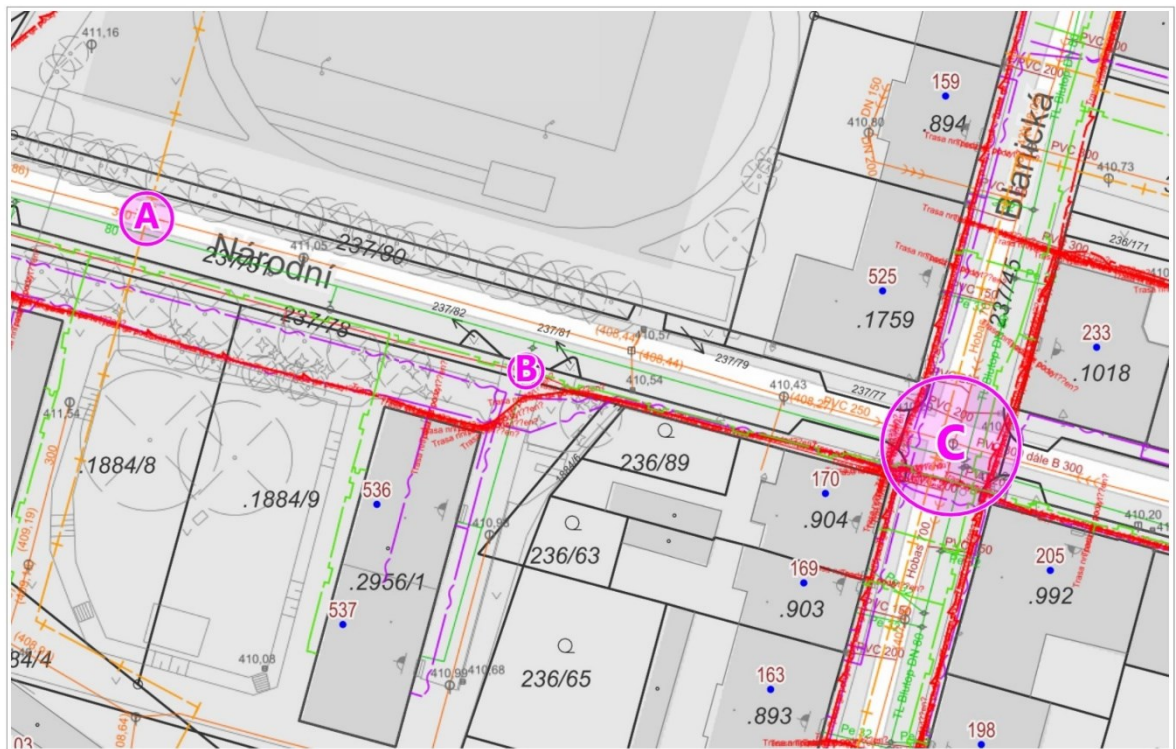


Obrázek 16: Použitý SW ReflexW (vlastní zpracování)

3.2 Lokalita a způsob měření

Experimentální měření pro detekci podzemních IS proběhlo v Trutnově na třech lokalitách v ulici Národní, které jsou znázorněny na obrázku 17. Tato ulice byla zvolena zcela záměrně, vzhledem ke skutečnosti, že v ní v roce 2022 proběhla rozsáhlá rekonstrukce během které byla

vyměněna většina IS. Je tedy přesně známa poloha a materiálová skladba IS. Ty byly při rekonstrukčních pracích geodeticky zaměřeny a následně zaneseny do technické mapy města Trutnova.



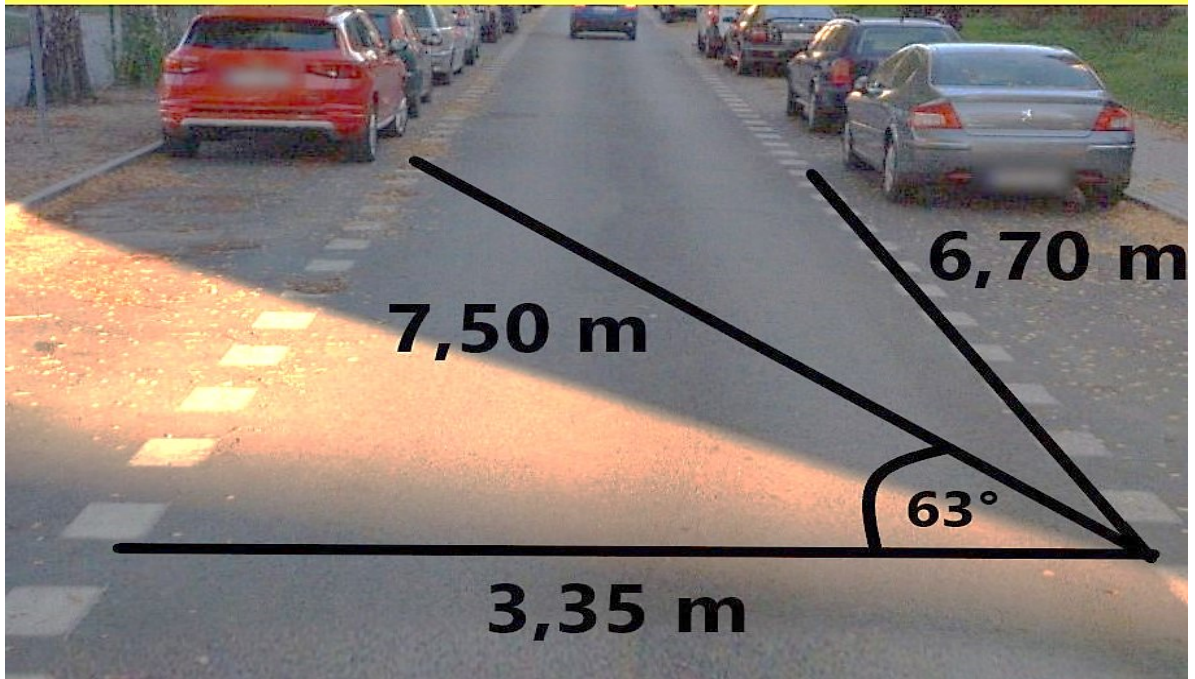
© Přispěvatelé OpenStreetMap, RÚIAN: © ČÚZK, Katastr: © ČÚZK

1 : 500

Obrázek 17: Místa měření ve vybrané lokalitě (vlastní zpracování)

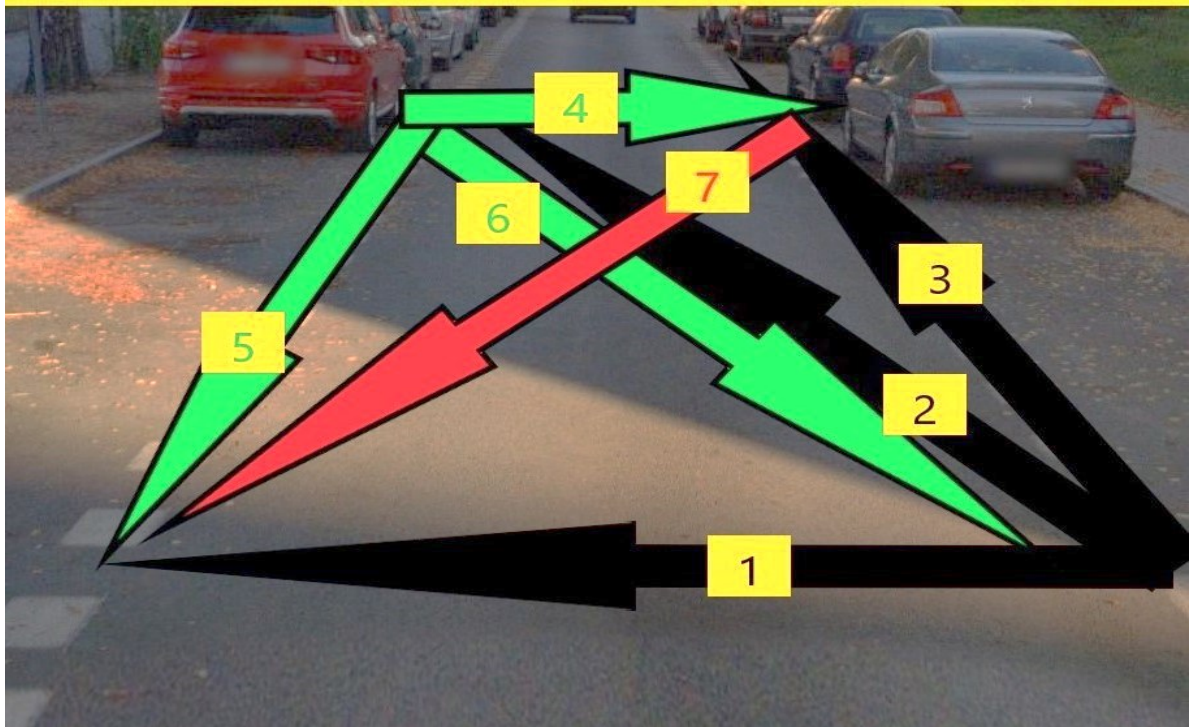
Na měřených lokalitách A a B proběhly dvě sady měření. První sada byla uskutečněna pomocí GPR sestavy s anténou TR DUAL-F 400/900 a druhá sada s anténou TR DUAL-F 200/600, jež jsou blíže specifikovány v tabulce 4. Povrch lokality A tvoří asfaltobetonový koberec, její rozměry jsou 3,35 x 6,70 m a jsou znázorněny na obrázku 18. Schéma měření na této lokalitě je zřejmé z obrázku 19. Povrch lokality B je tvořen betonovou skladebnou dlažbou, rozměry měřené oblasti jsou 4,15 x 5,40 m. Geometrie lokality B a schéma průběhu měření jsou patrné z obrázků 20 a 21.

Lokalita A - geometrie

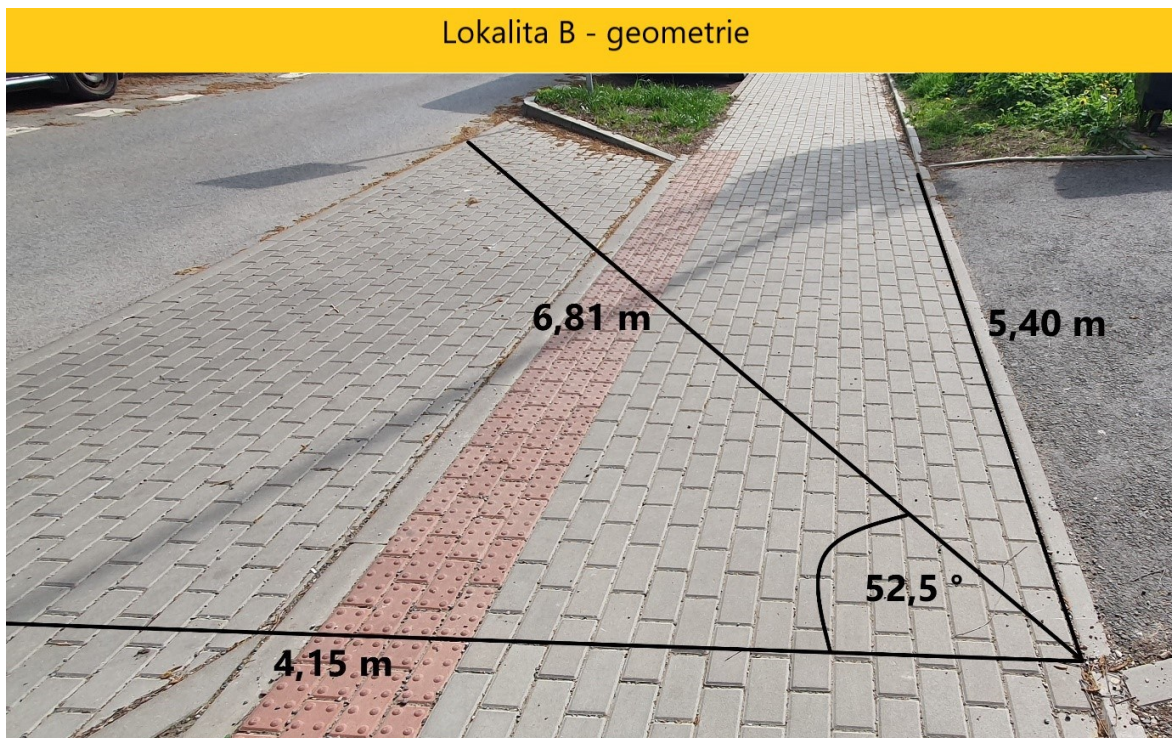


Obrázek 18: Geometrie lokality A (vlastní zpracování)

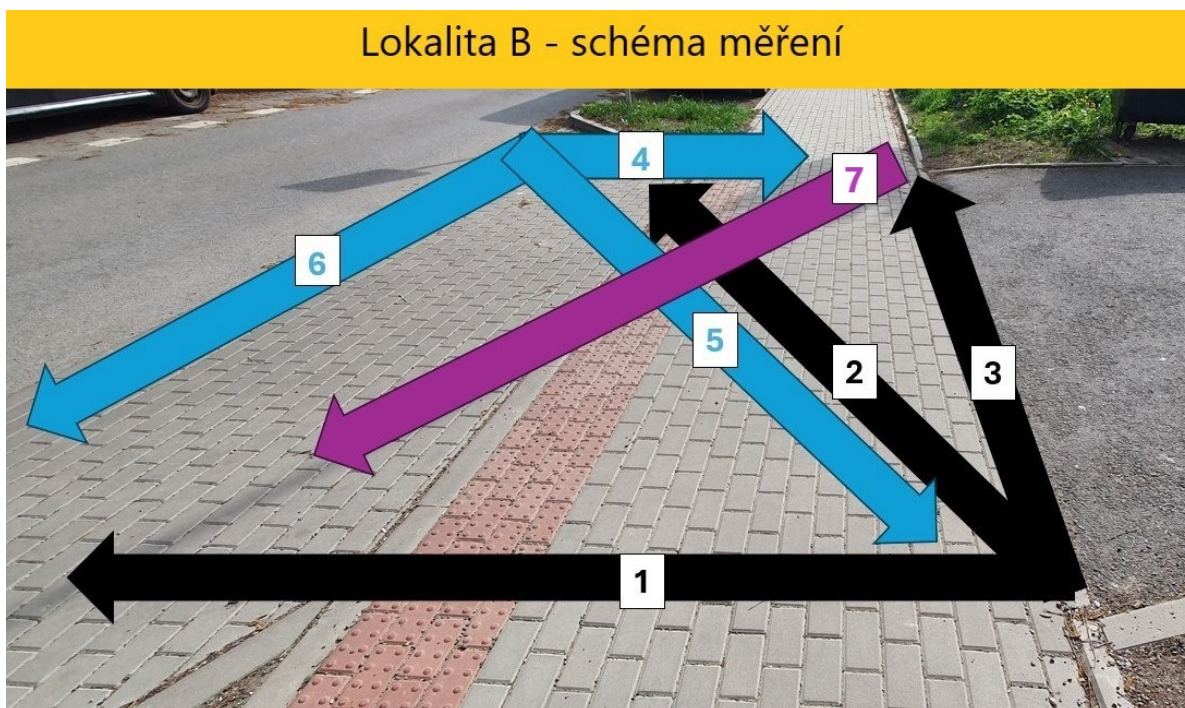
Lokalita A - schéma měření



Obrázek 19: Schéma měření na lokalitě A (vlastní zpracování)



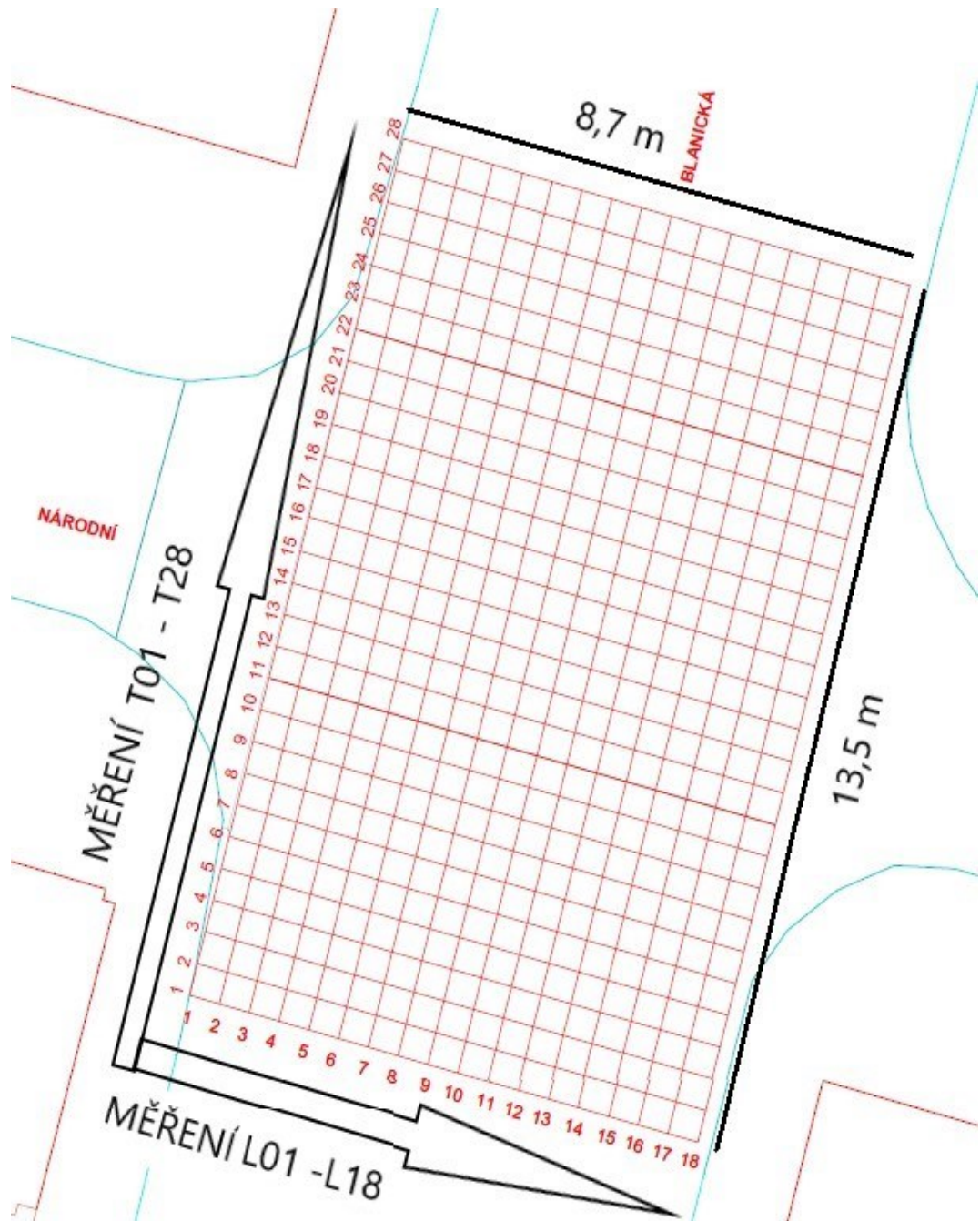
Obrázek 20: Geometrie lokality B (vlastní zpracování)



Obrázek 21: Schéma měření na lokalitě B (vlastní zpracování)

Cílem měření na lokalitě C bylo získat z C-Scanu 3D obraz povrchových IS. K získání takového obrazu je nutno provést měření na rastru. Vzhledem k dostupnému vybavení a předpokládané hustotě a uložení IS byl zvolen rastr s roztečí 0,5 x 0,5 m. Na tomto rastru byly

opět realizovány dvě sady měření, se stejnými anténami jako při předchozích měřeních. Povrch této lokality tvoří asfaltbetonový koberec, její rozměry jsou 8,7 x 13,5 m. Geometrický plán reprezentuje obrázek 22.



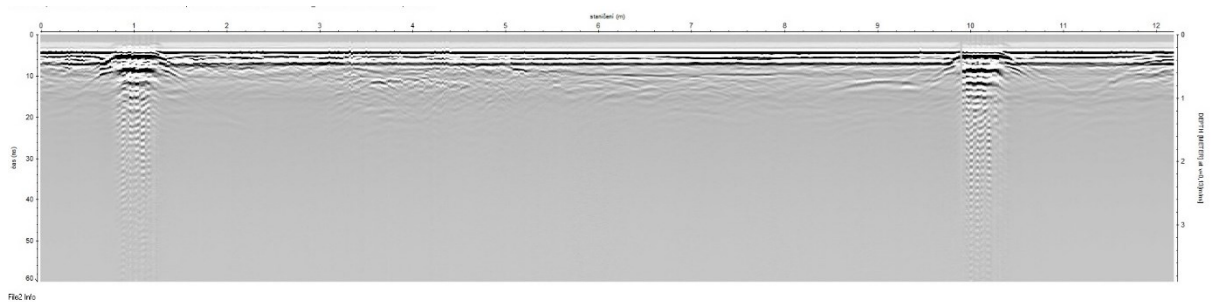
Obrázek 22: Schéma měření na lokalitě C (vlastní zpracování)

3.3 Zpracování naměřených dat

Naměřená data byla zpracována v programu REFLEXW, v oblastech A a B byly zpracovány profily A01 až A07 a B01 až B07. Pro oblast C byly ke zpracování použity všechny profily postupně od CL01 po CL18 a následně CT01 až CT28.

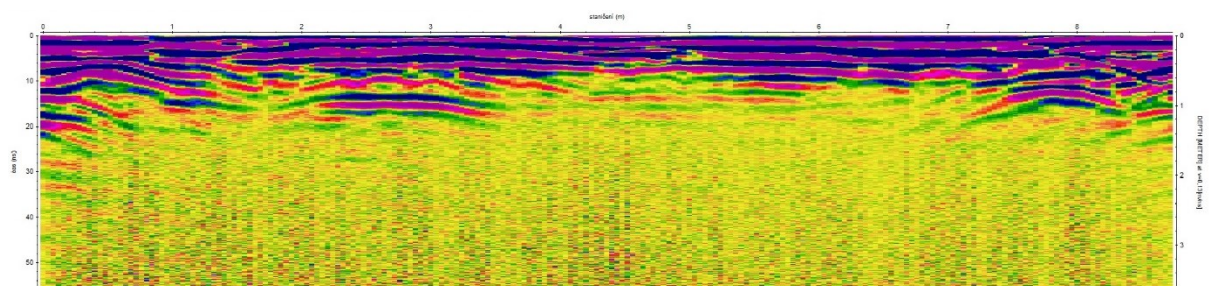
3.3.1 2D zpracování dat

Získaná data ze všech oblastí byla, pro všechny frekvence antén (200 MHz, 400 MHz, 600 MHz a 900 MHz) použité při měření, zpracována v programu REFLEXW pomocí modulu 2D – dataanalysis. Příklad dat v radargramu před zpracování lze vidět na obrázku 23.



Obrázek 23: Radargram před zpracováním dat (vlastní zpracování)

Ve všech případech byly nejprve použity základní filtry pro postprocessing. Jednalo se filtry „dewow“ pro potlačení šumů v nízkofrekvenční oblasti. Pro nastavení správného času začátku měření byl následně aplikován filtr „move starttime“ a pro zesílení odrazů a odstranění útlumu signálu byl nasazen filtr „gain.“ Náhled na takto zpracovaná surová data je vyobrazen na obrázku 24.



Obrázek 24: Surová data po aplikaci základních filtrů (vlastní zpracování)

Další kroky postprocessingu byly nasazeny rozdílně dle jednotlivých oblastí a frekvencí s cílem zvýraznit naměřené veličiny, odstranit nežádoucí šumy a eliminovat ztráty signálu. Vzhledem k nepříliš výrazným hyperbolickým odrazům průběhů IS, byl např. použit filtr

„migration“, který slouží k přepočtu energie difraktovaného odrazu z hyperbol do bodů. Pro lepší grafickou přehlednost výstupů byly obrazy převedeny do barevného spektra a zvýrazněny průběhy IS.

3.3.2 3D zpracování dat

Zaznamenaná data z oblasti C byla nejprve zpracována stejným základním postupem jako data pro 2D zpracování a následně byl na takto připravená data aplikován modul 3D – datainterpretation, který je součástí programu REFLEXW, s jehož pomocí byly vygenerovány grafické výstupy v 3D zobrazení.

V následující kapitole jsou pro ilustraci uvedeny výsledky měření na vybraných profilech ve všech měřených oblastech.

3.4 Interpretace výsledků měření

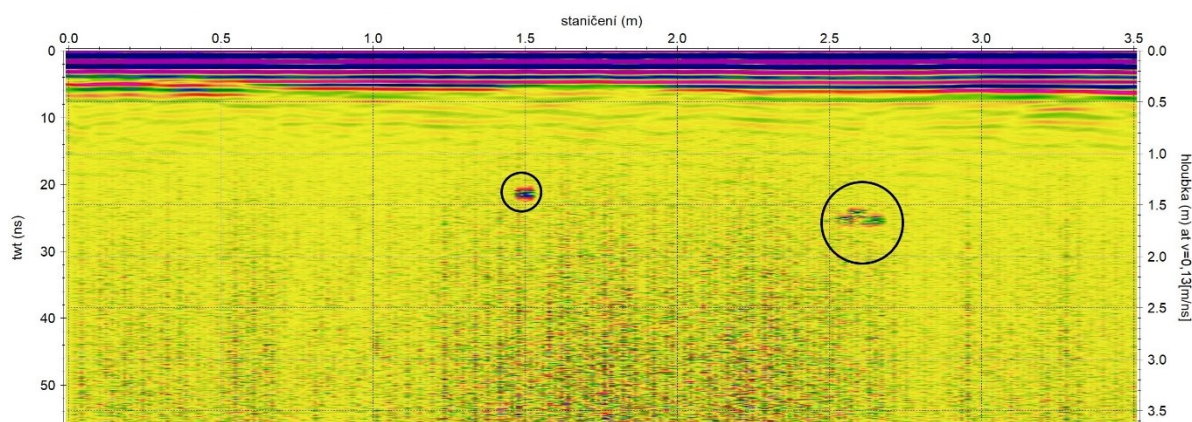
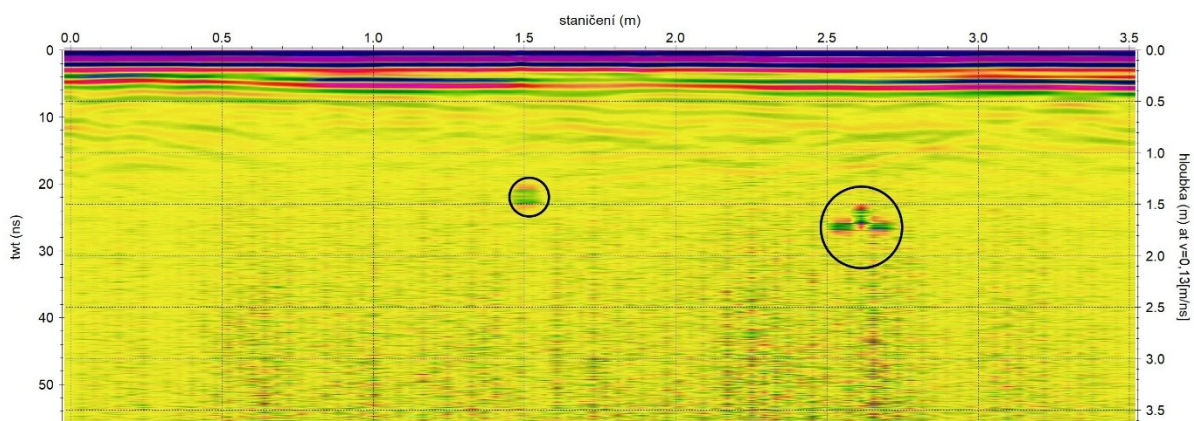
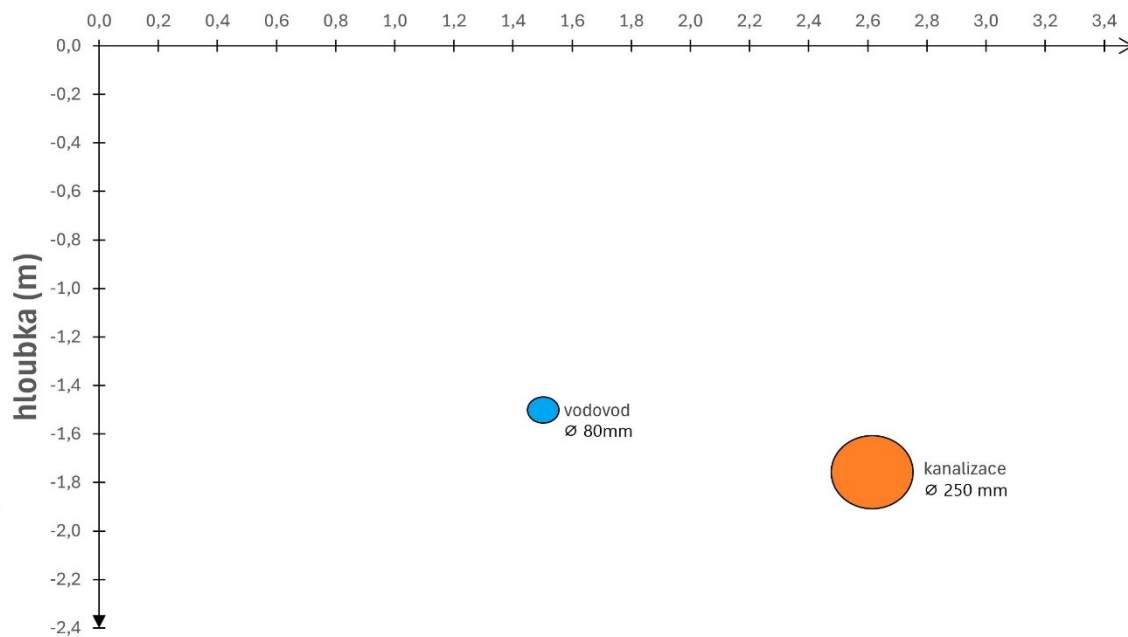
Vzhledem k poměrně rozsáhlému souboru dat získaných při samotném experimentálním měření na 4 frekvencích a 54 profilech, vzniklo po zpracování získaných dat značné množství výstupů, z nichž byly pro ilustraci vybrány profily a naměřené hodnoty na frekvencích, které nejlépe popisují skutečný průběh IS.

3.4.1 Interpretace dat z oblasti A

Pro oblast A se, vzhledem k hloubce uložení IS a jejich velikosti, jako frekvence s nejlepším potenciálem správné detekce průběhu IS projeví antény pracující na frekvencích 400 MHz a 600 MHz. Výsledky porovnání skutečného a nalezeného průběhu IS jsou pro tyto frekvence znázorněny na obrázcích 25 a 26.

Anténa pracující na frekvenci 200 MHz sice správně detekovala kanalizaci z PVC o průměru 250 mm ležící v hloubce 1,75 m, ovšem litinové vodovodní potrubí o průměru 80 mm uložené v hloubce 1,4 m poskytovalo nezřetelný odraz a bylo téměř nemožné ho odlišit od šumu pozadí. Naproti tomu anténa pracující na frekvenci 900 MHz nedokázala detekovat kanalizační potrubí v hloubce 1,75 m a signál z vodovodního potrubí byl také nepříliš zřetelný. Tím se potvrdily teoretické předpoklady, které predikují, že vyšší frekvence antén obtížně až téměř vůbec dokáží detekovat předměty ve větších hloubkách, a že nižší frekvence antén nejsou schopny rozlišit předměty menších velikostí.

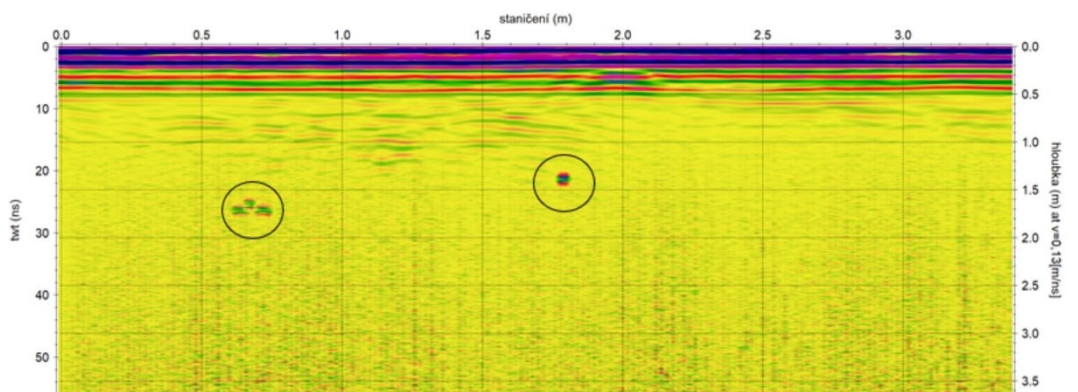
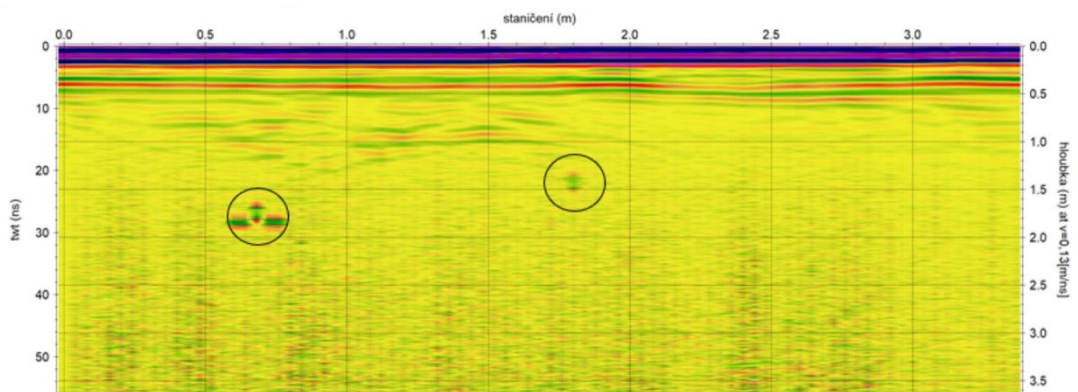
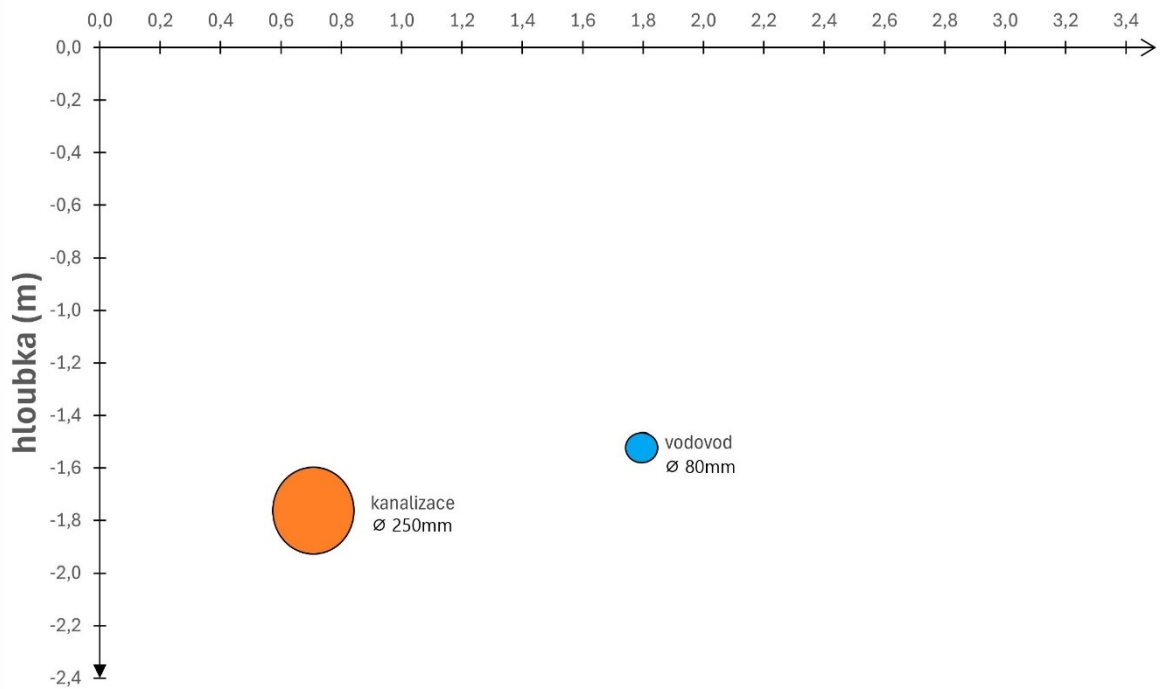
průběh IS na profilu A01 staničení (m)



Obrázek 25: Průběh sítí na profilu A01, frekvence 400 a 600 MHz (vlastní zpracování)

průběh IS na profilu A04

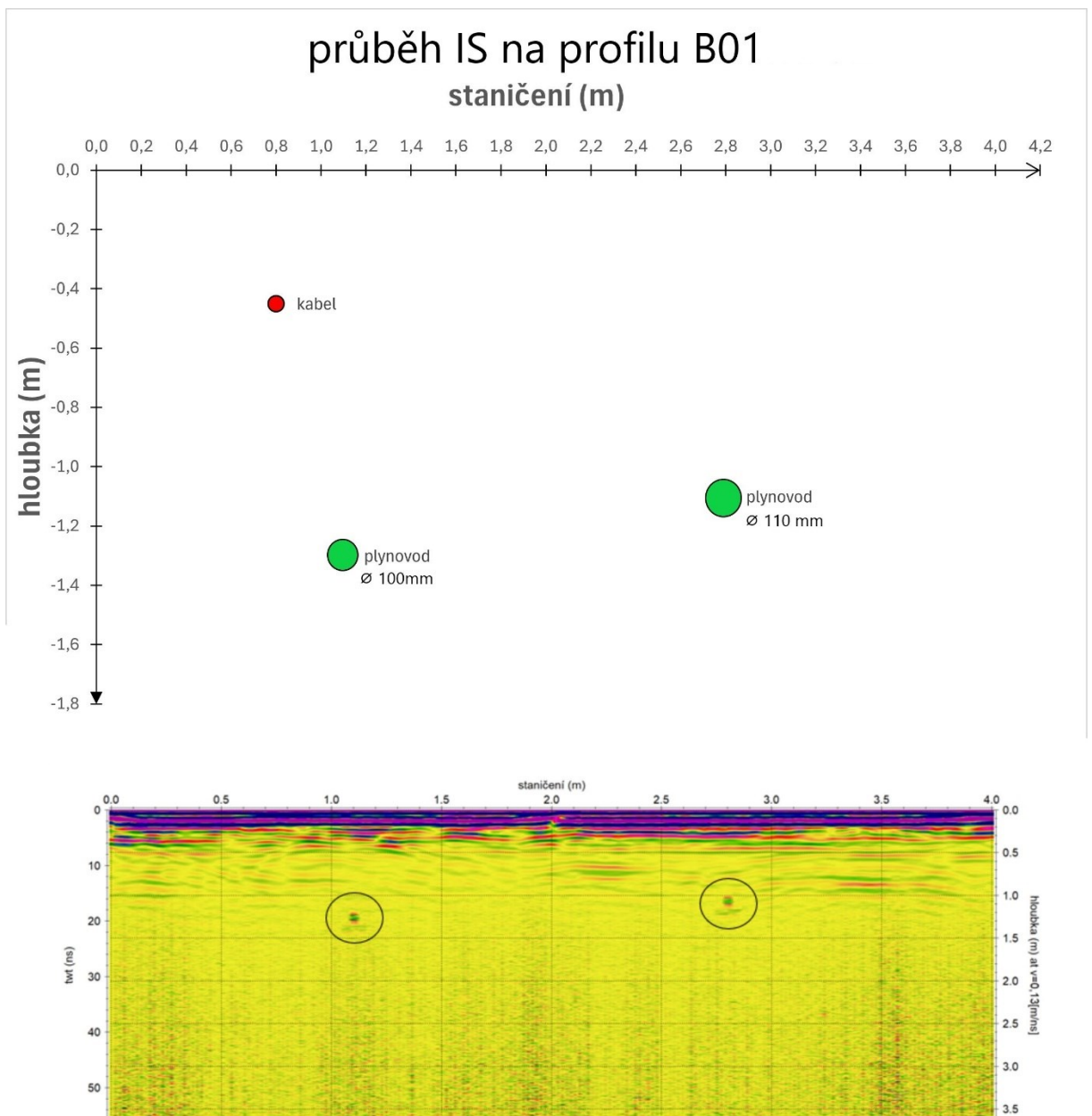
staničení (m)



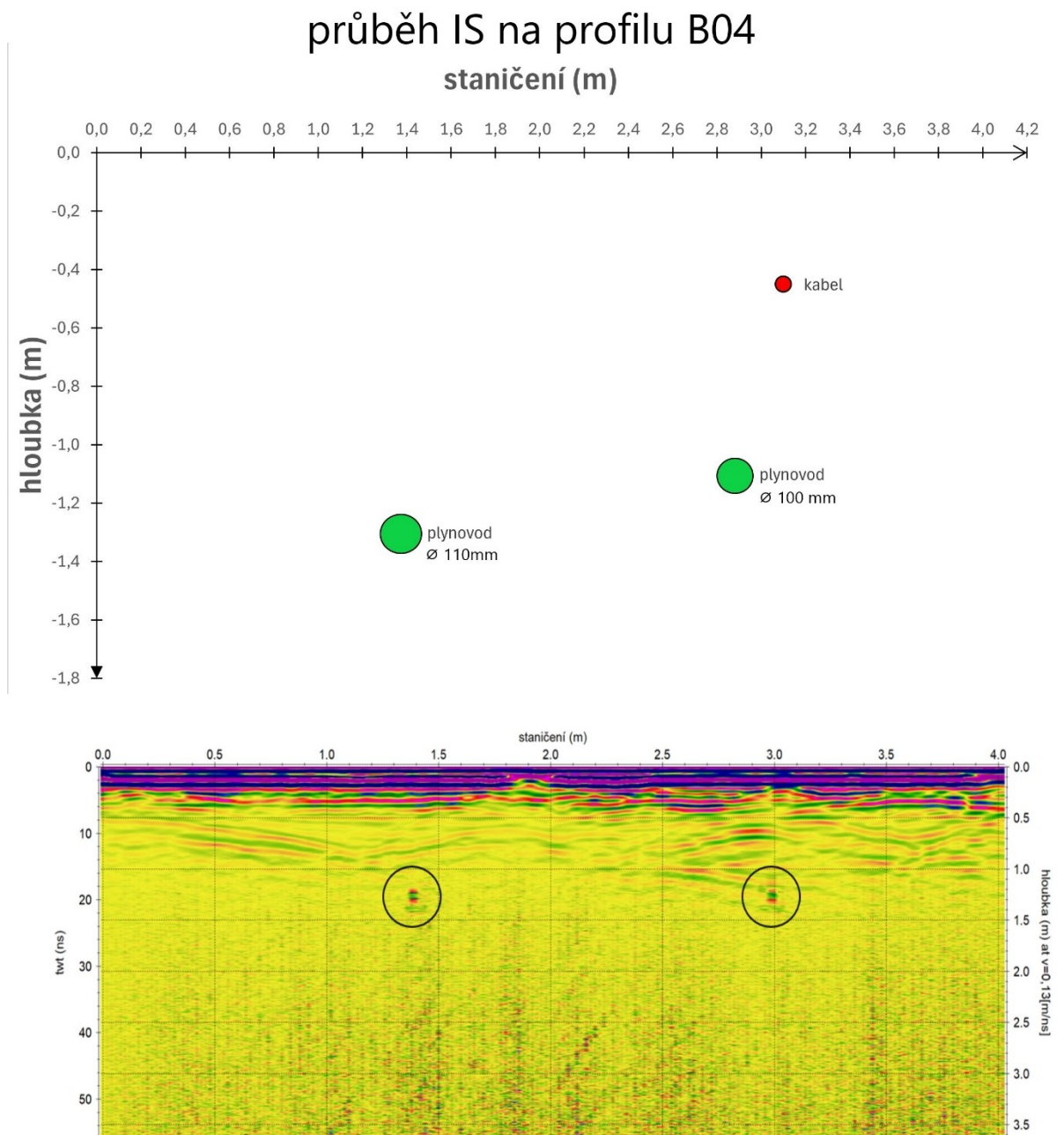
Obrázek 26: Průběh sítí na profilu A04, frekvence 400 a 600 MHz (vlastní zpracování)

3.4.2 Interpretace dat z oblasti B

V oblasti B byla jako frekvence s nejlepší schopností správné detekce průběhu IS vyhodnocena anténa pracující na frekvenci 600 MHz. Vzhledem k velikosti IS a hloubce jejich uložení, dokázala zřetelně detekovat průběh ocelového i PVC plynovodního potrubí. Oproti tomu signál z kabelu nízkého napětí o malém průměru zcela zanikl v šumu pozadí a nebyl detekován anténou s žádnou frekvencí. Porovnání skutečného a nalezeného průběhu IS v oblasti B je zachyceno na následujících obrázcích 27 a 28.



Obrázek 27: Průběh sítí na profilu B01, frekvence 600 MHz (vlastní zpracování)

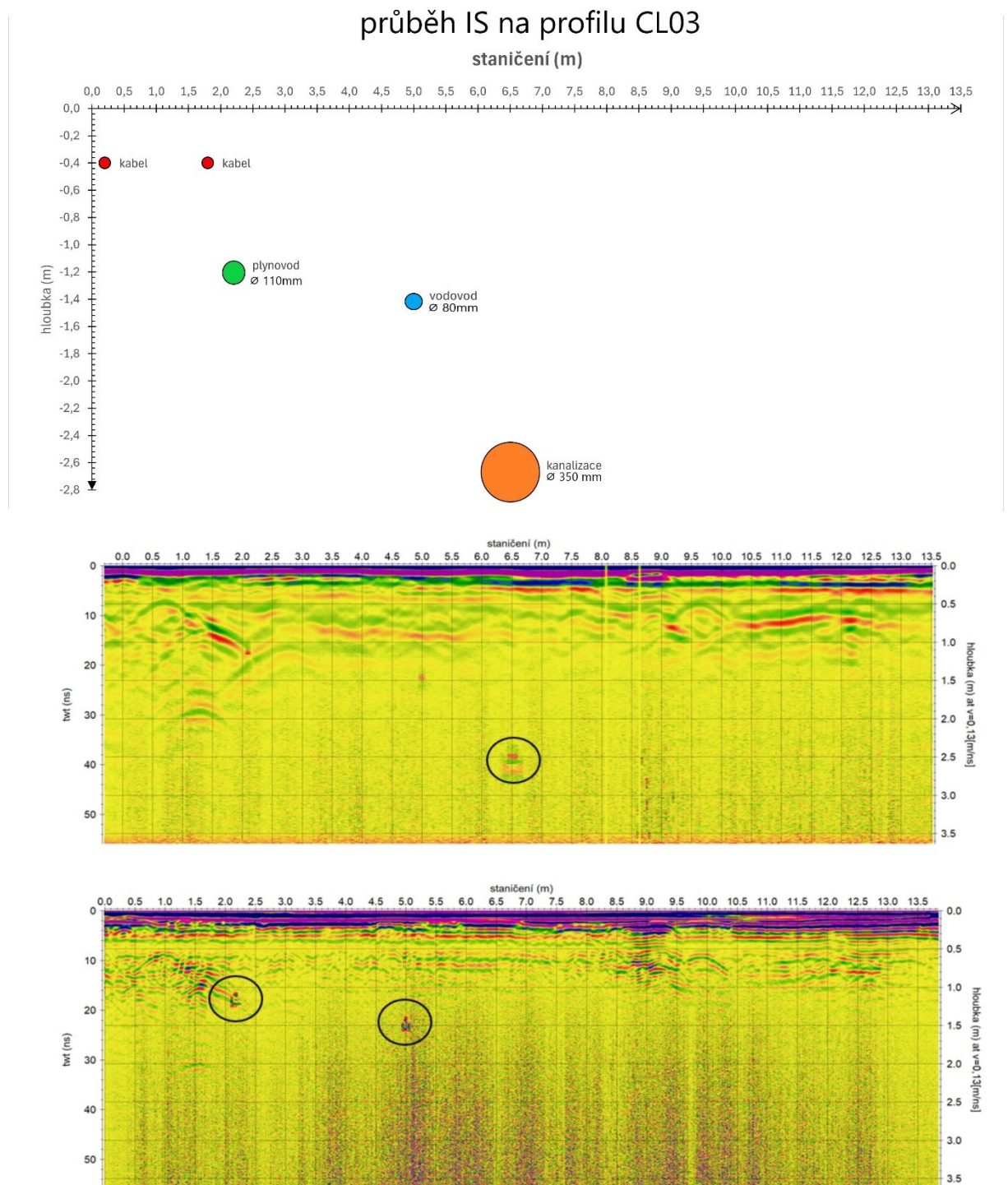


Obrázek 28: Průběh sítí na profilu B04, frekvence 600 MHz (vlastní zpracování)

3.4.3 Interpretace 2D dat z oblasti C

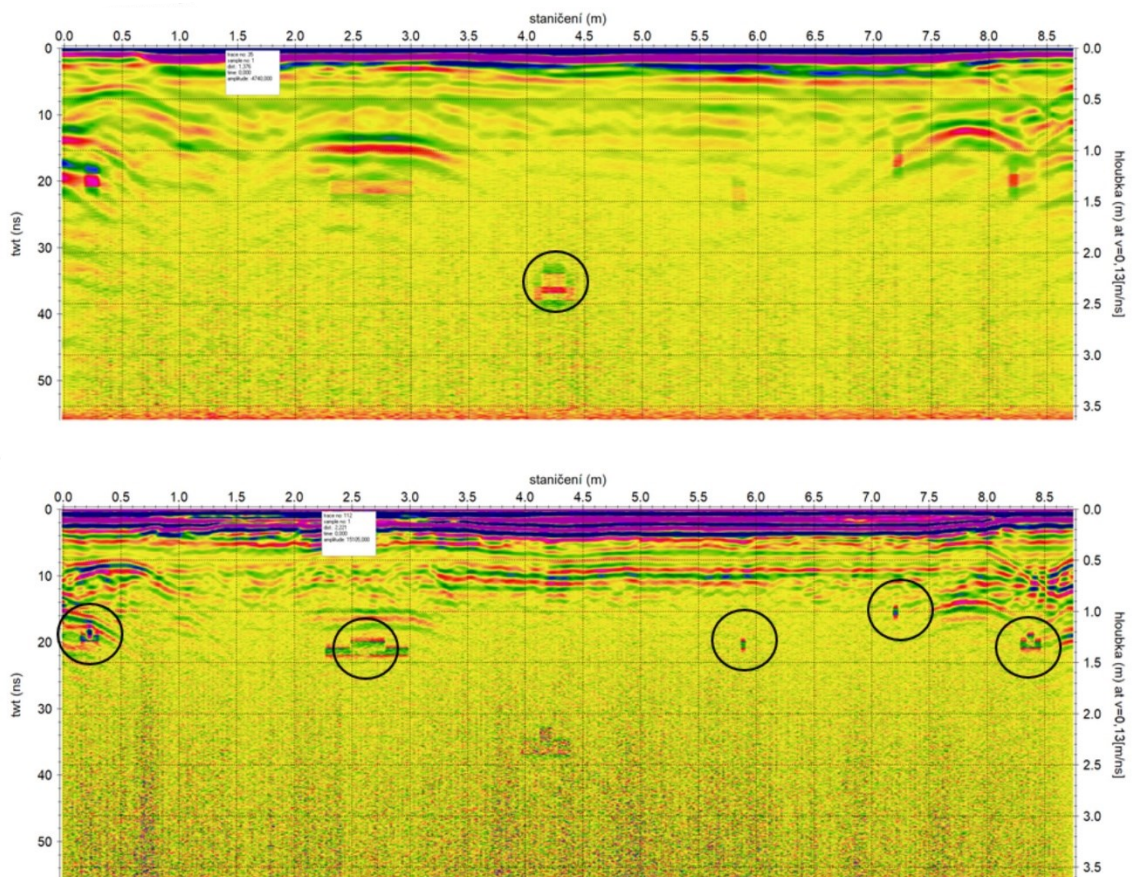
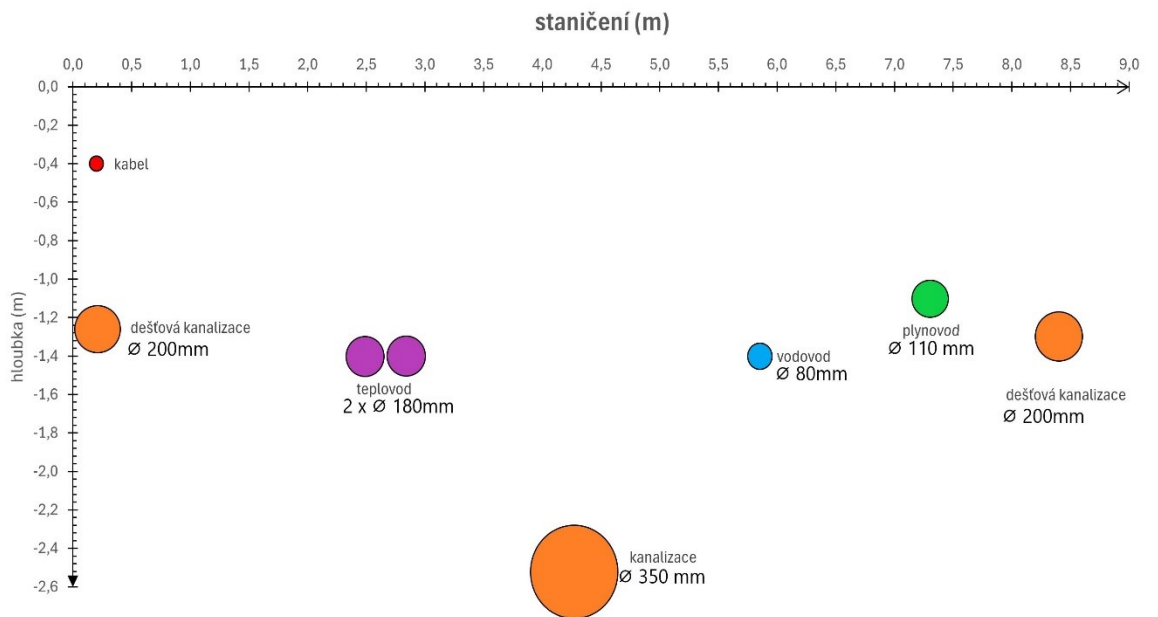
Oblast C byla nejhustěji zasítovaným prostorem ze všech měřených oblastí. IS v této oblasti byly uloženy v hloubkách od 0,4 m do 2,8 m. Materiálové složení IS zahrnovalo sítě z PVC, oceli, litiny a mědi. Rozměrově se uložené sítě pohybovaly od \varnothing 20 mm do \varnothing 350 mm. Vzhledem ke všem těmto skutečnostem, nebyla nalezena žádná anténa s jednou frekvencí,

kteřá by byla schopna detekovat všechny IS zároveň, ale bylo nutno použít kombinaci frekvencí. Příklady takovýchto kombinací pro oblast C jsou vyjádřeny na obrázcích 29 a 30.



Obrázek 29: Průběh sítí na profilu CL03, frekvence 200 a 600 MHz (vlastní zpracování)

průběh IS na profilu CT22

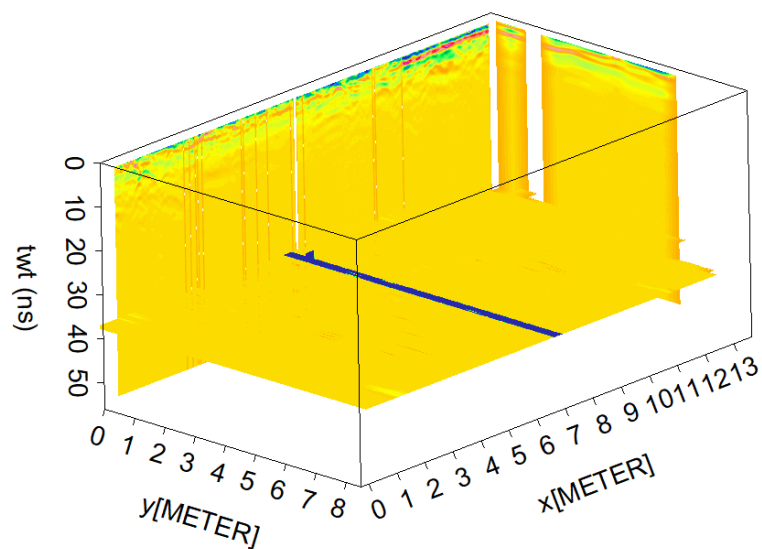


Obrázek 30: Průběh sítí na profilu CT22, frekvence 200 a 600 MHz (vlastní zpracování)

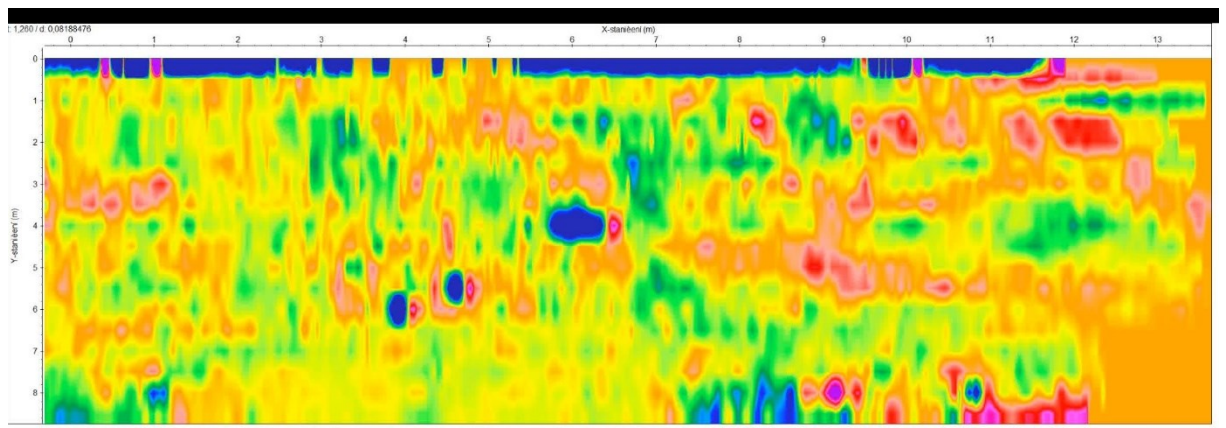
3.4.4 Interpretace 3D dat z oblasti C

Z důvodu náročnosti 3D zpracování dat na HW vybavení a dostupnosti takového vybavení nemohly být zpracovány data pro všechny sítě a profily současně, proto došlo ke zpracování průběhu jednotlivých detekovaných sítí. Příklad zpracování pro průběh kanalizační sítě z PVC uložené v hloubce 2,6 m a \varnothing 350 mm je zachycen na obrázku 31. Na obrázku 32 je znázorněn printscreen z 3D půdorysného pohledu na profilech CL01 – CL22, který byl zpracován do videosouboru.

t: 37,91 / d: 2,46416



Obrázek 31: 3D průběh kanalizační stoky v oblasti C (vlastní zpracování)



Obrázek 32: 3D půdorysné zobrazení IS na profilech CL01 – CL22 (vlastní zpracování)

3.5 Shrnutí experimentální části

V experimentální části mé práce bylo nejprve nutné navrhnout a vybrat vhodnou lokalitu, způsob měření průběhu IS s ohledem na jejich předpokládaný průběh a dostupnost vybavení. V navržených oblastech bylo potřeba přenést navrženou geometrii měření do terénu, jak je zachyceno na obrázku 33.



Obrázek 33: Geometrie měření přenesená na terén (vlastní zpracování)

Následně bylo provedeno nastavení a kalibrace měřící soustavy a zrealizováno experimentální měření. Již toto není triviální záležitost a je jí potřeba věnovat dostatečný čas a úsilí. Po realizaci experimentu byla následně zpracována a vyhodnocena získaná data, což byl s ohledem na jejich značný objem, časově náročný úkol.

Následnou interpretací naměřených dat byl potvrzen předpoklad, že nejlepších výsledků se dosahuje pro profily geometricky umístěné kolmo na pravděpodobný směr průběhu IS. Naproti tomu na šikmých a podélných profilech se průběh sítí nepodařilo zcela přesně určit. K výběru vhodné frekvence antén lze uvést, že nebylo možno určit průběh všech IS za pomoci jedné frekvence antény, vždy bylo nutné využít kombinaci více frekvencí. Žádná z použitých antén také nedokázala dostatečně zřetelně zachytit průběh kabelů nízkého napětí, což by mohlo být způsobeno obsahem vody v podkladních vrstvách komunikací a chodníku, který mohl vnést do naměřených dat velké množství šumů a interferencí, jenž se nepodařilo odfiltrovat.

Ve zrealizované experimentální části se potvrdily teoretické předpoklady, že se vzrůstající frekvencí antén klesá hloubka penetrace signálu a s klesající frekvencí klesá schopnost rozlišení velikosti detekovaných předmětů.

4 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo na základě rešerše literatury a vlastních zkušeností z měření a zpracování GPR dat vypracovat analýzu možností použití GPR pro mapování IS. Na začátku práce byly nastíněny teoretické poznatky týkající se technologie GPR, byly uvedeny obecné informace o této metodě a představeny metody pro určení rychlosti šíření signálu GPR.

Kromě teoretického přístupu bylo tohoto cíle dosaženo také pomocí experimentálních měření in-situ popsaných ve třetí kapitole. Před vlastním měřením s GPR bylo nejprve nutné se seznámit se základními principy a fungováním této technologie. Vlastní práce s GPR sestávala z časově náročné přípravy experimentů a vyhodnocení naměřených dat ve specializovaném SW.

Byly ověřeny platnosti teoretických předpokladů nejen o vlivu frekvencí na dosah a rozlišení detekce podzemních předmětů, ale také o schopnosti GPR detekovat IS nezávisle na jejich materiálovém složení. V této práci byly úspěšně detekovány sítě z PVC, oceli a litiny. Mám za to, že většímu rozšíření použití GPR pro detekci průběhu podzemních IS v tuto chvíli brání náročné ruční provádění experimentálního měření, které je tím omezeno na menší lokality.

Ruční zpracování a vyhodnocení získaných dat je náročné na čas a zkušenosti obsluhy. Dle mého názoru se tak otevírá prostor pro aplikaci procesů umělé inteligence a strojového učení, které by mohly na základě rozsáhlé databáze radargramů provádět prvotní zpracování, čímž by se celý proces zpracování a vyhodnocení dat mohl značně urychlit a zefektivnit. Domnívám se ovšem, že odborně erudovaná a zkušená obsluha GPR bude mít, i přes možnou nemalou pomoc umělé inteligence, vždy nezastupitelnou roli ve správné interpretaci dat.

Závěrem si dovoluji ukončit svou bakalářskou práci citátem jednoho z nestorů světového GPR Davida J. Danielse „*V rukou odborníka představuje georadar bezpečnou a neinvazivní metodu pro provádění vyhledávání bez zbytečného porušování povrchů a provádění výkopů.*“

POUŽITÁ LITERATURA

AFRASIABI, A. et al. Toward the optimisation of the Kalman Filter approach in ground penetrating radar application for detection and locating buried utilities. *Journal of Applied Geophysics*. 2023, **219**, s. 105-220. ISSN 0926-9851. Dostupné z:

<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105220>

AL-NUAIMY, W. et al. Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition. *Journal of Applied Geophysics*. 2000, **43**, s. 154-165. ISSN 0926-9851. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00055-5)

AMARA, L. *Development of Ground Penetrating Radar Signal Modeling and Implementation for Transportation Infrastructure Assessment*. Blacksburg, Virginia, 2001. 263 s. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University.

ANNAN, A. P. GPR – History, Trends, and Future Developments. *Subsurface sensing technology and applications*. 2002, **3**(4), s. 253-269. ISSN 1573-9317. Dostupné z: <https://doi.org/10.1023/A:1020657129590>.

ANNAN, A. P. Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar, In: JOL, H. M. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Elsevier, 2009, s. 1-40. ISBN 9780444533487. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00001-6>.

BORECKÝ, V. *Implementace technologie GPR do současných metod diagnosticky pozemních komunikací*. Pardubice, 2017. 168 s. Disertační práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Školitel doc. Ing. Vladimír Doležel, CSc.

BUTNOR, J. et al. Using Ground-Penetrating Radar to Detect Tree Roots and Estimate Biomass. In: MANCUSO, S. *Measuring Roots, An Updated Approach*. Berlin, Springer, 2011, s. 213–245. ISBN 978-3-642-22067-8. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-642-22067-8_12.

CAO, Y. et. al. Implementation of Ground Penetrating Radar. Virginia: Minnesota Department of Transportation, 2007, 29 s. Dostupné z: <https://www.lrrb.org/pdf/200734.pdf>.

CASSIDY, N. J. Electrical and Magnetic Properties of Rocks, Soils and Fluids. In: JOL, H. M. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Elsevier, 2009a, s. 41-72. ISBN 9780444533487. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00001-6>.

CASSIDY, N. J. Ground Penetrating Radar Data Processing, Modeling and Analysis. In: JOL, H. M. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Elsevier, 2009b, s. 141-176. ISBN 9780444533487. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00001-6>.

DANIELS, D. J. Antennas. In: JOL, H. M. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, Elsevier, 2009, s. 99-139. ISBN 9780444533487. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00001-6>.

DANIELIS, D. J. Surface-penetrating radar. *Electronics & communication engineering journal*. 1996, **8** (4), s. 165-182. ISSN 0954-0695.

DANIELS, D. J. and UTSI, E. GPR case histories an known physical principles. *IWAGPR 2013 – Proceedings of the 2013 7th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*. Nantes, France, 2013, s. 1-9. ISBN 978-1-4799-0937-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2013.6601507>.

EPA – United States Environmental Protection Agency. *Condition Assessment of Wastewater Collection Systems*. Washington DC, 2009, 74 s. Dostupné z: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1003ZQY.PDF?Dockey=P1003ZQY.PDF>

GHOZZI, R. et al. Mapping of Sewer Lines Using GPR: A Case Study in Tunisia. *Data*. 2018, **3** (4), s. 11-30. ISSN 2306-5729. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/data3040040>.

GOKHAN, K. GPR Raw-Data Order Statistic Filtering and Split-Spectrum Processing to Detect Moisture. *Remote Sensing*. 2014, **6** (6), s. 4687-4704. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs6064687>.

GRIMM, R. E. New Analysis of the Apollo 17 Surface Electrical Properties Experiment. *Icarus*. 2018, **314**, s. 389–399. ISSN 0019-1035, dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.06.007>.

HASIMAH, A. et al. Ground penetrating radar for buried utilities detection and mapping: a review. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, **2107**, s. 12-56. Dostupné z: <https://10.1088/1742-6596/2107/1/012056>.

KUREL, R. *Analýza metod pro určení rychlosti signálu GPR*. Pardubice, 2018. 80 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Ing. Vladislav Borecký, Ph.D.

LESTER, J. and BERNOLD, L. E. Innovative process to characterize buried utilities using Ground Penetrating Radar. *Automation in Construction*. 2007, **16** (4), s. 546-555. ISSN 0926-5805. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.09.004>.

MALINSKÁ, V. *Analýza možností GPR pro detekci konstrukčních vrstev netuhých vozovek PK*. Pardubice, 2016. 136 s. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Ing. Vladislav Borecký, Ph.D.

METJE, N. et al. Mapping the Underworld – State-of-the-art review. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2007, **22** (5-6), s. 568–586. ISSN 0886-7798. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.04.002>.

METWALY, M. Application of GPR technique for subsurface utility mapping: A case study from urban area of Holy Mecca, Saudi Arabia. *Measurement*. 2015, **60**, s. 139–145. ISSN 0263-2241. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.064>.

Olhoeft, G.R. Selected Bibliography on Ground Penetrating Radar. In: *Proceedings of the Symposium on the Applications of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. Golden, CO, 1988, s. 462-520.

PORSANI, J. L. et al. GPR applied to mapping utilities along the route of the Line 4 (yellow) subway tunnel construction in São Paulo City, Brazil. *Journal of Applied Geophysics*. 2012, **80**, s. 25-31. ISSN 0926-9851. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.01.001>.

PREGO, F. J. et al. Efficient GPR data acquisition to detect underground pipes. *NDT & E International*. 2017, **91**, s. 22-31. ISSN 0963-8695. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.06.002>.

RADETON s.r.o. radeton.cz [online]. 2024 [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.radeton.cz/lokatory-inzenyrskych-siti/3558-rd8200-novinka>.

RASOL, M. et al. Ground Penetrating Radar System: Principles. In AMICO, D., VENUTI, V. editors. *Handbook of Cultural Heritage Analysis*. Springer Nature Switzerland, 2022. s. 706–733. ISBN 978-3-030-60016-7. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-030-60016-7_25.

SAARENKETO, T. *Elektrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys*. Oulu, 2006. University of Oulu.

SANDMEIER GEOPHYSICAL RESEARCH. sandmeier-geo.de [online]. 2024 [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.sandmeier-geo.de/reflexw.html>.

SĂRĂCIN, A. Using georadar systems for mapping underground utility networks. *Procedia Engineering*. 2017, **209**, s. 216-223. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.150>.

SHOKRI, N. et al. Non-Destruction Method for Detecting Corroded Underground Pipe Using Ground Penetrating Radar. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, **540**, s. 12–27. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/540/1/012027>.

TAKAHASHI, K. et al. Basics and Application of Ground – Penetrating Radar as a Tool for Monitoring Irrigation Process. In: KUMAR, M. editor. *Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management*. InTech, 2012. s. 155–180. ISBN 978-953-51-0117-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/29324>.

TESS, X. H. L., et al. GPR imaging criteria. *Journal of Applied Geophysics*. 2019. **165**, s. 37–48. ISSN 0926-9851. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.04.008>.

TP – 233. *Georadarová metoda konstrukcí pozemních komunikací*. Praha: Ministerstvo dopravy, 2011. 13 s.

WOLFF, Ch. radartutorial.eu [online]. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/04.history/hi86.en.html>.

YAN, J. et al. The ladm-based 3D underground utility mapping: case study in Singapore. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019, **XLII-4/W15**, s. 117-122. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W15-117-2019>.

YANG, S. End-to-end deep learning model for underground utilities localization using GPR. *Automation in Construction*. 2023, **149**, s. 146-162. ISSN 0926-580. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104776>.

ZIKMUND ELECTRONICS s.r.o. e-zikumund.cz [online]. [cit.2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.e-zikumund.cz/satelitni-kamera>.