

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvirna različica doktorske disertacije.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is an original PDF file of doctoral thesis.

When citing, please refer as follows:

Šarlah, N. 2016. Izdelava modela georadarskih opazovanj za evidentiranje gospodarske infrastrukture. = Development of the georadar observation model for underground infrastructure detection. Doctoral dissertation. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (Mentor Podobnikar, T., somentor Mušič, B.)

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5808/>

Datum arhiviranja / Archiving Date: 16-09-2016

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za radbeništvo
in geodezijo*



PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidat:
NIKOLAJ ŠARLAH

**IZDELAVA MODELA GEORADARSKIH OPAZOVANJ
ZA EVIDENTIRANJE GOSPODARSKE
INFRASTRUKTURE**

Doktorska disertacija št.: 251

**DEVELOPMENT OF THE GEORADAR OBSERVATION
MODEL FOR UNDERGROUND INFRASTRUCTURE
DETECTION**

Doctoral Dissertation No.: 251

Soglasje k temi doktorske disertacije je dala Komisija za doktorski študij Univerze v Ljubljani
na 29. seji, 13. junija 2012.

Za mentorja je bil imenovan doc. dr. Tomaž Podobnikar,
za somentorja pa doc. dr. Branko Mušič, UL FF.

Ljubljana, 14. september 2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:

- doc. dr. Tomaž Podobnikar, UL FGG,
- doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, UL FGG,
- doc. dr. Branko Mušič, UL FF,
- izr. prof. dr. Miloš Pantoš, UL FE,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 20. seji, 20. aprila 2011.

Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:

- doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, UL FGG,
- doc. dr. Miloš Bekovič, UM FERi,
- izr. prof. dr. Damir Varevac, Univerza v Osijeku, Fakulteta za gradbeništvo,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 28. redni seji, 4. maja 2016.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG, predsednik,
- izr. prof. dr. Tomaž Podobnikar, mentor,
- doc. dr. Branko Mušič, somentor,
- doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, UL FGG,
- doc. dr. Miloš Bekovič, UM FERi,
- izr. prof. dr. Damir Varevac, dekan, Univerza v Osijeku, Fakulteta za gradbeništvo,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 30. redni seji, 6. julija 2016.

STRAN ZA POPRAVKE »ERRATA«

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna«

IZJAVE

Spodaj podpisani študent Nikolaj Šarlah, vpisna številka 26109703, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom »Izdelava modela georadarskih opazovanj za evidentiranje gospodarske infrastrukture«

IZJAVLJAM

1. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani

Datum: 14. 9. 2016

Podpis študenta:

»Ta stran je namenoma prazna«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	528.8:711.8:657.24:338.583 (043)
Avtor:	mag. Nikolaj Šarlah, univ. dipl. inž. geod.
Mentor:	izr. prof. dr. Tomaž Podobnikar
Somentor:	doc. dr. Branko Mušič
Naslov:	Izdelava modela georadarskih opazovanj za evidentiranje gospodarske infrastrukture
Tip dokumenta:	doktorska disertacija
Obseg in oprema:	233 str., 40 pregl., 156 sl., 123 en., 259 ref., 2 dod.
Ključne besede:	georadar, plitva geofizika visoke ločljivosti, GPR, evidentiranje gospodarske infrastrukture, natančnost in točnost georadarske metode

Izvleček

Dolgoletne lastne praktične izkušnje iz vzpostavitve, vodenja in vzdrževanja zbirnega katastra gospodarske javne infrastrukture ter vsakodnevnega dela na področju evidentiranja gospodarske infrastrukture (GI), kamor sodijo vsi podzemni komunalni, energetski ter komunikacijski vodi, kažejo na nujnost uporabe nedestruktivnih metod evidentiranja podzemne GI. Podobne težnje je danes zaznati tudi drugod v tujini. V doktorski disertaciji smo zasnovali in predlagali model georadarskih opazovanj za evidentiranje GI na podlagi nadzorovanega bazenskega testnega okolja v treh fazah. V prvi fazi smo vpeljali terestrično kinematično metodo spremljanja položaja georadarja in povezali geofizikalni in geodetski niz opazovanj, ki smo jim v drugi fazi s pomočjo slikovnega ujemanja radargramov določili latenco. V najpomembnejši fazi modela smo s povezovanjem nizov standardnih postopkov obdelave georadarskih signalov, ob podpori naprednih algoritmov za obdelavo signalov, pridobili, interpretirali ter vizualizirali rezultate georadarskih opazovanj. Zgrajeni testni bazeni, kamor smo vgradili vso danes pomembnejšo GI, so konstrukcijsko zelo dober približek dejanskih voziščnih konstrukcij regionalnih in lokalnih cest ter pohodnih površin, izvedeni na podlagi danes veljavnih tehničnih specifikacij za načrtovanje voziščnih konstrukcij. S pomočjo znanih podatkov o dimenzijah in materialih vgrajene GI, materialih in debelinah voziščne konstrukcije, posteljice in nosilnih tal, laboratorijsko izmerjenih relativnih dielektričnosti in volumskega deleža vode ter geodetskih metod izmere GI v testnih bazenih, prevzetih kot referenčne vrednosti, smo analizirali sposobnost in kakovost predlaganega modela pri evidentiranju podzemne GI. Predlagani model, pridobljen v testnih bazenih, je bil v nadaljevanju preizkušen na dveh izbranih območjih realnega urbanega okolja. Z rezultati smo potrdili, da je mogoče z optimalno sestavljenim modelom pridobiti informacije o dimenzijah, globini, naklonu in položaju vodov in cevi v različnih zahtevnejših okoliščinah urbanega okolja, ki ga pogojuje debelina in sestava voziščnih konstrukcij ter prisotnost nenadzorovanih spremenljivk naravnega okolja, kot so vlaga in relativna dielektričnost. Realno je bilo pričakovati povprečno decimetrsko položajno in višinsko natančnost. Pomembni dodatni element je tudi 3D-vizualizacija evidentirane GI s predlaganim modelom. Predlagani model georadarskih opazovanj oziroma raziskave evidentiranja GI, ki so predstavljene v tej disertaciji, so prve takšne raziskave izvedene na območju Slovenije. Še več, testno okolje v obliki testnih bazenov, ki je bilo razvito za namen te disertacije, vsebuje vse elemente realnega urbanega okolja, kot takšno je edinstveno in eno redkih v svetu. V prihodnosti lahko pričakujemo aktivnejšo vlogo georadarskih opazovanj pri evidentiranju GI.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	528.8:711.8:657.24:338.583 (043)
Author:	Nikolaj Šarlah, M.Sc.
Supervisor:	Assoc. Prof. Tomaž Podobnikar, Ph.D.
Cosupervisor:	Assist. Prof. Branko Mušič, Ph.D.
Title:	Development of the georadar observation model for underground infrastructure detection
Document type:	Doctoral Dissertation
Notes:	233 p., 40 tab., 156 fig., 123 eq., 259 ref., 2 app.
Keywords:	georadar, high resolution shallow geophysics, GPR, public infrastructure recording, precision and accuracy of georadar method

Abstract

The necessity for the implementation of non-destructive methods for recording has arisen from our long term practical experience of extremely wide range of solutions regarding establishment, management and maintenance of the Consolidated Cadastre of Public Infrastructure of the Republic of Slovenia, as well as from our daily work in the field of recording infrastructure consisting of public utilities, energy infrastructure and communication facilities. Similar trends may now also be observed elsewhere in the world. In this thesis, ground-penetrating radar (GPR) observation for monitoring buried utilities based on controlled testing pool environment has been designed and proposed as a three phase process. In the first phase, the kinematic method for positioning GPR is introduced and geophysical and geodetic sets of observation are connected. In the second phase, the systematic latency with images matching (radargrams) is determined. In the final and most important phase of the procedure, the integration of a series of standard processing of GPR signals with the support of advanced algorithms for signal processing results of GPR observations have been interpreted and visualized. The testing pools, into which all of today's important utilities have been buried, are a good approximation of pavement structures of regional and local roads as well as pedestrian precincts made on the basis of applicable technical specifications for pavement structure planning. Using all known data of the dimensions and buried utilities materials, pavement materials, pavement thickness, sub-base and subgrade, laboratory controlled dielectric, volume percentage of water content, geodetic measurements and considering method used in testing pools as given reference values, accuracy and precision of the proposed model have been analyzed in recording underground utilities infrastructure. The proposed model obtained in testing pools was further on tested in two selected areas of real urban environment. The results have shown that it is possible on the basis of optimum composed model to obtain information on dimensions, depth, inclination and position of ducts, pipes and cables in various demanding circumstances of urban environment subject to thickness and composition of pavement structure and the presence of uncontrolled variables of natural environment such as moisture and permittivity. It is realistic to expect average decimetre position (2D) and height accuracy. Important additional element is also three dimensional visualization of utility infrastructure based on the proposed model. The proposed model of GPR observations and/or research of recording utilities infrastructure, as presented in the thesis, is the first such research carried out in the territory of Slovenia. Moreover, the testing environment with all of its elements of real urban environment in the shape of testing pools has been created for the purpose of the present thesis and is as such unique and one among the few in the world. In the future, more active role in the matter of GPR observations for monitoring and recording utilities infrastructure may be expected.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem predvsem mentorju izr. prof. dr. Tomažu Podobnikarju in somentorju doc. dr. Branku Mušiču za strokovno pomoč in usmerjanje skozi celotno obdobje nastajanja doktorske disertacije.

Še posebej se zahvaljujem somentorju doc. dr. Branku Mušiču za potrpežljivost, vodenje, spodbudo ter pomoč pri vseh meritvah, obiskih v tujini ter za telefonske pogovore tudi ob neprimernih urah.

Hvala dr. Karl-Josefu Sandmeierju za podporo pri uporabi programskega orodja, prof. dr. Jensu Tronickeju za uporabne nasvete, doc. dr. Domnu Mongusu za koristne napotke pri obdelavi radargramov in dr. Benjaminu Batističu za plodne konzultacije.

Hvala tudi Douglasu Kennyju iz podjetja Geophysical Survey Systems, Inc., in Samu Robertsu iz podjetja Geophysics and Utility Mapping, Ltd., za koristne tehnične nasvete, ter Roku Rutarju, univ. dipl. inž. geod., za nesebično pomoč pri manipuliranju s podatki v AutoCAD Civil 3D-okolju.

Doktorska disertacija je predvsem rezultat sodelovanja številnih podjetij in njihovih zaposlenih, ki so me spodbujali in pomagali pri reševanju marsikatere težave. Zahvaljujem se Iztoku Piklu in njegovemu podjetju za predano nepremičnino v posest, Andreju Petelinšku, uni. dipl. inž. grad., in Vojku Orlčniku, dipl. inž. grad., lastnikoma gradbenega podjetja Peor, d. o. o., za nesebično pomoč in material pri gradnji bazenov. Zahvaljujem se tudi Dušanu Filipovu, dipl. inž. geod., iz geodetskega podjetja Geo-F, s. p., za ves trud in geodetske instrumente, Elektru Celje, d. d., Vodovod-Kanalizaciji Celje, d. o. o., Energetiki Celje, d. o. o., Elektru Turnšek, d. o. o., T-2, d. o. o. ter Telekomu Slovenije, d. o. o., za podarjene cevi in kable.

Sin Anže (veliki mojster hokejskega ploščka) in Petra: brez vaju in vajine potrpežljivosti se te naloge sploh nikoli ne bi lotil.

»Ta stran je namenoma prazna«

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE »ERRATA«	I
IZJAVA O AVTORSTVU	III
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VI
ZAHVALA	VII
KAZALO VSEBINE	IX
KAZALO PREGLEDNIC	XIII
LIST OF TABLES	XV
KAZALO SLIK	XVII
LIST OF FIGURES	XXIV
1 UVOD	1
1.1 Motivacija	1
1.2 Izhodišča, cilji in hipoteza.....	3
1.3 Metoda dela.....	4
1.4 Predstavitev poglavij doktorske disertacije	6
2 GEORADARSKA METODA	9
2.1 Teoretične osnove	9
2.2 Osnovna teorija elektromagnetnega polja	11
2.3 Širjenje, odboj in lom elektromagnetnih valov	13
2.4 Elektromagnetne lastnosti medija	16
2.4.1 Dielektrična permitivnost.....	16
2.4.2 Električna prevodnost.....	17
2.4.3 Magnetna permeabilnost	18
2.5 Lastnosti georadarskega valovanja.....	18
2.5.1 Dušenje.....	19
2.5.2 Hitrost.....	20
2.5.3 Globina penetracije EMV.....	21
2.6 Frekvenca, valovna dolžina in interferenca.....	22
2.6.1 Empirične relacije med relativno dielektričnostjo in vsebnostjo vode v mediju.....	24
2.6.2 Prostorska ločljivost	26
2.6.3 Učinek materiala GI na obliko refleksijskih hiperbol	29
2.7 Določevanje položaja georadarja	29
2.7.1 Opredelitev dimenzije mreže in zahtevane položajne natančnosti.....	33
2.7.2 Zahtevana natančnost položaja in globin georadarskih opazovanj	34
2.7.3 Slikovno ujemanje parov profilov	36
2.8 Obdelava radargramov	37
2.8.1 Organizacija podatkov.....	38

2.8.2	Odstranitev zamika signala.....	39
2.8.3	Popravek ničelnega časa.....	39
2.8.4	Ojačitev signala.....	40
2.8.5	Časovni in prostorski filtri.....	41
2.8.6	Glajenje signala.....	43
2.8.7	Migracija.....	44
2.8.8	Topografska korekcija.....	45
2.8.8.1	Topografska migracija.....	47
2.8.8.2	Položajna in višinska korekcija zaradi višine reflektorja.....	49
2.8.9	Globina ciljnega objekta.....	51
2.8.10	Dimenzija ciljnega objekta.....	51
2.8.11	Povezovanje postopkov obdelav v modele.....	55
2.9	Grafično prikazovanje rezultatov.....	55
3	TESTNI BAZENI.....	57
3.1	Načrtovanje testnih bazenov.....	57
3.2	Posteljica testnih bazenov.....	60
3.3	Vrste in dimenzioniranje voziščnih konstrukcij.....	62
3.3.1	Spodnja nevezana nosilna plast testnih bazenov.....	63
3.3.2	Asfaltna krovna plast testnih bazenov.....	64
3.3.2.1	Asfaltna zgornja vezana nosilna plast testnih bazenov.....	65
3.3.2.2	Asfaltna obrabna in nosilnoobrabna plast testnih bazenov.....	66
3.3.2.3	Debelinski indeks voziščnih konstrukcij testnih bazenov.....	67
3.3.2.4	Odpornost proti učinkom zmrzovanja.....	68
3.4	Skladnost cest podobnih obremenitev in lastnosti s cestami v testnih bazenih.....	68
3.5	Vgrajena gospodarska infrastruktura in njena globina.....	71
3.5.1	Vgrajene plinovodne cevi.....	71
3.5.2	Vgrajene vodovodne cevi.....	73
3.5.3	Vgrajene kanalizacijske cevi.....	75
3.5.4	Vgrajeni električni vodi.....	76
3.5.5	Vgrajena kabelska kanalizacija in vodi elektronskih komunikacij.....	77
4	IZVAJANJE GEORADARSKIH RAZISKAV.....	81
4.1	Pregled uporabljenih instrumentov in programske opreme pri razvoju modela.....	81
4.2	Vzpostavitev geodetske mreže za določevanje položaja infrastrukture in georadarja.....	83
4.2.1	Izbira položaja, stabilizacija in signalizacija referenčnih točk geodetske mreže.....	84
4.2.2	Določevanje položaja referenčnih točk geodetske mreže.....	85
4.2.2.1	Izravnava višinske mreže.....	86
4.2.2.2	Izravnava položajne mreže.....	88
4.2.3	Določevanje položaja in višine vgrajene infrastrukture v testnih bazenih.....	89
4.3	Določevanje georadarskih profilov in potek merjenja.....	92
4.4	Pridobivanje položaja georadarja.....	94
4.5	Latenca.....	95

4.6	Določevanje deleža vsebnosti vode v bazenih	99
4.7	Ocena relativne dielektričnosti.....	101
4.7.1	Ocena relativne dielektričnosti s pomočjo impedančne spektroskopije.....	103
4.8	Optimizacija obdelave.....	106
4.9	Rezanje sledi	107
4.10	Popravek zamika signala.....	107
4.11	Popravek ničelnega časa.....	107
4.12	Časovna omejitev dvojnega časa potovanja signala.....	108
4.13	Ojačitev signala.....	109
4.14	Odstranitev povprečja signala	112
4.15	Filter odstranitve ozadja in pasovnoprepustno filtriranje.....	113
4.16	Filtriranje f-k	115
4.17	Dekonvolucija	118
4.18	Določevanje globine (hitrosti).....	119
4.19	Topografska korekcija.....	123
4.20	Migracija	123
4.21	Interpretacija – ocenjevanje premera cevi.....	124
4.22	Izbiranje in interpretacija ciljnih objektov	126
5	PREDLAGANI MODEL GEORADARSKIH OPAZOVANJ ZA EVIDENTIRANJE GI	130
5.1	Ocena točnosti položaja in višin, pridobljenih z modelom georadarskih opazovanj pri evidentiranju gospodarske infrastrukture	137
5.1.1	Test normalnosti porazdelitve	138
5.1.2	Položajna ocena točnosti	140
5.1.3	Višinska ocena točnosti.....	142
5.1.4	Ocena točnosti naklona	143
5.2	Grafična predstavitev končnih rezultatov v testnih bazenih.....	145
5.3	Pregled in diskusija rezultatov v testnih bazenih	148
6	PREIZKUS IZDELANEGA MODELA GEORADARSKIH OPAZOVANJ V REALNEM OKOLJU	151
6.1	Testno območje I.....	151
6.1.1	Obdelava radargramov	153
6.1.2	Rezultati in diskusija	156
6.2	Testno območje II.....	159
6.2.1	Izdelava digitalnega ortofota testnega območja II.....	159
6.2.2	Izvedba georadarskih meritev in obstoječa GI	161
6.2.3	Obdelava radargramov	163
6.2.4	Rezultati in diskusija	164
6.3	Testno območje III	172
6.3.1	Obdelava radargramov	173
6.3.2	Rezultati in diskusija	174
6.4	Pregled in diskusija rezultatov testnih območij.....	176

7 SKLEP	180
PRILOGA A: DIMENZIONIRANJE ASFALTNIH VOZIŠČNIH KONSTRUKCIJ	185
A.1 Pogoji uporabe v novih voziščnih konstrukcijah	185
A.1.1 Lastnosti uporabljenega drobljenega kamenega agregata za posteljico	185
A.1.2 Kakovost osnovnih materialov voziščnih konstrukcij	185
A.1.3 Prometna obremenitev	186
A.1.4 Klimatski in hidrološki pogoji	186
A.1.4.1 Globina prodiranja mraza	187
A.1.4.2 Hidrološke razmere	188
A.1.4.3 Občutljivosti materialov na zmrzovanje	188
A.1.5 Spodnja nevezana nosilna plast asfaltnih voziščnih konstrukcij	188
A.2 Asfaltna krovna plast	189
A.2.1 Vrste bitumenskih veziv krovnih plasti testnih bazenov	189
A.2.2 Asfaltna zgornja vezana nosilna plast	189
A.2.3 Prostorske in mehanske lastnosti asfaltne zgornje vezane nosilne plasti	190
A.2.4 Asfaltna obrabna in nosilnoobrabna plast	191
A.2.5 Prostorske in mehanske lastnosti asfaltne obrabne in nosilnoobrabne plasti	192
PRILOGA B: TERMINOLOGIJA	193
B.1 Slovarček	193
B.2 Seznam oznak	207
B.3 Seznam kratic	208
LITERATURA IN VIRI	211

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vrednosti relativne dielektričnosti in električne prevodnosti pri različnih materialih	17
Preglednica 2: Ločljivost ob predpostavljene relativni dielektričnosti voziščne konstrukcije, globini in uporabi anten z različnimi centralnimi frekvencami valovanja	28
Preglednica 3: Velikost celice v ortogonalni mreži ob predpostavljene relativni dielektričnosti voziščne konstrukcije ob uporabi izbranih anten.....	33
Preglednica 4: Sestava plasti posameznih testnih bazenov.....	59
Preglednica 5: Debeline posteljic v posameznih testnih bazenih.....	61
Preglednica 6: Debeline spodnjih nevezanih nosilnih plasti v posameznih testnih bazenih.....	64
Preglednica 7: Debeline asfaltnih nosilnih plasti v posameznih testnih bazenih.....	66
Preglednica 8: Debeline asfaltnih obrabnih in nosilnoobrabnih plasti v posameznih testnih bazenih.....	66
Preglednica 9: Dejanski debelinski indeksi testnega bazena 3 – regionalna cesta.....	67
Preglednica 10: Dejanski debelinski indeksi testnega bazena 2 – lokalna cesta.....	67
Preglednica 11: Dejanski debelinski indeksi testnega bazena 1 – hodnik za pešce	68
Preglednica 12: Min. globina vgrajene GI.....	71
Preglednica 13: Vgrajene plinske cevi v testnih bazenih.....	72
Preglednica 14: Vgrajene vodovodne cevi v testnih bazenih.....	74
Preglednica 15: Vgrajena kanalizacijska cev v testni bazen.....	75
Preglednica 16: Vgrajeni električni vodi v testnih bazenih.....	76
Preglednica 17: Vgrajene kabelske kanalizacije v testnih bazenih.....	78
Preglednica 18: Uvlečeni optični kabli.....	78
Preglednica 19: Vgrajeni koaksialni kabel.....	79
Preglednica 20: Definitivne višine točk v geodetski mreži in njihove ocene natančnosti	87
Preglednica 21: Definitivne horizontalne koordinate točk geodetske mreže in njihove ocene natančnosti..	88
Preglednica 22: Nastavitve merilnega sistema.....	92
Preglednica 23: Masni in volumenski delež vode ter gostota materiala po posameznih bazenskih plasteh na podlagi vzorčenja.....	101
Preglednica 24: RMSE relativne dielektričnosti po metodi določ. hitrosti po slojih v testnih bazenih.....	122
Preglednica 25: Absolutna in relativna odstopanja premerov po metodi ujemanja referenčne hiperbole in prilagajanja polmerov ciljnega objekta.....	125
Preglednica 26: V modelu uporabljeni postopki in parametri, odvisni od centralne frekvence antene.....	133
Preglednica 27: Absolutna in relativna odstopanja premerov v kombinaciji obeh metod (ujemanje referenčne hiperbole (prilagajanje polmera ciljnega objekta) in hitrosti širjenja EMV v cevi).....	170
Preglednica 28: Lastnosti uporabljenega drobljenega kamenega agregata 0–125 mm.....	185
Preglednica 29: Povprečne vrednosti količnika ekvivalentnosti osnovnih gradbenih materialov.....	185
Preglednica 30: Diagrami določitve količnika ekvivalentnosti.....	186
Preglednica 31: Razvrstitev prometnih obremenitev v skupine.....	186
Preglednica 32: Najmanjše potrebne debeline voziščnih konstrukcij h_{min}	187

Preglednica 33: Razvrstitev občutljivosti materialov na zmrzovanje	188
Preglednica 34: Priporočila za uporabo bitumenskih veziv za bitumizirane zmesi asfaltnih plasti.....	189
Preglednica 35: Področja uporabe bituminiziranih zmesi za asfaltne nosilne plasti v odvisnosti od povprečne letne dnevne prometne obremenitve	190
Preglednica 36: Pogojene projektne debeline asfaltnih nosilnih plasti	190
Preglednica 37: Prostorske in mehanske lastnosti uporabljene AC 22 base 50/70 A3 bitumizirane zmesi.	190
Preglednica 38: Področja uporabe bituminiziranih betonov v odvisnosti od povprečne letne dnevne prometne obremenitve	191
Preglednica 39: Pogojene projektne debeline asfaltnih obrabnih in nosilnoobrabnih plasti.....	191
Preglednica 40: Prostorske in mehanske lastnosti uporabljene AC 22 surf 50/70 A3 bitumizirane zmesi.	192

LIST OF TABLES

Table 1: Values of dielectric constant and electric conductivity of different materials.....	17
Table 2: Resolution assuming relative dielectric constant of road structure to the depth of using antennas of different central frequencies.	28
Table 3: Size of cell in orthogonal grid assuming relative dielectric permittivity of road structures and subgrade soil with the usage of chosen antennas.....	33
Table 4: Composition of layers of individual testing pools.....	59
Table 5: Thickness of sub-bases in testing pools.....	61
Table 6: Thicknesses of lower decoupled layers in testing pools.....	64
Table 7: Thicknesses of asphalt base layers in testing pools.....	66
Table 8: Thickness of asphalt wearing course in testing pools.....	66
Table 9: Actual thickness index of testing pool 3 – regional road.....	67
Table 10: Actual thickness index of testing pool 2 – local road.....	67
Table 11: Actual thickness index of testing pool 1 – pavement.....	68
Table 12: Min. depth of installed utilities.....	71
Table 13: Gas pipes installed into testing pools.....	72
Table 14: Water pipes installed into testing pools.....	74
Table 15: Sewage pipes installed into testing pools.....	75
Table 16: Electricity lines installed into testing pools.....	76
Table 17: Cable ducts installed into testing pools.....	78
Table 18: Optical fibre cables.....	78
Table 19: Coaxial cable installed into testing pools.....	79
Table 20: Definitive heights of points in geodetic networks and accuracy estimation.....	87
Table 21: Definitive horizontal coordinates of points in geodetic networks and accuracy estimation.....	88
Table 22: The setup of measurement system.....	92
Table 23: Volumetric and weight water content and the density of material by individual layers of pool based on sampling (TD 32 – base course, TD 125 – sub-base course, ZEM – soil).....	101
Table 24: RMSE of dielectric constant by using layer velocity function method in testing pools.....	122
Table 25: Absolute and relative radius deviations by using the method of reference hyperbola matching by velocity and by adjusting target object radius.....	125
Table 26: The procedures and the parameters used in proposed model of GPR depend by the center frequency of antennas.....	133
Table 27: Absolute and relative radius deviations, both methods combined; the reference hyperbola matching (adjusting target object radius) and velocity propagation of EMW in the pipe.....	170
Table 28: Features of used crushed limestone aggregate 0–125 mm.....	185
Table 29: Average values of equivalence ratio of basic construction materials.....	185
Table 30: Diagrams of defining equivalence ratio.....	186
Table 31: Groups of traffic load classification.....	186

Table 32: Minimum required thicknesses of the pavement structure h_{\min}	187
Table 33: Classification of materials on the basis of frost sensitivity	188
Table 34: Recommendation on usage of bitumen binders for bitumen mixtures of asphalt layers	189
Table 35: The scope of usage of bitumen mixtures for asphalt layers depending on average annual daily traffic load.....	190
Table 36: Conditioned project thicknesses of asphalt base layers	190
Table 37: Spatial and mechanical characteristics from used AC 22 base 50/70 A3 of bitumen mixture.	190
Table 38: The scope of usage of bitumen concretes depending on average annual daily traffic load	191
Table 39: Conditioned project thicknesses of asphalt wearing layers	191
Table 40: Spatial and mechanical characteristics from used AC 22 surf 50/70 A3 of bitumen mixture.	192

KAZALO SLIK

Slika 1: Osnovne faze razvitega in predlaganega georadarskega modela.....	5
Slika 2: Osnovne komponente georadarskega sistema.	9
Slika 3: a) Pravokotni preseki na smer širjenja EMV v obliki eliptičnega stožca (Fresnelove cone); b) Meje podpovršinskega prostorskega širjenja EMV v obliki snopa eliptičnega stožca z vrhom v središču antene.	10
Slika 4: Georadarski odboj v obliki hiperbole nad temenom točkastega objekta na radargramu.	11
Slika 5: Elektromagnetno valovanje, sestavljeno iz električnega in magnetnega polja.	11
Slika 6: a) Transverzalno električno valovanje (TE), kjer rdeča pika predstavlja smer vektorja »v stran«; b) Transverzalno magnetno valovanje (TM), kjer modra pika predstavlja smer vektorja »iz strani«.	14
Slika 7: Možni prehodi EMV od oddajne (O) do sprejemne (S) antene.	15
Slika 8: Približek volumenskega deleža magnetita v kamninah	18
Slika 9: Vpliv različnih faktorjev na izgube EMV.....	19
Slika 10: Odvisnost hitrosti širjenja EMV od relativne dielektričnosti medija.....	21
Slika 11: Največji globinski doseg pri različnih centralnih frekvencah anten.....	21
Slika 12: Frekvenčni spekter GPR.....	23
Slika 13: Potovanje oddanega EMV do sprejemne antene po različnih poteh ter možen vpliv interference.	24
Slika 14: Odvisnosti relativnih dielektričnosti od volum. deleža vode v mediju po različnih avtorjih.....	26
Slika 15: Razdelitev ločljivosti GPR-sistema na vertikalno in horizontalno komponento	26
Slika 16: a) Vertikalna ločljivost po enačbi Eaves in Reedy (1987) uporabljenih anten v odvisnosti od relativne dielektričnosti medija; b) Horizontalna ločljivost uporabljenih anten v odvisnosti od globine h pri relativni dielektričnosti $\epsilon_r = 7$ v mediju.....	28
Slika 17: Zaznani tipi in materiali podzemne GI	29
Slika 18: Standardni odklon položaja in višine vzdolž referenčne 50 m tirnice	31
Slika 19: a) Standardni odklon zaradi »vrtenja« reflektorja Leica (GRZ4); b) Točki zajema reflektorja pri 90° in 60°	32
Slika 20: Velikost celice ortogonalne mreže pri različnih centralnih frekvencah anten ob relativni dielektričnosti $\epsilon_r = 7$	33
Slika 21: Zahtevane natančnosti pri relativni dielektričnosti ($\epsilon_r = 7$) izbranih anten.	34
Slika 22: Opredeljena primernost natančnosti georadarske metode lastnikov in upravljavcev GI.....	35
Slika 23: Popravek nasičenosti signala surove georadarske sledi.....	39
Slika 24: Predlagani položaji določitve ničelnega časa	40
Slika 25: a) Amplituda signala, ki z globino pada; b) Krivulja amplitude signala po ojačitvi	40
Slika 26: Vpliv funkcije AGC na zaznano sled georadarskega profila.....	41
Slika 27: a) Nizkofrekvenčni filter; b) Visokofrekvenčni filter; c) Pasovnoprepustni filter.....	43
Slika 28: Princip migracije linearnega objekta z naklonom.....	44
Slika 29: a) Sintetični primer podatkov močno razgibanega reliefa; b) Neobdelan radargram georadarskega profila ničelnega odmika brez topografske korekcije; c) Izvedena Kirchhoffova migracija ter topografska korekcija; d) Izvedena topografska korekcija ter Kirchhoffova migracija.....	46
Slika 30: Topografska migracija s hitrostjo 0,1 m/ns nad sint. radargramom.....	47

Slika 31: a) Globinski (x-z) profil; b) Časovni (x-t) profil	47
Slika 32: Prikaz topografske korekcije	48
Slika 33: a) Standardna Kirchhoffova migracija brez upoštevanja topografske korekcije; b) Standardna Kirchhoffova migracija z upoštevano topografsko korekcijo	49
Slika 34: Sintetični radargram uporabe topografske migracije v homogenem mediju s hitrostjo 0,1 m/ns pri uporabi 500 MHz antene	49
Slika 35: a) Nagib georadarja ob meritvi in odklon od središčne točke; b) Namestitev reflektorja nad središčno točko georadarja	50
Slika 36: a) Refleksija vrha in dna cevi, kjer je h – globina, T – točka oddaje valovanja in R – točka sprejema; b) Korelacija časa potovanja EMV in premera cevi pri različnih polnilih	53
Slika 37: Odvisnost premera cilindričnega objekta od geometrije refleksijske hiperbole	53
Slika 38: Vpliv polmera ciljnega objekta na kot med asimptotama hiperbole	55
Slika 39: Načini grafičnega prikazovanja rezultatov georadarskih opazovanj	56
Slika 40: a) Opuščeni betonski silosi z nadstreškom, uporabljeni za testne bazene	57
Slika 41: Plasti vozišča: A) krovna plast; B) voziščna konstrukcija; C) utrditev.	58
Slika 42: Debeline plasti testnih bazenov: a) Hodnik za pešce; b) Lokalna cesta; c) Regionalna cesta.	59
Slika 43: a–c) Vgradnja posteljice pod voziščno konstrukcijo v testnih bazenih 2 in 3.	61
Slika 44: Diagram za določitev debeline plasti nevezane zmesi kamnitih zrn	63
Slika 45: a–c) Vgradnja spodnje nevezane nosilne plasti v testnih bazenih (ap. drobljenec 0–32 mm).	64
Slika 46: Diagram za določitev debeline asfaltne krovne plasti	65
Slika 47: a–c) Polaganje asfaltne krovne plasti v bazenih (AC 22 base in AC 8 surf).	66
Slika 48: Primerjava debelin plasti vozišč LC 490124, LC 406010, LC 038011 ter testnega bazena 2.	69
Slika 49: Primerjava debeline plasti vozišč R2, R1, G2 ter testnega bazena 3.	70
Slika 50: Primerjava debelin plasti hodnikov za pešce LC, R1, G2 ter testnega bazena 1.	70
Slika 51: a) Vgrajena cev DVGW DG11 BN 3868 G v bazen 2; b) Vgrajena cev DVGW DG8106BN0453 G v bazen 3; c) Vgrajena plinska cev STS-07/009 v bazen 2.	73
Slika 52: a) Izkop jaška za vgradnjo; b) Priprava posteljice; c) Vgrajena vodovodna cev Totraplastika PE 80 DN/OD 110 × 10,2 in TUBI PVC PVC-U-110 DN/OD 110 × 4,2 v bazen 3.	74
Slika 53: a) Izkop jaška za vgradnjo, b) Priprava posteljice, c) Vgrajena kanalizacijska cev Ostendorf Kunststoffe PE 200 DN/OD 125 × 3,2 v bazen 2.	76
Slika 54: a) Električni vod SKW 4 × 70 (NN); b) Električni vod ELKA 1 × 70 (SN); c) Vgrajena voda SKW 4 × 70 (NN) in ELKA 1 × 70 (SN) v bazen 3.	77
Slika 55: a) Kabelskokanalizacijska cev velikega premera Minerva PE DN/OD 125 / Rumplast PE DN/OD 40 / ACE – TKE RP 24 in ACE – TKE RP 24 RP 48 optična kablja; b) Vgrajeni cevi Minerva PE DN/OD 125 in Minerva PE DN/OD 110; c) Vgrajena cev priključka Minerva PE DN/OD 40.	79
Slika 56: a) Predelan georadarski sistem SIR 3000 z vlečno palico in merilnim kolesom; b) Kontrolna enota in BT-232B-E vmesnik: (1) z zunanjo dipolno anteno; c) Reflektorski nastavek nad 400 MHz anteno in 360° reflektor Leica GRZ4.	81
Slika 57: a) BPL-šest-kopter; b) Komandna plošča.	83
Slika 58: Geodetska mreža – razvita na območju testnih bazenov.	84

Slika 59: a) Stabilizacija referenčnih točk (1001) v geodetski mreži; b) Signalizacija stojišča z mini reflektorjem LEICA Mini GMP101; c) Centriranje in horizontiranje stativa oziroma podnožja.	85
Slika 60: Natančnost določitve višin točk v mreži.	87
Slika 61: Standardne elipse pogreškov določitve položajnih koordinat točk.	88
Slika 62: 3D-prikaz izmerjenih vodov in cevi, z zaporednimi številkami, v testnih bazenih.	91
Slika 63: a in b) Vzpostavitev ortogonalne mreže rastra 20 cm × 20 cm.	92
Slika 64: Povezava radargrama in terestričnih kinematičnih meritev z naknadno obdelavo ob uporabi lastnih programskih rešitev DST_converter, Parse in Run.	94
Slika 65: Vzpostavljen sistem terestričnega spremljanja kinematičnega procesa v kombinaciji s TPS in georadarjem, opremljenim s 360° reflektorjem.	94
Slika 66: a) Skica oštevilčevanja vzdolžnih in prečnih georadarskih profilov; b) Prikaz vseh 13.763 točk, določenih s terestrično kinematično metodo ob uporabi 400 MHz antene.	95
Slika 67: Prikaz vpliva skupne latence $L_{(skupna)}$ s pomočjo refleksije identičnega ciljnega objekta.	96
Slika 68: Prikaz ocene latence znotraj 12 parov profilov po dveh metodah pri uporabi 400 MHz antene. ..	97
Slika 69: Prikaz vpliva latenčnega popravka na izseku para radargramov.	97
Slika 70: Prikaz ocene latence 12 parov profilov po subjektivni metodi pri uporabi 400 MHz antene.	98
Slika 71: Kopeckijev cilinder za odvzemanje neporušnih vzorcev.	99
Slika 72: a) Razrez bazenskih asfaltnih površin; b) Izkop posameznih plasti za vzorčenje; c) Porušni vzorci plasti voziščne konstrukcije.	100
Slika 73: Položaj in globina vzorčenja bazenov vzdolž 5. profila.	101
Slika 74: a) Odvisnost relativne dielektričnosti mehkega in trdega apnenčevega agregata od masnega deleža vode; b) Odvisnost relativne dielektričnosti apnenčevega agregata velikosti 0–63 mm od volumenskega deleža vode.	102
Slika 75: a) Prikaz debeline asfaltne zmesi AC 8 surf in AC 22 base v tretjem testnem bazenu; b) Prikaz razlik v zrnavosti in posamezne debeline AC 8 surf (4 cm) in AC 22 base (8 cm).	102
Slika 76: a) Odjemni modul (v ozadju) in celica Al-Al z ohišjem (v ospredju); b) Vzorci plasti voziščnih konstrukcij v laboratoriju; c) Merilni instrument Bio-logic SP-200.	103
Slika 77: Relativna dielektričnost apnenčevih agregatov TD 32 in TD 125 suhih vzorcev ter asfaltnih zmesi AC 8 surf in AC 22 base, uporabljenih v testnih bazenih.	104
Slika 78: Relativna dielektričnost posameznih plasti testnih bazenov.	105
Slika 79: Izračunane hitrosti širjenja [10^{-9} s] EMV v testnih bazenih.	105
Slika 80: Časovni intervali prvih negativnih vrhov posameznih sledi radargrama v testnem bazenu 3.	108
Slika 81: AGC-funkcija ojačitve signala 8. profila 400 MHz antene.	109
Slika 82: AGC-funkcija ojačitve signala 8. profila 400 MHz antene pri pravilno izbranem časovnem intervalu in normirnem faktorju 0,72.	110
Slika 83: Funkcija »izgube energije« ojačitve signala 8. profila 400 MHz antene ob faktorju 12.	110
Slika 84: Vrednost amplitude prve refleksijske sledi 8. profila pri 400 MHz anteni: a) Pred določanjem absolutne vrednosti; b) Po določanju absolutne vrednosti; c) Povprečna vrednost amplitude vseh refleksijskih sledi po združitvi.	111
Slika 85: a) Upadanje jakosti signala 400 MHz antene z dvojn timerom in vrednost amplitude prve refleksijske sledi 8. profila; b) Faktor ojačitve jakosti signala in ojačena prva refleksijska sled 8. profila.	111

Slika 86: Ciljno usmerjena ročna ojačitev signala 8. profila 400 MHz antene.....	112
Slika 87: Statično obdelan in ojačen 8. profil 400 MHz antene, kjer rdeče puščice označujejo horizontalne reflektorje: a) Pred uporabo filtra odstranitve povprečja signala; b) Po uporabi filtra odstranitve povprečja signala (100 sledi); c) Po uporabi filtra odstranitve povprečja signala (25 sledi).....	113
Slika 88: Radargram 400 MHz antene, kjer se v plitvih označenih strukturah kaže smiselnost uporabe filtra odstranitve ozadja.....	113
Slika 89: Frekvenčni spekter vseh sledi radargrama, zajetega z anteno s centralno frekvenco 400 MHz...114	
Slika 90: Radargram 400 MHz antene in prikaz vpliva na amplitudo 125 sledi (rdeča črta): a) Radargram pred pasovnoprepustnim filtriranjem; b) Radargram po uporabi filtra Butterworth; c) Radargram po uporabi frekvenčnega pasovnoprepustnega filtra.	115
Slika 91: Prvi profil 400 MHz antene: a) Linearne refleksije različnih naklonov kot posledica stenskih refleksij EMV v bazenu; b) Določeni nakloni linearnih refleksij z navidezno daljico hitrosti za pozitivno in negativno smer.....	116
Slika 92: F-k-filtriranje prvega profila 400 MHz antene (spekter moči v f-k-domeni, območje delovanja filtra pahljačaste oblike).	117
Slika 93: F-k-filtriranje prvega profila 400 MHz antene (pred in po f-k-filtriranju).	117
Slika 94: Območje dekonvolucije 5. profila 900 MHz antene.....	118
Slika 95: Ocena hitrosti širjenja EMV na 5. profilu 900 MHz antene pred migracijo.....	119
Slika 96: Ocena hitrosti širjenja EMV na 5. profilu 900 MHz antene.....	120
Slika 97: Pretvorba časa v globino 5. profila 900 MHz antene s hitrostrnim poljem, pridobljenim po metodi določitve hitrosti po plasteh.....	121
Slika 98: Pretvorba časa v globino radargrama 5. profila 900 MHz antene s hitrostrnim poljem, pridobljenim po metodi ujemanja hiperbol.	121
Slika 99: Topografska korekcija četrtega profila 400 MHz antene. Zaradi lažje ponazoritve malega naklona je merilo razdalje in globine 30 : 1.	123
Slika 100: Kirchhoffova 2D-hitrostna migracija v časovni domeni radargrama 5. profila 900 MHz antene s hitrostrnim poljem, pridobljenim po metodi določevanja hitrosti po plasteh	124
Slika 101: Prikaz prečnega profila 5 in pripadajočega obdelanega radargrama 900 MHz antene, kjer so vidne refleksijske hiperbole posameznih ciljnih objektov.....	126
Slika 102: Prikaz prečnega profila 8 in pripadajočega obdelanega radargrama 400 MHz antene, kjer so vidne refleksijske hiperbole posameznih ciljnih objektov.....	127
Slika 103: Ročno izbiranje ciljnih objektov na 5. vzdolžnem profilu 900 MHz antene.....	128
Slika 104: Določevanje točkovne refleksije ciljnega objekta na izseku radargrama 6. bazenskega vzdolžnega profila 400 MHz antene.....	128
Slika 105: Izračunana ovojnica signalov na radargramu georadarskega 5. vzdolžnega profila 900 MHz antene. Vidni so izrazitejši odboji, ki lahko predstavljajo potencialno refleksijo ciljnih objektov.	129
Slika 106: Shematični prikaz predlaganega modela georadarskih opazovanj za evidentiranje GI.....	130
Slika 107: Obdelava radargrama 47. bazenskega prečnega profila 400 MHz antene s predlaganim modelom in njegov prikaz vpliva na amplitudo 156. sledi.....	134
Slika 108: Nadaljnja obdelava radargrama 47. bazenskega prečnega profila 400 MHz antene s predlaganim modelom in njegov prikaz vpliva na amplitudo 156. sledi.....	136

Slika 109: Določevanje točkovne refleksije ciljnega objekta zaporedne številke 2 na radargramu 47. bazenskega prečnega profila 400 MHz antene.....	137
Slika 110: Histogrami porazdelitve koordinatnih odstopanj po: a) ΔN in c) ΔE in e) višinskih odstopanj Δh . Kvantilni grafi koordinatnih odstopanj po: b) ΔN in d) ΔE ter f) višinskih odstopanj Δh	139
Slika 111: Prikaz položajnih odstopanj temenskih točk v testnih bazenih.....	142
Slika 112: Prikaz višinskih odstopanj temenskih točk v testnih bazenih.....	143
Slika 113: Prikaz referenčnega naklona in pridobljenega s predlaganim georadarskim modelom.....	144
Slika 114: Z regresijsko analizo vizualizirani vodi in cevi iz pripadajočih izmerjenih 269 temenskih točk, določenih s predlaganim georadarskim modelom, v 3D-prostoru vseh treh testnih bazenov.....	146
Slika 115: Podrobna vizualizacija vodov in cevi iz pripadajočih izmerjenih točk temen v 3D-prostoru tretjega testnega bazena.....	146
Slika 116: Primerjava in odkloni položajev vgrajenih cevi in vodov (georadarski model – rdeča barva) od referenčnih (polarna metoda detajlne izmere – zelena barva).....	147
Slika 117: Položajni $RMSE_{(N,E)}$ in višinski $RMSE_{(H)}$: a) Vodovodna cev, zap. št. 9; b) Cevi kabelske kanalizacije, zap. št. 17 in 13.....	147
Slika 118: a) 19 profilov, uporabljenih za preizkus modela; b) Na karti je označen položaj območja v realnem okolju, območje pocinkovalnice Maksim, d. o. o., v Celju.....	151
Slika 119: Prikaz vseh 15.423 točk, določenih s terestrično kinematično metodo na geodetskem načrtu s prikazano GI.....	152
Slika 120: a) Elektronski tahimeter Leica TCRP 1201+ s samodejnim prepoznavanjem reflektorja in sledenjem v testnem območju I; b) Georadarski sistem SIR 3000, 400 MHz monostatična antena: 1) vlečna palica, 2) merilno kolo, 3) reflektor Leica GRZ4 in 4) izdelan nastavek za reflektor.....	153
Slika 121: a) Obdelava radargrama 8. profila s predlaganim modelom. Surova oblika georadarskih meritev; b) Odstranitev zamika signala na radargramu s časovnim intervalom, ročna določitev ničelnega časa, filter odstranitve ozadja, frekvenčni pasovnoprepustni filter in ročno ojačenje amplitude vzdolž profila.....	154
Slika 122: Ocena hitrosti širjenja EMV na 8. profilu: a) Metodi ujemanja hiperbol in določevanja hitrosti po plasteh voziščne konstrukcije; b) Hitrostno polje z obarvanimi hitrostmi v posameznih plasteh.....	154
Slika 123: Obdelan radargram 8. profila: a) Pretvorba časov v globino in topografska korekcija; b) Kirchhoffova časovna migracija na podlagi 2D-prostorskega polja in prostorsko neomejeno ročno ojačenje signala ter topografska korekcija.....	155
Slika 124: Ročno izbiranje ciljnih objektov na radargramu 8. profila: a) Izbiranje s ujemanjem oblike hiperbol na nemigriranem profilu; b) Prenos in poprava izbiranja na migriranem profilu.....	155
Slika 125: Napačen položaj meteorne kanalizacije, predpostavljen na izmeri kanalizacijskih jaškov.....	156
Slika 126: Prostorski odnosi elementov, prikazani s serijo vzporednih georadarskih profilov preiskovane prostornine.....	157
Slika 127: Referenčna točkovna refleksijska hiperbola in spreminjanje njene geometrije ob spremembi premera ciljnega objekta.....	157
Slika 128: Prikaz položajnih in višinskih odstopanj temenskih točk v izbranem testnem realnem urbanem okolju I.....	158
Slika 129: Prikaz referenčnega naklona in pridobljenega s predlaganim georadarskim modelom v izbranem testnem realnem urbanem okolju I.....	158

Slika 130: a) Karta z označenim položajem križišča Dečkove ceste in Njegoševe ulice (Lava, Celje) v realnem okolju; b–c) Izvedba georadarskih opazovanj; d) Prikaz vseh 16.878 točk, določenih s terestrično kinematično metodo.	159
Slika 131: a) Položaj oslonilnih in kontrolnih točk območja snemanja; b) Položaj fotoaparata in pogostost prekrivanja 30 posnetkov.....	160
Slika 132: Evidentirana GI na obravnavanem testnem območju II.	162
Slika 133: a) Rekonstrukcija distribucijske vodovodne cevi na testnem območju leta 2012; b) Delno obdelan radargram 2. profila 400 MHz antene, kjer so dobro vidne lateralne refleksije plasti voziščne konstrukcije; c) Določitev oziroma izbiranje plasti voziščne konstrukcije.	162
Slika 134: Obdelava radargrama 8. profila 400 MHz antene testnega območja II s predlaganim modelom	163
Slika 135: a) Delno obdelan radargram 2. profila 400 MHz; b) Ocena hitrosti širjenja EMV z metodo določevanja hitrosti po plasteh voziščne konstrukcije; c) Hitrostno polje z obarvanimi hitrostmi v posameznih plasteh.....	164
Slika 136: Ročno izbiranje ciljnih objektov na obdelanem nemigriranem radargramu 14. profila 400 MHz antene. Iz leve proti desni si sledijo elektronske komunikacije, meteorna kanalizacija, vodovod, signalni vod in meteorna kanalizacija	164
Slika 137: Posledice rekonstrukcij voziščne konstrukcije testnega območja II: a) Razpoke nad toplovodom in elektronskimi komunikacijami; b) Razpoke nad vodovodnim in plinovodnim omrežjem; c) Vidno zastajanje in vstop vode v voziščno konstrukcijo po dežju.	165
Slika 138: Vidne anomalije krovne plasti voziščne konstrukcije zaradi rekonstrukcij in posledice prodiranja vode v voziščno konstrukcijo v smislu dušenja EMV na radargramu 25. profila 400 MHz antene.....	165
Slika 139: Vidne anomalije krovnih plasti: a) Uporaba dekonvolucije na obdelanem nemigriranem radargramu 19. profila; b) Uporaba dekonvolucije na obdelanem nemigriranem radargramu 14. profila; c) Uporaba dekonvolucije na obdelanem nemigriranem radargramu 9. profila.	166
Slika 140: Podatki KKN o toplovodu: a) Skica prečnega profila betonske plošče in kinete z vgrajenimi cevmi; b) Tip cevi (JK) in polmer ter dimenzija kinete.....	167
Slika 141: a) Dimenzija kinete in dvojni čas odboja od temena betonskega pokrova toplovodne kinete na podlagi delno obdelanega migriranega radargrama 20. profila; b) Dvojni čas odboja od temena izoliranih toplovodnih cevi ob uporabi dekonvolucije obdelanega in migriranega radargrama 19. profila.....	167
Slika 142: Prikaz ujemanja krpane asfaltne zmesi pri obnovi GI, GPR-meritev in uradno veljavnih podatkov o GI.	168
Slika 143: Prikaz položajnih in višinskih odstopanj temenskih točk v izbranem testnem realnem urbanem okolju II	168
Slika 144: Prikaz referenčnega naklona in pridobljenega s predlaganim georadarskim modelom v izbranem testnem realnem urbanem okolju II	169
Slika 145: a) Določevanje premera vodovodne cevi (Tesal) na radargramu 14. profila 400 MHz antene..	170
Slika 146: Prikaz horizontalnih prerezov testnega območja II.	171
Slika 147: Prikaz prostorskih prerezov v D48/GK koordinatnem sistemu	171
Slika 148: a) Prostorsko območje zajema v lokalnem koordinatnem sistemu z označenima smerema georadarskih opazovanj; b) Prikaz izbrane serije radargramov vzporednih georadarskih profilov.....	172
Slika 149: Delno obdelan radargram 5. profila 400 MHz antene testnega območja III	173
Slika 150: Prikaz prostorskih prerezov preiskovane prostornine tal testnega območja III.	174

Slika 151: a) Prikaz jaška elektronskih komunikacij in krpana asfaltna zmes v smeri odkrite GI na globini 0,61 m; b) Prikaz predvidene povezave na podlagi georadarskih podatkov jaška meteorne kanalizacije in žleba; c) Prikaz dveh jaškov elektronskih komunikacij.....	175
Slika 152: Prikaz časovnih rezov in profilov testnega območja III	175
Slika 153: Vidne refleksije v obliki hiperbol radargramov georadarskih profilov 400 MHz antene testnega območja III.....	176
Slika 154: Delno obdelan radargram 4. profila 400 MHz testnega območja II z označenimi refleksijskimi hiperbolami in pripadajočimi sledmi	178
Slika 155: Delno obdelan radargram 6. profila 400 MHz testnega območja I z označenimi refleksijskimi hiperbolami in pripadajočimi sledmi	179
Slika 156: Karta informativnih globin prodiranja mraza h_m [cm].....	187

LIST OF FIGURES

Figure 1: Schematic flow diagram of basic stages of developed and proposed GPR model.....	5
Figure 2: Schematic diagram of GPR main components.....	9
Figure 3: a) Rectangular intersections of elliptical beam cone are called Fresnel zones (Leckebusch, 2003); b) The subsurface spatial EMW propagation limits shaped as elliptical cone with the peak in the antenna centre.	10
Figure 4: GPR reflection in the form of hyperbole over point source object on radargram: 1) Reflection hyperbola; 2) Point source object; 3) Reflected waves.....	11
Figure 5: Electromagnetic waves are formed by electric and magnetic fields.	11
Figure 6: a) Transverse electric wave (TE), where red dot shows the direction of vector »into page«; b) Transverse magnetic wave (TM), where blue dot shows the direction of vector »out of page«.	14
Figure 7: The paths a signal can travel between a transmitter and receiver: a) Direct air signal; b) Direct ground signal; c) Direct reflected signal; d–f) Transmitted signal critically.....	15
Figure 8: Approximate percent of magnetite by volume in rocks	18
Figure 9: Processes leading to reduction in signal strength.....	19
Figure 10: Velocity dependence on transmission of EMW from dielectric constant of geological materials medium.	21
Figure 11: Maximum depth range at various centre frequencies of antennas.....	21
Figure 12: GPR frequency range.	23
Figure 13: Propagation of emitted EMW to receiver antenna by different paths and possible impact of interference	24
Figure 14: Dependence between dielectric constant and volumetric water content in medium by various authors.	26
Figure 15: Resolution of GPR system divided into vertical and lateral components	26
Figure 16: a) Vertical resolution upon equation given by Eaves and Reedy (1987) of antennas used in the thesis depending on dielectric constant of medium; b) Horizontal resolution of antennas used in the thesis depending on the depth h at the dielectric constant of medium of antennas $\epsilon_r = 7$	28
Figure 17: Types and materials detection of utilities.....	29
Figure 18: Position and height deviations along the 50 m reference calibration track line.	31
Figure 19: a) Standard deviation caused by continual rotation of Leica GRZ4 all-round reflector; b) Capture points of reflector rotation angle at 90° and 60°	32
Figure 20: The size of the orthogonal grid cell at different centre frequencies of antennas by relative dielectric permittivity $\epsilon_r = 7$	33
Figure 21: Required accuracy at dielectric constant ($\epsilon_r = 7$) chosen antennas. a) Required theoretical vertical accuracy; b) Required theoretical horizontal accuracy.	34
Figure 22: Defined suitability of GPR method by owners and operators of infrastruktura.....	35
Figure 23: Dewow filter correction on raw GPR trace.....	39
Figure 24: Proposed determination of time zero correction of GPR users	40
Figure 25: a) Signal amplitude decaying with the depth; b) The gain of a signal curve.....	40
Figure 26: Influence of AGC function on recorded trace of GPR profile.	41

Figure 27: a) Low-pass filter (f_M – cut-off frequency, f_O – removed frequencies); b) High-pass filter (f_M – cut-off frequency, f_O – removed frequencies); c) Band-pass filter (f_{MN} – low cut-off frequency, f_{MV} – high cut-off frequency, f_O – removed frequencies).....	43
Figure 28: Migration principle of sloped linear object	44
Figure 29: a) Synthetic data example with strong surface topography; b) Raw radargram of zero offset without topographic correction; c) Kirchhof migration and topographic correction; d) Topographic correction and Kirchhof migration.....	46
Figure 30: Topographic migration with velocity of 0,1 m/ns under synt. radargram from figure 29b	47
Figure 31: a) Depth (x-z) profile; b) Time (x-t) profile	47
Figure 32: Schematic topographic correction. Double time of EMW $t(x)$ calculated on topographic (z_x) and flat date plane (z_0)	48
Figure 33: a) Standard Kirchhoff migration without topographic correction; b) Standard Kirchhoff migration with topographic correction.....	49
Figure 34: Synthetic radargram of topographic migration in homogeneous medium with a velocity of 0.1 m/ns using 500 MHz antenna	49
Figure 35: a) GPR inclination at measurement and deviation from the midpoint point; b) Target prism fixed to a mast above the midpoint point of GPR antenna.....	50
Figure 36: a) Reflection of the pipe top and bottom, where there are: h – depth, T – starting point of transmitted energy and R – end point of received energy; b) Presentation of travel time versus pipe diameter relation in case of different fillers.	53
Figure 37: Cylindrical object radius and hyperbola geometry dependence.	53
Figure 38: The influence target object radius on the angle between the asymptotes of hyperbola.....	55
Figure 39: Graphic methods of GPR display.	56
Figure 40: Abandoned covered silos used for testing pool	57
Figure 41: Pavement layers: a) Surface course; b) Pavement structure; c) Pavement structure and compacted sub-base.	58
Figure 42: Thickness of testing pools layers: a) Pedestrian pavement; b Local road; c) Regional road.....	59
Figure 43: a–c) Installation of sub-base under pavement in testing pools 2 and 3	61
Figure 44: Diagram for determination of thickness of the base course layer made of stone aggregate.....	63
Figure 45: a–c) Installation of the base course layer in testing pools (limestone gravel 0–32 mm).....	64
Figure 46: Diagram for determination of thickness of the covering asphalt layer.....	65
Figure 47: a–c) Installation of asphalt covering layer in the pools (AC 22 base and AC 8 surf).	66
Figure 48: Thickness of pavement structure layers LC 490124, LC 406010, LC 038011 and testing pool 2.	69
Figure 49: Thickness of pavement structure layers R2, R1, G2 and test pool 3.	70
Figure 50: Thickness of pedestrian pavement structure layers LC, R1, and testing pool 1.	70
Figure 51: a) Pipe DVGW DG11 BN 3868 G installed in the pool 2; b) Pipe DVGW DG8106BN0453 G installed in the pool 3; b) Gas pipe STS-07/009 installed in the pool 2.....	73
Figure 52: a) Excavation of the trench for installation; b) Preparing the sub-base for water pipe; c) Water pipe of Totraplastika PE 80 DN/OD 110 × 10,2 and TUBES PVC PVC-U-110 DN/OD 110 × 4,2 installation in the pool 3.....	74

Figure 53: a) Excavation of the trench for installation; b) Preparing the sub-base for pipes; c) Sewage pipe installation, Ostendorf Kunststoffe PE 200 DN/OD 125 × 3,2 into pool 2.	76
Figure 54: a) SKW power line 4x70 (NN); ELKA power line 1 × 70 (SN); c) Installation of SKW 4 × 70 (NN) and ELKA 1 × 70 (SN) into pool 3.	77
Figure 55: a) Cable ducting of large diameter Minerva PE DN/OD 125 / Rumplast PE DN/OD 40 / ACE – TKE RP 24 and ACE – TKE RP 24 RP 48 of optical fibre cable; b) Installation of Minerva PE DN/OD 125 and Minerva PE DN/OD 110 tubes; c) Installation of Minerva PE DN/OD 40 connection.	79
Figure 56: a) GPR system SIR 3000 redesigned for the needs of thesis with the drag rod and measuring wheel; b) Control unit and bluetooth RS 232 adapter (BT-232B-E): (1) external dipole antenna; c) Reflector adapter with a mast over 400 MHz antenna and Leica GRZ4 all-round reflector.	81
Figure 57: a) Unmanned aerial vehicle – hexacopter; b) Remote control.	83
Figure 58: Geodetic network developed in the area of testing pools.	84
Figure 59: a) Stabilization of reference points (1001) in geodetic network; b) Signalization of reference and orientation points with LEICA Mini GMP101 reflector; c) Centering and levelling a tripod.	85
Figure 60: Accuracy of measured height differences.	87
Figure 61: Standard error ellipses of positioning coordinates of points.	88
Figure 62: 3D image with sequence numbers of measured lines and pipes in testing pools.	91
Figure 63: a and b) Establishment of orthogonal grid of 20 cm × 20 cm raster.	92
Figure 64: The connection between radargram and terrestrial kinematic measurements with subsequent processing using own software solutions DZT_converter Parse in Run.	94
Figure 65: Established terrestrial acquisition system of the kinematic process. TPS combined with a GPR equipped with a 360° reflector.	94
Figure 66: a) The diagram of numbering longitudinal and transverse GPR profiles; b) Presentation of all 13,763 points determined by terrestrial kinematic method using 400 MHz antenna.	95
Figure 67: Presentation of total latency $L_{(total)}$ influence with the help of reflection of identical target object	96
Figure 68: Presentation of latency determining inside 12 pair of profiles with two methods using 400 MHz antenna.	97
Figure 69: Influence of latency correction on the section profile pair. a) $r_t - 6$ and $r_n - 19$ pair; b) Deducted selected GPR profile sections	97
Figure 70: Presentation of latency estimation inside 12 profile pairs by subjective method using 400 MHz antenna.	98
Figure 71: Kopecky's cylinder for taking non-destructive samples.	99
Figure 72: a) Cutting asphalt surfaces in pools; b) Excavation of individual layers for sampling; c) Destructive samples of pavement structure layers.	100
Figure 73: The position and depth of sampling of the pools along the 5th profile.	101
Figure 74: a) The relationship between the dielectric constant of soft and hard limestone in relation to moisture content by volume; b) The relationship between the relative dielectric permittivity and moisture contents of limestone aggr. of 0-63 mm	102
Figure 75: a) Presentation of asphalt mixture thickness in AC 8 surf and AC 22 base in the third testing pool; b) Presentation of differences in grading and individual thickness of AC 8 surf (4 cm) and AC 22 base (8cm).	102

Figure 76: a) Deliverable module (at the back) and Al-Al cell with the casing (at the front); b) Samples of layers of pavement structure in the laboratory; c) Bio-logic SP-200 measuring instrument.	103
Figure 77: Dielectric constant of limestone aggregates TD 32, TD 125 dry samples and asphalt mixtures AC 8 surf and AC 22 base, used in testing pools.....	104
Figure 78: Dielectric constant of individual layers of testing pools.	105
Figure 79: Calculated velocity of $[10^{-9}$ s] EMW propagation in testing pools.....	105
Figure 80: Time intervals of the first negative peaks of individual traces of radargram in testing pool 3..	108
Figure 81: AGC gain of the signal of 8th profile of 400 MHz antenna	109
Figure 82: AGC gain of the 8th profile signal of 400 MHz antenna at correctly selected time intervals and 0.72 scaling factor.....	110
Figure 83: Signal gain using “energy decay” function of 400 MHz antenna 8th profile at the factor 12... 110	
Figure 84: The value of the amplitude of the first reflection trace of 8th profile at 400 MHz antenna. a) Before determining absolute value; b) After determining absolute value; c) Average amplitude of all reflection traces after stack	111
Figure 85: a) Signal decay at 400MHz antenna with two-way travel time and amplitude value of the first trace reflection of 8th profile; b) Signal gain factor and first reflection trace gain of 8th profile.....	111
Figure 86: Target oriented manual gain function of 400 MHz antenna 8th profile.	112
Figure 87: Statically processed and gained 8th profile of 400 MHz antenna, where red arrows mark the horizontal reflectors. a) Before using subtracting average filter; b) After using subtracting average filter (100 traces); c) After using subtracting average filter (25 traces).....	113
Figure 88: Radargram of 400 MHz antenna, where significance of using background removal filter is shown in shallow marked structures	113
Figure 89: Frequency spectrum of all radargram traces (red line indicates mean value), covered with antenna with central frequency of 400 MHz.....	114
Figure 90: Radargram using 400 MHz antenna and the influence on the amplitude of 125 traces (red line). a) Before band-pass filtering; b) After using band-pass Butterworth filter; c) After using frequency band-pass filtering and tapered cosine window	115
Figure 91: The first profile using 400 MHz antenna. a) Linear reflection of different inclinations as the consequence of wall reflection of EMW in the pool; b) Inclinations of linear reflections with virtual positive and negative velocity range segments.	116
Figure 92: F-k filtering of the first profile using 400 MHz antenna (power spectrum in the f-k domain and operating range of fan shaped).....	117
Figure 93: F-k filtering of the first profile of 400 MHz antenna (before and after f-k filtering)	117
Figure 94: Deconvolution range of profile 5 using 900 MHz antenna	118
Figure 95: Estimation of velocity of EMW propagation on profile 5 before migration using 900 MHz antenna.....	119
Figure 96: Estimation EMW propagation velocity on 5th profile using 900 MHz antenna	120
Figure 97: Time to depth conversion of profile 5 using 900 MHz antenna with the velocity field calculated on the basis of layer velocity method.....	121
Figure 98: Time to depth conversion of profile 5 using 900 MHz antenna with the velocity field calculated on the basis of hyperbola fitting.....	121

Figure 99: Topographic correction of profile 4 using 400 MHz antenna. For easier illustration of small inclination the scale of length and depth is 30 : 1.....	123
Figure 100: Kirchhoff 2D velocity migration in the time domain with velocity field calculated on the basis of layer velocity method of 5th profile using 900 MHz antenna.....	124
Figure 101: Longitudinal profile 5 presentation and related radargram using 900 MHz antenna, where reflections of individual target objects are presented.	126
Figure 102: Longitudinal profile 8 presentation and related radargram using 400 MHz antenna, where reflections of individual target objects are presented.	127
Figure 103: Manual selection of target objects on longitudinal profile 5 using 900 MHz antenna.....	128
Figure 104: Determination of point reflection of target object on pool longitudinal profile section 6 using 400 MHz antenna.....	128
Figure 105: Calculated envelope of signals on the longitudinal profile 6 using 900 MHz antenna. More intense reflections can be observed on the basis of which the potential reflection of target object can be recognized.....	129
Figure 106: Schematic presentation of proposed model of GPR observation for recording underground utility facilities.....	130
Figure 107: Processing the pool longitudinal profile 47 of 400MHz antenna with the proposed model and its influence on amplitude 156 trace.....	135
Figure 108: Further processing of 47 pool longitudinal profile of 400MHz antenna with proposed model and its influence on the amplitude 156 trace.....	136
Figure 109: Determination of point reflection of target object no. 2 on the 47 pool longitudinal profile using 400 MHz antenna.....	137
Figure 110: Histograms of distribution of coord. deviations under a) ΔN and c) ΔE and e) Δh height deviations. Quantile graph of coord. deviations under b) ΔN and d) ΔE and f) height deviation at Δh	139
Figure 111: Presentation of position differences of apex points in testing pools.....	142
Figure 112: Presentation of height differences at apex points in testing pools.....	143
Figure 113: Presentation of inclinations of reference and proposed GPR model.....	144
Figure 114: Cables and pipes visualized with the regression analysis from related measured apex points, determined with proposed georadar model in 3D testing pools space.....	146
Figure 115: Detailed visualization of cables and pipes from related measured apex points in 3D space of testing pool 3.....	146
Figure 116: Installed cables and pipes position comparison and deviation (georadar model –red colour) from the reference items (polar measurement method –green colour).	147
Figure 117: Position ($RMSE_{(N,E)}$) and height ($RMSE_{(H)}$) root-mean-square error: a) Water pipe no. 9; b) Cable duct pipes no. 17 and 13.....	147
Figure 118: a) 19 profiles used for testing of model; b) On the map area position in real environment is marked, i.e. the area of the Maksim d.o.o. Galvanizing Plant Celje.....	151
Figure 119: Presentation of total 15,423 points, determined by terrestrial kinematic method on the geodetic plan showing underground utilities.	152
Figure 120: a) Leica TCRP 1201+ electronic tracking total station with automatic recognition of reflector of testing field I; b) SIR 3000 GPR system, 400 MHz mono-static antenna: 1) tow bar, 2) measuring wheel, 3) Leica GRZ4 reflector and 4) adapter made for reflector.	153

Figure 121: a) Processing of profile 8 with proposed model; rough GPR observations; b) Subtracting a constant shift on radargram with time interval of the calculation of average; manual determination of zero time; spatial filter of background removal, frequency band-pass filter and manual gain of amplitude alongside the profile.....	154
Figure 122: Estimation of velocity of EMW propagation on profile 8: a) The method of hyperbola adjustment and the method of velocity determination by individual layers of pavement structure; b) Velocity field with coloured velocity layers.....	154
Figure 123: Processed radargram of profile: a) Time-depth conversion and the topographic correction; b) Kirrchoff migration on the basis of two dimensional spatial fields and spatially unlimited manual gain of the signal and topographic correction.	155
Figure 124: Manual selection of target objects on radargram of profile 8.....	155
Figure 125: Presentation of wrong positioning of rainwater drainage as assumed basis of measurement of drainage ducts.	156
Figure 126: Spatial relations among elements as presented with a series of parallel GPR profiles of studied volume.	157
Figure 127: Reference point reflection hyperbola and changing of its geometry by changing diameter of target object.....	157
Figure 128: Presentation of the position and height differences of apex points in chosen real urban environment I.....	158
Figure 129: Presentation of reference inclinations and proposed GPR model in chosen real urban environment I.....	158
Figure 130: a) On the map, the position of the crossroad area between Dečkova and Njogoševa Streets (Lava-Celje) in the real environment is marked; b–c) Execution of GPR observations; d) Presentation of total 16,878 points determined by using terrestrial kinematic method	159
Figure 131: a) Position of the ground control and control points of the recording area; b) Overlapping 30 images frequency and camera position.	160
Figure 132: Recorded underground utilities in testing field II.....	162
Figure 133: a) Reconstruction of the distribution water pipe of testing field in 2012; b) Partially processed radargram of 400 MHz antenna second profile with clearly visible layers of pavement structure; c) Determination of pavement structure layers by picking object method.....	162
Figure 134: Processing profile 8 of 400 MHz antenna with proposed GPR model of testing area II.....	163
Figure 135: a) Partially processed radargram of profile 2 of 400 MHz antenna; b) Estimation of EMW propagation velocity by layer pick velocity method of pavement structure. c) Velocity field with coloured values by individual layers.....	164
Figure 136: Manual selection of target objects on processed non-migrated profile 14 of 400 MHz antenna. From left to right as follows: electronic communications, rainwater drainage, water supply, signal link and rainwater drainage.....	164
Figure 137: Crevices on joints of various asphalt mixtures at the time of reconstruction of pavement structure of testing field II: a) For the needs of heating system and electronic communications; b) For the needs of water supply system and gas pipeline; c) Visible retention/accumulation and water entry after rainfall.....	165
Figure 138: Visible anomalies of covering layer of pavement structure caused by reconstruction and the consequences of water penetration into pavement structure for the attenuation of EMW on profile 25 of 400 MHz antenna.....	165

Figure 139: Visible abnormalities of covering layers; a) Using deconvolution on processed non-migrated radargram of profile 19; b) Using deconvolution on processed non-migrated radargram of profile 14; c) Using deconvolution on processed non-migrated radargram of profile 9.	166
Figure 140: KKN data on heating system: a) The sketch of cross-sectional area of concrete slab and culvert with pipes installed; b) The pipe type (JK) and radius and dimension of culvert.....	167
Figure 141: a) The dimension of culvert and double time of reflection from the apex of concrete cover of the heating system culvert on the basis of partially processed migrated radargram of profile 20; b) Double time of reflection from the apex of insulated heating pipes using decompression of processed and migrated radargrams of profile 19.	167
Figure 142: Presentation of matching of mended asphalt in utilities infrastrucutre renovation, GPR measurements and official data on the utilities infrastructure.	168
Figure 143: Position and height differences of apex points in selected urban environment II.....	168
Figure 144: Inclinations of reference and proposed GPR model in selected urban environment II.....	169
Figure 145: Defining diameter of water supply pipe on radargram of profile 14 of 400 MHz antenna using both methods.....	170
Figure 146: Presentation of selected depth slices of testing area II.	171
Figure 147: Presentation of spatial sections in D48/GK coordinate system.....	171
Figure 148: a) Spatial area of capture in local coordinate system with marked directions of GPR monitoring (blue arrows); b) Presentation of a series of GPR profiles	172
Figure 149: Partially processed radargram of 5th profile using 400 MHz antenna of testing area III.....	173
Figure 150: Presentation of sections of monitored volume of the ground of testing area III	174
Figure 151: a) Presentation of electronic communications duct and mended asphalt in the utilites infrastructure at the depth of 0.61 m; b) Envisaged connection based on GPR data of duct for rainwarter drainage and gutter; c) Two electronic communications ducts.....	175
Figure 152: Presentation of depth slices and profiles of testing area III.....	175
Figure 153: Visible reflections in the shape of hyperboles of radargrams of 400 MHz antenna of testing area III	176
Figure 154: Partially processed radargram of the 4th profile of 400 MHz antenna of testing area II with marked reflection hyperbolas and corresponding traces.....	178
Figure 155: Partially processed radargram of the 6th profile 400 MHz antenna of testing area II with marked reflection hyperbolas and corresponding traces.....	179
Figure 156: Informative depths of cold penetration h_m [cm]	187

1 UVOD

1.1 Motivacija

V splošnem so lahko metode evidentiranja in odkrivanja podzemne gospodarske infrastrukture (GI) delno destruktivne ali popolnoma nedestruktivne, kar je odvisno od namena evidentiranja, predvsem pa od stopnje tveganja poškodovanja ciljnega objekta. V podzemno GI sodijo vsa omrežja gradbenoinženirskih objektov in naprav, ki služijo določeni vrsti gospodarske javne službe državnega, lokalnega ali zasebnega pomena. V GI spada vsa komunalna, energetska in elektronska komunikacijska infrastruktura.

Posnetki, pridobljeni z metodami daljinskega zaznavanja, ki prikazujejo izstopajoče podrobnosti, vidne oblike površja in površinske spremembe ter nadzemne vode GI, so običajen vir informacij, ki geodetom omogočajo evidentiranje. Žal pa je večina GI pod površjem, kjer je njeno evidentiranje oteženo. Nedestruktivne metode geofizikalnih raziskav so se izkazale kot zelo uporabne, saj omogočajo raziskovanje in evidentiranje podpovršinskih ciljnih objektov brez fizičnih posegov in nepotrebnega ogrožanja podzemnih vodov. Zahvaljujoč geofizikalnim raziskavam lahko GI hitreje in ceneje zamejimo v njenih realnih okvirih. Določanje položaja v prostoru je pomembno tudi v smislu varovanja GI pred poškodbami in škodo, povzročeno z gradbenimi posegi. Referenčni nivo je v primeru podpovršinskih raziskav zemljina, ki predstavlja medij, iz česar sledi, da vsi viri fizikalnih anomalij v mediju sodijo v domeno šuma oziroma motenj.

V zadnjih letih se na raziskovalnem področju plitve podpovršinske geofizike uveljavlja naziv plitva geofizika visoke ločljivosti (angl. high resolution shallow geophysics). Geofizikalne metode, ki so primerne za odkrivanje GI, so magnetna metoda, metoda geoelektrične upornosti, konduktivnostna metoda in georadarska metoda. Magnetno metodo (pasivna metoda) izvajamo tako, da z magnetometri merimo spremembe zemeljskega magnetnega polja v zemljini, ki so posledica človeške dejavnosti. Ta metoda je z uporabo pretočnih gradietrov, protonskih magnetometrov in najnovejših magnetometrov na optično črpanje (npr. cezijeve magnetometri) primerna za odkrivanje cevi iz železnih, svinčenih in nodularnih litin oziroma elementov podzemnih vodov v izključno ruralnih okoljih, v katerih ni nadzemne infrastrukture. Metodo geoelektrične upornosti (aktivna metoda) uporabljamo izključno za geoelektrično kartiranje GI. S parom elektrod spremljamo spremembe napetosti, ki jo ob poznavanju toka pretvorimo v navidezno upornost določene prostornine tal. Prednostno se uporablja v ruralnih in s številnimi omejitvami tudi v urbanih okoljih, in sicer za odkrivanje večjih podzemnih vodov in izkopov za podzemne vode. Georadarska metoda (aktivna metoda) se uporablja za odkrivanje vseh vrst podzemne GI v ruralnih in urbanih okoljih, kar predstavlja veliko prednost pred magnetno metodo (Li et al., 2015). Prednost georadarske metode pri odkrivanju GI pred drugimi neinvazivnimi geofizikalnimi metodami se kaže v večji prostorski ločljivosti (Li et al., 2015) in sposobnosti prepoznavanja in ločevanja cevi glede na material. Metoda se v gradbeništvu uporablja še za meritve razporeditve armature v železobetonskih konstrukcijah, raziskave cestišč (Benedetto et al., 2005; Diamanti in Redman, 2012, Le Bastard et al., 2007; Saarenketo in Scullion, 2000), raziskovanje in odkrivanje predorov (Zheng et al., 2012), raziskave geološke oziroma hidrogeološke sestave tal ter za merjenje podzemnih korit rek in jezerskih bazenov. Metoda ima slabost, da pod stalno gladino podtalnice z georadarjem ne dobimo uporabnega signala. Podrobnejši opis posameznih metod najdemo v literaturi naslednjih avtorjev: Clark (1996), Conyers in Goodman (1997), Dimc et al. (2008), Gaffney in Gater (2003), Jol (2009), Kvamme (2001), Li et al. (2015), Mušič et al. (2008) in Turkel et al. (2009).

Na svetu obstaja veliko število GI, ki ne vsebujejo ustrezne informacije o položaju, globini in njenih osnovnih lastnostih. Pogosto lahko zasledimo takšno, ki obratuje že več deset let, a o njej ne vemo veliko, kar je nesprejemljivo za čas, v katerem živimo. V številnih zbirkah in prostorskih informacijskih sistemih, v katerih informacija obstaja, so edina referenca digitalizirani in vektorizirani, pogosto nevzdrževani načrti katastra komunalnih naprav. Uporabniki katastrske podatke GI praviloma jemljejo kot dejstvo. O natančnosti in zanesljivosti podatkov se ponavadi sprašujejo le takrat, ko v dejanskih razmerah, predvsem v urbanem okolju, ugotovijo, da so podatki napačni, oziroma da so se z upoštevanjem podatkov znašli v nepričakovanem položaju. Potrebno je sistematično izboljšanje podatkov katastrov GI glede na merilo popolnosti in zanesljivosti. Thomas et al. (2008) navajajo zahtevo lastnikov in upravljavcev po planimetrični oziroma horizontalni (v nadaljevanju: položajni) in višinski natančnosti georadarske metode.

V Sloveniji je položajna (2D) in višinska natančnost evidentiranih podzemnih vodov in cevi GI podana s pravilniki in priporočili, kot sta: Pravilnik o geodetskem načrtu (Uradni list RS, št. 40/2004 in 33/2007 – ZPNačrt) in Priročnik o evidentiranju gospodarske infrastrukture (Šarlah et al., 2010), ter zahtevami lastnikov v javnih razpisih in naročilih. Natančnost koordinat točke (2D) temena objekta, ocenjena z daljšo polosjo standardne elipse zaupanja v koordinati točke, ne sme biti slabša od 12 cm. Natančnost višine točk, ocenjena s standardnim odklonom višine točke, ne sme biti slabša od 10 cm. Ameriško združenje gradbenih inženirjev (ASCE) podaja smernice za evidentiranje GI, kjer navaja štiri kakovostne razrede, med katerimi se šteje prvi kot najboljši. Nedestruktivne metode in zahtevano natančnost uvršča v drugi kakovostni razred.

Skupne dolžine podzemne GI v Združenih državah Amerike (ZDA) je več kot 56 milijonov kilometrov (Su et al., 2013). Več kot polovica obstoječe podzemne GI nima znanega položaja v prostoru (Marvin in Slater, 1997). Kljub vzpostavitvi storitve Pokličite preden koplješ (angl. Call before you dig) leta 2004 (Šarlah, 2008) in preventivnem obveščanju in označevanju GI pred posegom v prostor je v ZDA podzemna GI poškodovana ali zadeta 500.000-krat na leto (Talmaki in Kamat, 2009) ali vsakih 60 sekund (Spurgin et al. 2009). Študija Klicnega centra v Koloradu (UNCC) leta 2014 je pokazala, da je do 71,8 % vseh poškodb prišlo, čeprav so osebe, ki so posegale v prostor, sledile navodilom ali oznakam v prostoru s strani upravljavcev (UNCC, 2015). Literatura navaja dva osnovna razloga kot posledico poškodb. Prvi je natančnost, odsotnost in nepopolnost položajnih podatkov o GI v uradnih evidencah kot posledica razdrobljene lastniške strukture, slabega podatkovnega upravljanja in neevidentiranih premestitev GI (Anspach, 2010; Talmaki et al., 2013; Sterling et al., 2009). Drugi razlog se kaže v nepoznavanju podatka o položajni natančnosti GI (Beck et al., 2009), ki je posledično redko posredovan ter predstavljen osebam, ki posegajo v prostor (Talmaki et al., 2013; Talmaki in Kamat, 2009). 21 % poškodb GI v ZDA v obdobju med leti 2005 in 2011 je posledica napak v položaju (MUUDS, 2013), kar poudarja pomembnost podatka o položajni natančnosti.

Geodetska uprava Republike Slovenije je na osnovi prostorske zakonodaje v preteklih letih začela vzpostavljati zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture (ZKGJI). Prvotni cilj vzpostavitve ZKGJI je bil, da se iz vseh katastrov GI, za katere so zadolženi upravljavci ali lastniki GI, na enem mestu zberejo podatki, ki bodo omogočili pregled nad stanjem v prostoru in bodo predvsem informacija o zasedenosti prostora, ki je pogoj za kakovostno načrtovanje, vodenje in vzdrževanje (Šarlah, 2008). Na podlagi podatka o položajni natančnosti (2D) koordinat, ki se vodi v ZKGJI, smo ocenili, da je več kot 73 % infrastrukture v Sloveniji določene z natančnostjo, ki je slabša od 1 m. Kaže se interes lastnikov in upravljavcev GI po izboljšanju položajne natančnosti in odkrivanju neevidentiranih objektov s pomočjo georadarske metode. Evidentiranje objektov in posledično njihovo poznavanje položaja v prostoru bi preprečevalo veliko poškodb GI, po vsem svetu manifestiranih v

prekinitvah dobave in plinovodnih eksplozijah (Rogers et al., 2012). Prav tako bi preprečevalo neposredno in posredno škodo na GI, ki je posledica poškodb infrastrukture. V Sloveniji znaša skupna enoletna neposredna škoda 2,1 mio. € ali 1,04 €/preb. (Rakar et al., 2010), medtem ko je v tujini zaradi znatno večjega obsega GI precej večja: v Belgiji (28 mio. €, 5,22 €/preb.), na Nizozemskem (40 mio. €, 2,41 €/preb.), v Veliki Britaniji (164 mio. €, 2,71 €/preb.).

Zaradi vsega navedenega bi razvoj in integracijo modela georadarskih opazovanj upravičili in s koristjo izrabili za celovito evidentiranje oziroma izboljšanje položajne natančnosti in preprečevanje nesreč ter škode na GI. Georadarska metoda predstavlja eno najučinkovitejših orodij podpovršinskega raziskovanja, odkrivanja in evidentiranja GI (Gurbuz, 2008). Prednosti se kažejo v hitrosti pridobitve podatkov, stroškovni upravičenosti pri zajemu večjih površin, boljših rezultatih od drugih nedestruktivnih metod in zagotavljanju visokoločljivostnih posnetkov pri interpretaciji (Cabrera et al., 2013; Cheng et al., 2013; Metwaly, 2015; Millington in Cassidy, 2009). Pri numeričnem modeliranju so georadarske raziskave nedvomno ene od najaktualnejših, kar se odraža v množici objav (Heincke, 2005; Caratelli et al., 2008; Sheng et al., 2010; Frezza et al., 2011; Millington et al., 2011).

Na svetu ni poznanih veliko testnih okolij za oceno zmogljivosti in razvoj modelov obdelave georadarskih opazovanj v nadzorovanih razmerah. Zgrajena je bila le peščica testnih okolij, ki so osredotočena le na lokacijo ciljnega objekta in manj na reprezentacijo urbanega okolja v smislu pohodnih in voziščnih površin (Mohsen et al., 2006). V naravnem okolju laboratorija francoskega inštituta znanosti in tehnologije transporta (fra. LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) v Nantu (Grandjean et al., 2000), malezijske tehnološke univerze (mal. UTM – Universiti Teknologi Malaysia) v Johor Bahruju (Jaw in Hashim, 2013) in naravnem testnem okolju Oddelka za geologijo na Univerzi v Leicesteru (Al-Nuaimy, 1999) so vgrajeni različni tipi GI, vendar testna okolja ne ponazarjajo dejanskega urbanega okolja. Proizvajalec georadarske opreme GSSI ima travnato testno okolje z vgrajeno GI, medtem ko na Univerzi v Liverpoolu testno okolje predstavlja urbana okolica študentskega kampusa (Shahbaz-Khan, 2011). Drugi testni okolji v študentskem kampusu Univerze Illionis in Jedrskem rezervatu Handford, Richland v Washingtonu v ZDA, sta arheološko orientirani. Strokovna literatura navaja le eno nam poznano testno urbano okolje na Univerzi v Louisvillu, velikosti 18 m x 6 m, ki predstavlja približek dejanskemu stanju tipičnih asfaltnih zmesi, materialov in slojev voziščnih konstrukcij ter vgrajene GI v mestu Louisville (Mohsen et al., 2006).

1.2 Izhodišča, cilji in hipoteza

Primarni cilj doktorske disertacije je ovrednotenje hipoteze: S preudarnim povezovanjem nizov standardnih postopkov obdelave georadarskih signalov, ob podpori naprednih algoritmov za obdelavo signalov na izbranih segmentih radargrama, je mogoča natančnejša določitev neznank (položaj, globina, naklon, material, oblika in velikost odkritega objekta oziroma premer) pri evidentiranju GI tudi v znatno oteženih okoliščinah urbanega okolja.

Bistveni pogoj za določitev neznank z zahtevano natančnostjo je problemsko odzivna kombinacija algoritmov za prepoznavanje karakterističnih oblik odbojev, razvrščanje glede na obliko odbojev in amplitudo povratnih signalov ter interpretacijo za cilje raziskave relevantnih georadarskih odbojev. V tej doktorski disertaciji smo razvijali model za napredno odkrivanje in evidentiranje GI s pomočjo georadarske metode (GPR).

Nespregledljivi pogoj in hkrati znanstveni cilj za preizkus hipoteze je zasnova in izgradnja testnega okolja z vsemi elementi resničnega urbanega okolja. Zaradi izjemne kompleksnosti urbanega okolja, kot ciljnega okolja za georadarsko raziskavo v tej disertaciji, so postopki obdelave radarskih signalov podprti z empiričnimi izsledki, pridobljenimi pri nadzorovanih razmerah v testnih bazenih. Zasnovana in izvedena so tri takšna okolja, ki predstavljajo natančen približek realnim okoliščinam cestnih konstrukcij in manipulacijskih povoznih in pohodnih površin. Pod površinami, predstavljenimi v testnih bazenih, je danes v realnem okolju zaradi njihove lastniške strukture nepremičnin največ GI. V resničnih okoliščinah praviloma razpolagamo samo z bolj ali manj zanesljivimi ocenami geometrije, velikosti ciljnih objektov in njihove globine in relativne dielektričnosti različnih materialov v preiskovanem mediju. Veliko število nenadzorovanih spremenljivk v resničnem okolju (relativnih dielektričnosti, vlažnosti, položajev, globlin in premerov cevi ter vodov) namreč onemogoča ustvarjanje zaporedja postopkov obdelave georadarskih signalov za učinkovito in zanesljivo prepoznavanje posameznih elementov podzemne GI, kar je bistveni znanstveni cilj te disertacije. V testnih bazenih je pri natančno poznani relativni dielektričnosti, volumenskem deležu vode, položaju, globini in usmerjenosti ciljnih objektov mogoče ugotavljati odzivnost vseh pogosto rabljenih vrst podzemnih vodov v Sloveniji. Tudi pri različnih debelinah in sestavi plasti cestnih konstrukcij in nosilnih tal, pod katerimi ali v katerih so. Izsledki prepoznavanja in pridobivanja metričnih podatkov ciljnih objektov GI, pridobljeni v nadzorovanem okolju testnih bazenov, so v drugi fazi preizkušeni v urbanih okoljih in ustrezno dopolnjeni za učinkovito identifikacijo različnih elementov podzemne infrastrukture v izbranih resničnih okoljih.

Hipotezo smo preverili s pomočjo geodetskih metod izmere v delu zagotavljanja zahtevane položajne in višinske natančnosti evidentiranih podzemnih vodov in cevi GI v skladu z veljavnimi priporočili in pravilniki. Kot popolnoma realna smo ocenili pričakovanja določitve položaja (2D) in globine oziroma višine podzemnih vodov pri optimalnih pogojih (z ustreznimi približki relativne dielektričnosti medija, v katerem so) s položajno (daljša polos 95 % elipse zaupanja) in višinsko natančnostjo do 40 cm. Na območjih, kjer nastaneta dušenje in disperzija georadarskega elektromagnetnega valovanja (EMV) (npr. zaradi velike namočenosti oziroma debelozrnatega kamninskega tampona) v mediju, se lahko odzivnost in s tem prepoznavnost ciljnih objektov bistveno zmanjša. V najslabših primerih toliko, da je vprašljiva ustreznost uporabljene metode.

Zastavljene cilje in vrzeli, ki jih odpirata postavljena hipoteza ter izdelava modela evidentiranja, izvajanja in obdelave georadarskih opazovanj, predstavljenih v tej doktorski disertaciji, smo poskušali izpolniti z interdisciplinarnim pristopom, v katerem se prepletajo plitva geofizika, gradbeništvo v smislu nizkih gradenj in komunalnega gospodarstva, geodezija, fotogrametrija, daljinsko zaznavanje, obdelava posnetkov ter računalništvo in informatika. Raziskovalno delo, katerega izsledki so prikazani v tej disertaciji, je bilo opravljeno med letoma 2010 in 2016, pretežno s pomočjo Fakultete za gradbeništvo in geodezijo in Oddelka za arheologijo Filozofske fakultete Univerze v Ljubljani. Pri konstruiranju testnih bazenov smo sodelovali z Družbo za avtoceste Republike Slovenije, d. d., ter ravnali v skladu z njenimi priporočili, iskanje in izdelava programskih rešitev sta potekala na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, laboratorijske meritve na Kemijskem inštitutu Ljubljana (KI) – Slovenija ter Inštitutu za hmeljarstvo in pivovarstvo Slovenije (IPHS).

1.3 Metoda dela

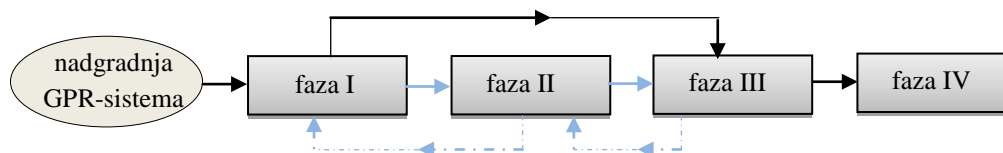
Opisani izsledki te doktorske disertacije temeljijo na rezultatih uporabe teoretičnih predpostavk, zasnovanih na zbrani literaturi in v okolju testnih bazenov. V sklopu raziskave so uporabljene različne

centralne frekvence georadarskih anten, odvisne od njihove vertikalne in horizontalne ločljivosti in globinskega dosega. Glede na razpoložljivost GI in gradbenih izvajalcev so bile izbrane značilne izvedbe voziščnih konstrukcij in pohodna površina, kar predstavlja glavni vir metričnih podatkov pri opredeljevanju georadarskega modela obdelave podatkov. Omejili smo se na iskanje in evidentiranje značilne GI, položene v Sloveniji, saj je bilo s pregledom literature ocenjeno, da bi bilo obravnavanje vseh evidentiranih in uporabljenih vrst GI preobširno za našo raziskavo.

Zasnovani in izvedeni testni bazeni so zgrajeni z upoštevanjem vseh tehničnih specifikacij za načrtovanje voziščnih konstrukcij (TSC 06.511:2009, TSC 06.512:2003 in TSC 06.520:2009). Glede na določeno (predvideno) prometno obremenitev, nosilnost podlage in povprečne vremenske značilnosti na izbrani lokaciji so izračunane debeline plasti in določene sestave ter materiali posameznih plasti konstrukcij vozišč in hodnika za pešce. V testne bazene so položene na podlagi pravilnikov in tehničnih specifikacij za polaganje izbrane najpogosteje uporabljene vrste GI. Na podlagi georadarskih opazovanj je zasnovan in izdelan model obdelave georadarskih opazovanj za evidentiranje GI. Preizkus predlaganega modela je bil opravljen v urbanem okolju mesta Celje, pri različnih razmerah širjenja EMV v mediju.

Za empirične raziskave v testnem bazenu so bile dielektričnosti medija (posameznih plasti voziščne konstrukcije različne sestave in zrnivosti) in prisotnost volumenskega deleža vode izmerjene v laboratorijih Kemijskega inštituta Ljubljana in Inštitutu za hmeljarstvo in pivovarstvo Slovenije, kar med drugim omogoča preverjanje in končni izbor najustreznejših postopkov za določanje neznank pri evidentiranju GI tudi v resničnih pogojih urbanega okolja.

Predlagani model je razdeljen v več faz, združenih v celoto, kot to prikazuje diagram na sliki 1. Model temelji na standardnih in alternativnih postopkih in algoritmih za obdelavo georadarskih podatkov. Predlagani model nadgrajuje klasične georadarske metodologije v smislu vpeljave ter programske in strojne nadgradnje obstoječega georadarskega sistema in prilagojenega pridobivanja metričnih podatkov v realnem času. V fazi I model programsko nadgradimo z avtomatskim povezovanjem geofizikalnih in geodetskih nizov opazovanja. Model programsko nadgradimo tudi v smislu ocene latence uporabljenega geodetskega in geofizikalnega sestava, ki predstavlja fazo II in nadgrajuje prvo fazo. Fazo III sestavlja zaporedje izbranih postopkov obdelave geofizikalnih podatkov oziroma profilov, ki jih smiselno delno uporabimo že v drugi fazi. Osnovo prepoznavne analize v modelu podajamo z izbiranjem linijskih in točkovnih ciljnih objektov. Izvedena je 3D-interpretacija in vizualizacija rezultatov podatkov, kjer v predlaganem programskem okolju prikažemo prostorske odnose med izbranimi ciljnim objekti, in predstavlja fazo IV predlaganega modela.



Slika 1: Osnovne faze razvitega in predlaganega georadarskega modela.

Figure 1: Schematic flow diagram of basic stages of developed and proposed GPR model.

Za določevanje sistematične latence predvidevamo uporabo postopka ujemanja po površini z ustreznimi matematičnimi in statističnimi metodami. Uporabljeni sta metodi korelacije in srednjega kvadratnega pogreška (angl. MSE), ki jih v nadaljevanju primerjamo s subjektivno metodo. Cilj vseh metod je izbrani refleksiji ciljnega objekta v obliki hiperbole na paru radargramov (r_i , r_n) samodejno

poiskati najverjetnejšo homologno refleksijo in poravnati radargrama za izračunan zamika in s tem pridobiti iskan podatek o latenci.

»Standardne« postopke obdelave, ki združujejo različne faze v model, nadgrajujemo z utemeljevanjem najustreznejših algoritmov: algoritmi za migriranje signalov z zvrščanjem hiperboličnih oblik radarskih odbojev v odvisnosti od pričakovane oblike ciljnih objektov (npr. migraciji Kirchhoff in f-k) in algoritmi za določevanje izvornih oblik, ob upoštevanju možnosti drugih algoritmov za zvrščanje hiperbol v posebnih razmerah. Oblika in položaj hiperbol sta odvisna od položaja in globine temenske osi cevi, polmera in srednje hitrosti valovanja v mediju. Za analize hitrosti EMV, v skladu s posebnostmi zastavljenih empiričnih nalog, prednostno uporabljamo interaktivne postopke z adaptacijo hiperbol na radargramih in postopke določevanja hitrostnega polja s pomočjo metode po plasteh. Zaradi monostatične konfiguracije georadarskega sistema, ki je v praksi najbolj običajna, nismo predvideli empiričnih testov z bistatično konfiguracijo anten (CMP – angl. Common Midpoint). Za vizualizacijo smo uporabili Hilbertovo transformacijo.

Posamezne programske rešitve smo zaradi specifičnosti in nedostopnosti na trgu izdelali sami, medtem ko smo za nekatere obdelave izsledkov geodetskih in georadarskih meritev uporabili uveljavljeno programsko opremo, opredeljena in opisana je v pripadajočem poglavju.

1.4 Predstavitev poglavij doktorske disertacije

Doktorska disertacija je strukturirana po splošni obliki znanstvenih del IMRAD (angl. Introduction, Methods, Results and Discussion). V uvodu so predstavljeni motivi za raziskovalno delo in delovno hipotezo, ki je ovrednotena glede na izsledke raziskave. Podali smo pregled metode in postopkov pri odkrivanju in evidentiranju GI in umestili GPR-vsebino v znanstvenoraziskovalni okvir. V velikem delu te doktorske disertacije so predstavljeni pojavi, ki vključujejo emisije, širjenje, interakcijo, zaznavanje ter meritve EMV, ki so predstavljene v poglavju 2. Poudarek je na teoretičnih osnovah georadarske metode, kjer so temeljito opisane osnove teorije elektromagnetnega polja, elektromagnetnih valov in uporabljenih naprednih algoritmov za obdelavo, interpretacijo in vizualiziranje georadarskih opazovanj ter določevanje položaja georadarja med meritvijo.

Gradnji laboratorijskih testnih bazenov je namenjeno poglavje 3, v katerem so podrobno opisane izvedba, struktura in zgradba bazenov in v njih vgrajena GI. V poglavju so opisane trenutno veljavne tehnične specifikacije za načrtovanje regionalnih in lokalnih cest ter hodnikov za pešce, ki so bile upoštevane pri načrtovanju in gradnji testnih bazenov. Podrobno so navedeni vgrajeni vodi in cevi ter upoštevana tehnična navodila in pravilniki pri njihovem polaganju in vgradnji.

Vodila nas je zahteva po osnovnih kriterijih kakovosti obstoječih podatkov o GI, in sicer zaradi relevantnosti poznejše primerjave pridobljenih podatkov s predlaganim modelom obdelave georadarskih podatkov. Poglavje 4 je namenjeno vzpostavitvi geodetske mreže za potrebe določevanja položaja vgrajene GI in v nadaljevanju tudi georadarja. V tem poglavju smo podrobno prikazali določevanje položaja referenčnih točk geodetske mreže, metodo izmere in izravnavo višinske in položajne mreže. Prikazali smo opis metode izmere in opredelili natančnost izmerjenih koordinat temenskih točk vgrajenih cevi in vodov na osnovi terestričnih opazovanj. V poglavju smo tudi vizualizirali in predstavili prostorske odnose izmerjene oziroma vgrajene GI v trirazsežnem (3D) prostoru.

V tej disertaciji je zasnovan in predlagan model georadarskih opazovanj za evidentiranje GI na podlagi »laboratorijskega« bazenskega testnega okolja v treh fazah, kar je izvirni aktualni prispevek na tem področju. Podrobno izvajanje georadarskih opazovanj in predlagani model sta podana v poglavjih 5 in 6. Raziskava je zajemala testiranje in pridobivanje metričnih podatkov georadarja z 270, 400 in 900 MHz anteno v testnih bazenih, laboratorijsko določevanje dielektričnosti in volumskega deleža vode, povezovanje geofizikalnih in geodetskih nizov opazovanj, določevanje latence uporabljenega sestava s pomočjo slikovnega ujemanja radargramov in najpomembnejšo fazo modela, kjer smo s povezovanjem nizov »standardnih« postopkov obdelave georadarskih signalov, ob podpori naprednih algoritmov za obdelavo signalov, pridobili, interpretirali in vizualizirali izsledke georadarskih opazovanj. V razdelkih poglavja 6 so izvedeni testi normalnosti porazdelitve odstopanj, opredeljena je točnost predlaganega modela.

Model, pridobljen v testnih bazenih, je preizkušen v dveh izbranih resničnih urbanih okoljih Mestne občine Celje, opisanih v poglavju 7. Na koncu posameznih razdelkov so opisane in predstavljene posebnosti posameznega testnega območja, eksperimentalne meritve, analizirani so izsledki uporabe novega modela georadarskih opazovanj na objektih GI v urbanem okolju.

V sklepnem poglavju je opredeljena ustreznost uporabe glede na želje upravljavcev ter zahteve in pravilnike za odkrivanje in evidentiranje GI, ovrednotene so delovne hipoteze, predstavljeni pozitivni in negativni vidiki uporabe modela in smernice za nadaljnje raziskovalno delo.

»Ta stran je namenoma prazna«

2 GEORADARSKA METODA

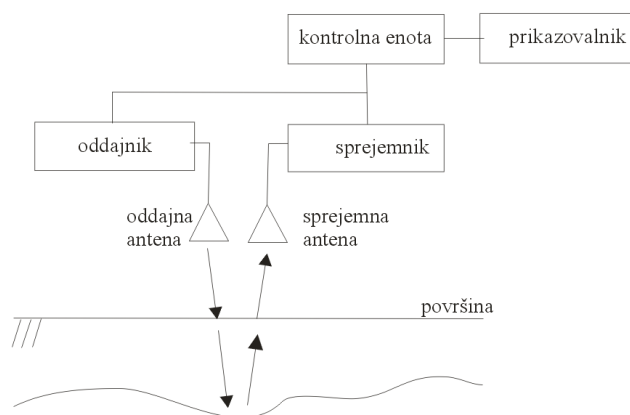
2.1 Teoretične osnove

Georadarska metoda (GPR) je sorazmerno mlada visokoločljivostna geofizikalna metoda. Njeni začetki segajo v 60. leta prejšnjega stoletja, ko so jo uporabili za iskanje vode in določanje debeline polarnega ledu (Annan, 2002; El Said, 1956; Komel in Pavlič, 2009). Leta 1975 so metodo prvič v arheološke namene preizkusili v Chaco Canyonu v Novi Mehiki (Vickers in Dolphin, 1975), pozneje se je njena uporaba v raziskavah pod površja zelo razširila (Conyers in Goodman, 1997; Dolphin et al. 1978; Jol, 2009). V Sloveniji so georadar prvič preizkusili leta 1991 (Brezigar et al., 1995). V zadnjih petnajstih letih je metoda doživela velik razcvet, saj je bila temeljito pojasnjena teoretična, tehnična in tehnološka osnova širjenja georadarskega EMV. Posledično so bili razviti dovolj kakovostni modeli za izvedbo zanesljivih raziskav (Daniels, 2004; Jol, 2009).

GPR zagotavlja najboljše rezultate pri zajemanju ciljnih objektov takrat, ko so ti blizu površine in močno kontrastni (Daniels, 2004). Najpomembnejša dejavnika uspešnosti izvedbe georadarske metode sta: nastavitve parametrov za zajem, s katerimi nadziramo lastnosti georadarskega EMV, in lastnosti medija, skozi katerega se EMV širi. Vsaka sprememba v fizikalnih in kemijskih lastnostih medija (npr. vsebnost vode, prisotnosti kovin, soli in nekaterih glin) vpliva na hitrost, amplitudo in valovno dolžino EMV.

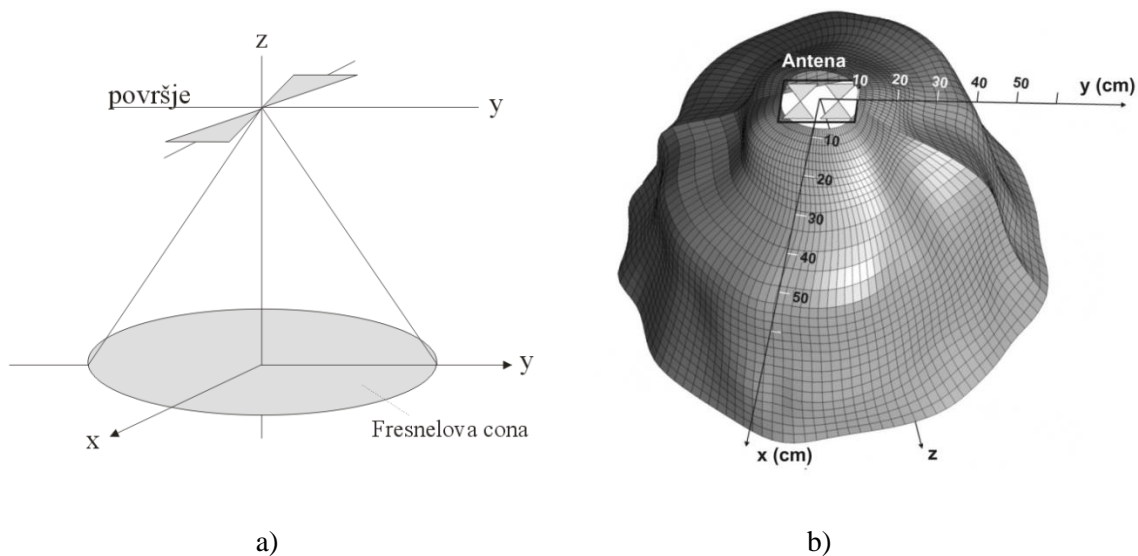
Standardne antene omogočajo oddajanje valovanja s frekvenco od 10 MHz do 2,6 GHz (Xavier in Medeiros, 2006). Valovna dolžina valovanja je v splošnem določena s frekvenco oziroma frekvenčnim območjem oddajne antene.

Georadarski merilni sistem sestavljajo: generator elektromagnetnih impulzov, oddajna in sprejemna antena, sprejemnik in kontrolna (centralno-procesna) enota ter prikazovalnik, kot to prikazuje slika 2 (Gosar in Ravnik, 2007). Pri monostatičnih izvedbah georadarjev sta oddajna in sprejemna antena združeni v skupno anteno za oddajanje in sprejemanje, medtem ko bistatične izvedbe uporabljajo dve na razdalji ločeni anteni za sprejemanje in oddajanje. Pri tem lahko razdaljo med antenama poljubno spreminjamo, kar nam omogoča merjenje hitrosti radarskih valov (Reynolds, 1997).



Slika 2: Osnovne komponente georadarskega sistema.
Figure 2: Schematic diagram of GPR main components.

Georadarski sistem ustvarja in proži v časovnem zaporedju kratke visokofrekvenčne elektromagnetne impulze v medij. Uporabljajo se zelo kratki radarski impulzi, ki trajajo okoli 10^{-8} s, s frekvenco v MHz (Gosar in Ravnik, 2007). EMV potrebuje za svoje razširjanje določen prostor. Mej tega prostora ne moremo preprosto določiti, zato si pomagamo s Fresnelovimi elipsoidi. Fresnelov elipsoid pri georadarskih meritvah, imenovan tudi snop eliptičnega stožca, je podolgovati rotacijski elipsoid, ki ima vrh v središču oddajne antene, kot to prikazuje slika 3 (Leckebusch, 2003). Eliptično območje oziroma daljša os eliptičnega stožca je navadno vzporedna smeri premikanja antene po površju. Pri večji dielektričnosti površinske sestave zemljine (npr. vlažna glina) je hitrost EMV manjša (Weaver, 2006), hkrati pa je snop eliptičnega stožca, ki določa razmerje med globino in ločljivostjo, ožji.



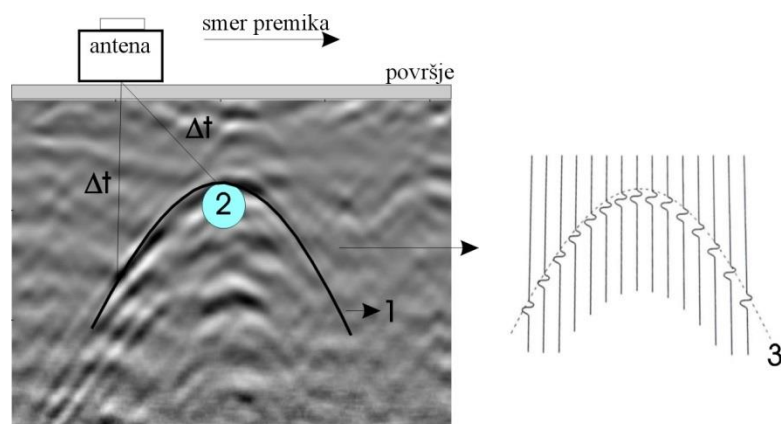
Slika 3: a) Preseke, ki so pravokotni na smer širjenja EMV v obliki eliptičnega stožca, imenujemo Fresnelove cone (Leckebusch, 2003); b) Meje podpovršinskega prostorskega širjenja EMV v obliki snopa eliptičnega stožca z vrhom v središču antene (Perez-Gracia, 2009).

Figure 3: a) Rectangular intersections of elliptical beam cone are called Fresnel zones (Leckebusch, 2003); b) The subsurface spatial EMW propagation limits shaped as elliptical cone with the peak in the antenna centre (Perez-Gracia, 2009).

Georadarske meritve navadno izvajamo vzdolž predhodno izbranih in na terenu določenih profilov. Ko georadarski sistem premikamo vzdolž profila, se radarski signal zapiše kot funkcija dvojnega časa njegovega potovanja, kar imenujemo radargram (Gosar in Ravnik, 2007). Tega lahko opišemo kot zvezno funkcijo $f(x, y)$, kjer sta koordinati x, y prostorski spremenljivki, funkcijska vrednost (amplituda) pa je tonska jakost. Na radargramu je zvezna funkcija diskretizirana po prostorskih spremenljivkah in amplitudi. Rezultat, diskretno funkcijo $f(x, y)$, imenujemo digitalna slika. Proces diskretiziranja prostorskih spremenljivk $\Delta x, \Delta y$ imenujemo vzorčenje, diskretiziranje amplitude g pa kvantiziranje. Diskretni element $\Delta x, \Delta y$ imenujemo slikovni element, Δg pa sivinska vrednost. Digitalno sliko lahko tako opišemo s $f(\Delta x \cdot i, \Delta y \cdot j; i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M)$, kjer sta i, j naslov slikovnega elementa, N število vrstic in M število stolpcev matrike, ki določata okvir slike (Schenk, 1999).

Radargrame georadarskih profilov najlažje razložimo na primeru točkastega ciljnega objekta, ki nastopa kot vir radarskih odbojev, kot to prikazuje slika 4. Odboji od točkastega objekta se kažejo v obliki odbojne oziroma refleksijske hiperbole. Ta nastane zaradi širjenja EMV v obliki eliptičnega

stožca, ker antena zazna točkasti vir, še preden je nad njim, zaznava ga tudi potem, ko ga že prečka, pri tem pa se povečuje čas potovanja EMV (Conyers, 2013).



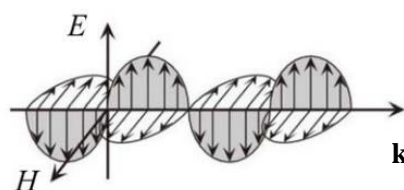
Slika 4: Georadarski odboj v obliki hiperbole nad temenom točkastega objekta na radargramu (Conyers in Goodman, 1997): 1) refleksijska hiperbola, 2) točkasti objekt, 3) odbiti valovi.

Figure 4: GPR reflection in the form of hyperbole over point source object on radargram (Conyers and Goodman, 1997): 1) Reflection hyperbola; 2) Point source object; 3) Reflected waves.

2.2 Osnovna teorija elektromagnetnega polja

V tem poglavju so povzete nekatere osnove elektromagnetne teorije. Obravnavano je širjenje EMV v mediju, torej v tleh, kar zagotavlja teoretično podlago za odkrivanje podzemnih struktur z geofizikalnimi elektromagnetnimi metodami.

EMV je transverzalno valovanje električnega in magnetnega polja. Električno in magnetno polje se širita v smeri pravokotno eno na drugo in vzdržujeta druga drugo, kot prikazuje slika 5. V prostoru se EMV širi pravokotno na smer električnega in magnetnega polja v smeri valovnega vektorja \mathbf{k} .



Slika 5: Elektromagnetno valovanje, sestavljeno iz električnega in magnetnega polja.

Figure 5: Electromagnetic waves are formed by electric and magnetic fields.

Leta 1873 je James Clark Maxwell objavil temeljno delo z naslovom: Razprava o elektriki in magnetizmu (angl. Treatise on Electricity and Magnetism), v katerega je zapisal enačbe, ki opisujejo osnovne lastnosti električnega (\mathbf{E}) in magnetnega polja (\mathbf{H}), imenovane Maxwellove enačbe. Od takrat je elektromagnetno polje v mediju (snovi) v klasičnem smislu opisano s štirimi prostorskimi vektorji.

Za klasičen opis elektromagnetnih pojavov so pomembne sledeče količine:

- vektor jakosti električnega polja $\mathbf{E} = [\text{V/m}]$
- vektor jakosti magnetnega polja $\mathbf{H} = [\text{A/m}]$

- vektor gostote magnetnega polja $\mathbf{B} = [\text{Vs/m}^2]$ ali $[\text{T}]$
- vektor gostote električnega polja $\mathbf{D} = [\text{As/m}^2]$

Ti štirje vektorji so povezani z njihovimi izvori (gostoto porazdelitve volumenskega naboja $\rho = [\text{C/m}^3]$ in gostoto električnega toka $\mathbf{j} = [\text{A/m}^2]$).

Z uvedbo vektorja polarizacije in magnetizacije se celoten sistem Maxwellovih enačb v mediju (snovi) zapiše z diferencialnimi enačbami elektromagnetnega polja:

$$- \text{Gaussov zakon o električnem pretoku: } \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1)$$

$$- \text{Gaussov zakon o magnetnem pretoku: } \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$- \text{Amperov zakon o magnetni napetosti: } \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3)$$

$$- \text{Faradayev indukcijski zakon: } \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4)$$

Tako definiran vektor \mathbf{D} ni odvisen od vezanih nabojev v snovi. Njegovi izvori so izključno zunanji naboji, zato predstavlja zunanje polje. Zunanje polje \mathbf{D} v snovi se razklopi na vsoto notranjega polja \mathbf{E} in polarizacije \mathbf{P} . Polarizacija predstavlja odziv snovi. Vektor \mathbf{H} ni odvisen od vezanih tokov v snovi, temveč je določen zgolj z zunanjimi tokovi in časovnim odvodom gostote zunanjega naboja. Magnetno polje \mathbf{H} je linearna kombinacija gostote magnetnega polja \mathbf{B} in magnetizacije \mathbf{M} . Magnetizacija je odziv snovi na zunanje magnetno polje, ki je odvisna od magnetne susceptibilnosti materiala. Če magnetizacije ne bi bilo, bi bilo zunanje polje enako notranjemu polju. Druga in četrta Maxwellova enačba opisujeta, kako je električno polje povezano z magnetnim poljem. Ti enačbi imenujemo tudi kinematični Maxwellovi enačbi (Podgornik in Vilfan, 2012).

Maxwellove enačbe dopolnimo s tremi enačbami, ki vsebujejo lastnosti medija, skozi katerega potuje EMV:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

V enačbah nastopajo dielektričnost ε [F/m], magnetna permeabilnost μ [H/m] in električna prevodnost σ [S/m].

Iz enačb (5–7) in enačb (3) in (4) izvedemo valovni enačbi elektromagnetnega polja:

$$\Delta \mathbf{E} = \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (8)$$

$$\Delta \mathbf{H} = \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (9)$$

kjer smo predpostavili, da je snov linearna, homogena in izotropna.

Če v enačbah (8) in (9) uporabimo nastavek časovne odvisnosti $\mathbf{E}(t) = \mathbf{E}_0 e^{i\omega t}$, dobimo:

$$\Delta \mathbf{E} = i\omega\mu\sigma\mathbf{E} - \varepsilon\mu\omega^2\mathbf{E} \quad (10)$$

$$\Delta \mathbf{H} = i\omega\mu\sigma\mathbf{H} - \varepsilon\mu\omega^2\mathbf{H} \quad (11)$$

kjer je ω kotna hitrost valovanja.

Členi, ki vključujejo $i\omega\sigma$, so povezani z navadnimi električnimi tokovi, členi, ki vključujejo $\mu\varepsilon\omega^2$, pa s premikalnimi (Sharma, 1997).

Vpeljemo valovno število (angl. wavenumber):

$$k^2 = -i\omega\mu(\sigma + i\omega\varepsilon) = \mu\varepsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma \quad (12)$$

Valovno število k je precej odvisno od frekvence EMV. Pri nizkih frekvencah ($f < 0,1$ MHz) in visoki prevodnosti lahko valovno število zapišemo v obliki $k^2 = -i\omega\mu$, kjer smo zanemarili prvi člen. V tem primeru lahko v enačbah (10) in (11) zanemarimo izraz $\frac{\partial}{\partial t^2}$ glede na izraz $\frac{\partial}{\partial t}$. Preostanejo zgolj členi, ki opisujejo dušenje. Po drugi strani pri visokih frekvencah ($f > 10$ MHz) in nizki konduktivnosti (prevodnosti) prevlada kvadratni člen, in torej $k^2 = \mu\varepsilon\omega^2$. V tem primeru enačbi (10) in (11) poenostavimo v obliko:

$$\Delta \mathbf{E} = -\mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (13)$$

$$\Delta \mathbf{H} = -\mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (14)$$

To sta navadni valovni enačbi, ki opisujeta EMV.

2.3 Širjenje, odboj in lom elektromagnetnih valov

Za širjenje EMV na splošno velja, da se pri prehodu snovi z različnimi električnimi lastnostmi del vpadnega valovanja odbije nazaj, medtem ko se drugi del lomi in del izgubi (glej razdelek 2.5). Slika 6 prikazuje vpad, odboj in lom EMV, kjer sta vpadni kot θ_v in odbojni kot θ_o enaka. Razmerje med lomnim kotom θ_L in vpadnim kotom θ_v podaja Snellov zakon:

$$\frac{\sin \theta_v}{n_2} = \frac{\sin \theta_L}{n_1} \quad (15)$$

Lomni količnik za elektromagnetna valovanja:

$$n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \quad (16)$$

kjer sta ε_r relativna dielektričnost in μ_r relativna magnetna permeabilnost. Večina naravnih materialov je nemagnetna, kar pomeni, da je μ_r zelo blizu 1, tako da je lomni količnik:

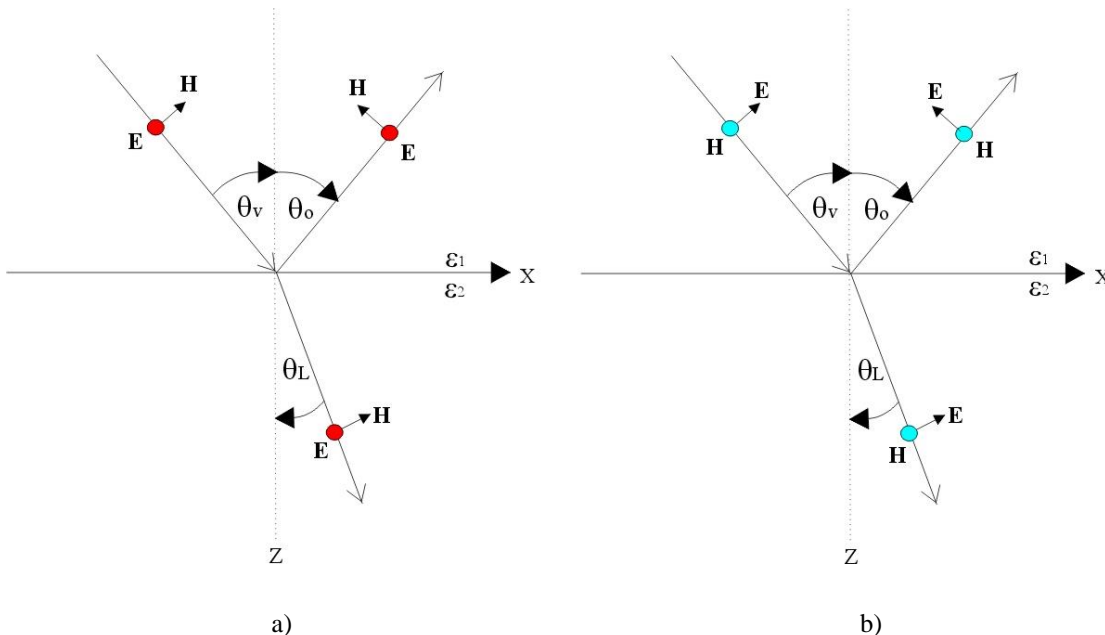
$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \quad (17)$$

Iz enačbe (15) sledi:

$$\frac{\sin \theta_v}{\sin \theta_L} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1}} \quad (18)$$

Fresnelove enačbe opisujejo vedenje EMV na prehodu med dvema snovema v mediju z različnimi električnimi lastnostmi. Enačbe opisujejo amplitudo odbitega in prepuščenega dela EMV. Kadar EMV prehaja iz snovi z dielektričnostjo ϵ_1 v snov z dielektričnostjo ϵ_2 , se del valovanja odbije, del pa se lomi in prehaja v drugo snov. Kolikšen del EMV se odbije oziroma prepusti, podajata koeficient odbojnosti (R) in koeficient prepustnosti (T).

Velikost obeh koeficientov je odvisna od polarizacije vpadnega EMV, ki opisuje smer njegovega nihanja. Polarizirano EMV razdelimo na transverzalno magnetno valovanje (TM) in transverzalno električno valovanje (TE), kot je to razvidno iz slike 6.



Slika 6: a) Transverzalno električno valovanje (TE), kjer rdeča pika predstavlja smer vektorja »v stran«; b) Transverzalno magnetno valovanje (TM), kjer modra pika predstavlja smer vektorja »iz strani« (Annan, 2003).

Figure 6: a) Transverse electric wave (TE), where red dot shows the direction of vector »into page«; b) Transverse magnetic wave (TM), where blue dot shows the direction of vector »out of page« (Annan, 2003).

Koeficienta odbojnosti in prepustnosti transverzalne električne polarizirane komponente (TE), vzporedne z mejno ravnino med plastema z relativno dielektričnostjo ϵ_1 in ϵ_2 , ob predpostavki, da sta prevodnost in magnetna permeabilnost materiala obeh plasti zanemarljivi, izrazimo z enačbama:

$$R_{TE} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} \cos \theta_v - \sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_L}{\sqrt{\epsilon_1} \cos \theta_v + \sqrt{\epsilon_2} \cos \theta_L} \quad (19)$$

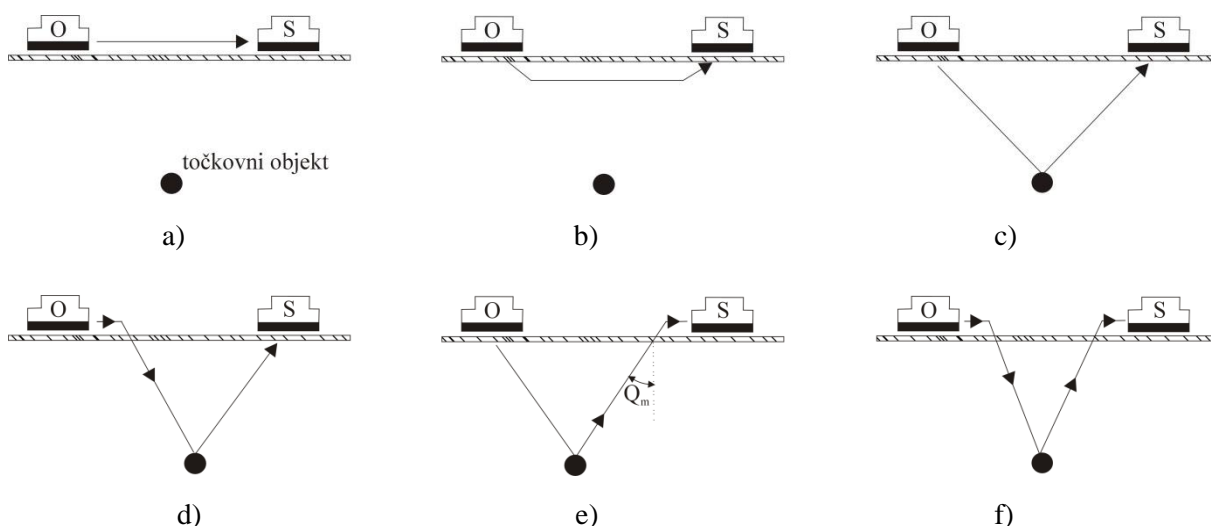
$$T_{TE} = 1 + R_{TE} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta_v}{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta_v + \sqrt{\varepsilon_2} \cos \theta_L} \quad (20)$$

Ob predpostavkah, da sta prevodnost in magnetna permeabilnost zanemarljivi, in da pri pravokotnem vpadu EMV ($\theta_L = \theta_v = 0^\circ$) na mejno ploskev ni razlik med TE- in TM-komponento valovanja, lahko koeficientoma odbojnosti zapišemo (Jo1, 2009):

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (21)$$

Kot kaže enačba (21), je za izmerjeno amplitudo in s tem za zaznavanje anomalij s pomočjo georadarske metode ključna razlika v relativnih dielektričnostih dveh različnih snovi v mediju. Razlika se odraža v spremembi amplitude in faze zaznanega odbitega valovanja (Daniels, 2004).

Odboji od dielektričnih diskontinuitet pa žal niso edini odboji, ki jih je mogoče zaznati na radargramih. Slika 7 prikazuje več možnih prihodov oziroma potovanj EMV od oddajne (O) do sprejemne (S) antene v primeru točkovnega ali cilindričnega objekta v mediju. Relativni pomen in vpliv na končne rezultate vsake poti je odvisen od ciljne globine objekta ter razdalje in višinske razlike med oddajno in sprejemno anteno. V georadarskih sistemih, pri katerih uporabljamo monostatično anteno, kjer je v nasprotju z bistatičnimi izvedbami, razdalja med sprejemno in oddajno anteno nična oziroma izredno majhna, nastopajo: neposredni zračni val, neposredni podpovršinski val in neposredni odboj od objekta. Lateralni valovi, kot posledica odbojev nazaj na površje pod mejnim kotom, imajo znaten vpliv pri bistatičnih izvedbah sistemov, kadar sta anteni blizu skupaj in je oddaljenost od ciljnega objekta velika (glej sliko 7).



Slika 7: Možni prehodi EMV od oddajne (O) do sprejemne (S) antene: a) Neposredni zračni val; b) Neposredni podpovršinski val; c) Neposredni odboj od objekta; d–f) Lateralni valovi kot posledica odbojev nazaj na površje pod mejnim kotom (Annan, 2003).

Figure 7: The paths a signal can travel between a transmitter and receiver: a) Direct air signal; b) Direct ground signal; c) Direct reflected signal; d–f) Transmitted signal critically refracted (Annan, 2003).

Radargramskih odbojev d) in e) na sliki 7 ni mogoče razlikovati (Annan, 2003). Mejni vpadni kot predstavlja tisti kot na prehodu med dvema plastema, pri katerem se EMV več ne lomi. Ob predpostavki $\theta_L = 90^\circ$ pri prehodu iz medija v zrak je vrednost mejnega kota dana z enačbo:

$$\sin \theta_m = \frac{v_1}{v_0} = \frac{\sqrt{\varepsilon_0}}{\sqrt{\varepsilon_1}} \quad (22)$$

kjer sta ε_0 in ε_1 relativna dielektričnost zraka in medija ter v_0 in v_1 hitrost EMV v zraku in mediju.

2.4 Elektromagnetne lastnosti medija

Radargram georadarskega profila sam po sebi predstavlja slike odbojev EMV od meja materialov z različnimi relativnimi dielektričnostmi. Predstavlja časovno odvisen odziv na strukturo medija, skozi katerega potuje EMV. Poznavanje elektromagnetnih lastnosti snovi, ki sestavljajo medij in so v tesni korelaciji s hitrostjo ter dušenjem EMV, je neizogibno. Poznavanje elektromagnetnih lastnosti medija je ključnega pomena za razumevanje rezultatov georadarske metode (Jol, 2009).

Elektromagnetne lastnosti medija so odvisne od sestave materiala in vsebnosti vlage, ki jih določajo dielektričnost, električna prevodnost in magnetna permeabilnost. S potovanjem skozi naravne materiale amplituda EMV pada, s tem pa se spreminja tudi hitrost. Pri večini materialov, na katerih se izvajajo georadarske raziskave, je magnetna reakcija v splošnem šibka, zato magnetne komponente v nasprotju z dielektričnostjo in električno prevodnostjo ni treba obravnavati kot kompleksno količino. Kadar gre za dielektrične materiale, v katerih je izguba večja, je torej absorpcija elektromagnetnega sevanja v glavnem posledica prevodnosti in dielektričnosti materiala (Daniels, 2004).

2.4.1 Dielektrična permitivnost

Dielektrično permitivnost lahko definiramo kot sposobnost medija za skladiščenje in sproščanje električnega naboja. Pove nam, kako močno se bo v snovi prerazporedil naboj pod vplivom zunanega električnega polja. Pogosto jo podajamo kot relativno dielektrično permitivnost ε_r , ki jo predstavlja kvocient permitivnosti materiala medija ε_m in permitivnosti praznega prostora ε_0 ($8,8542 \times 10^{-12}$ F/m) (Jol, 2009).

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_0} \quad (23)$$

Terminološko navajanje oziroma opredeljevanje relativne dielektrične permitivnosti ε_r je precej široko. Conyers (2013) jo navaja kot relativno dielektrično permitivnost, Jol (2009) kot relativno permitivnost, Podgornik in Vilfan (2012) ter Malmberg in Maryott (1956) kot dielektrično konstanto, medtem ko se v slovenščini najpogosteje pojavlja kot dielektričnost oziroma relativna dielektričnost (Kokalj in Vrščaj, 2011).

Vrednost relativne dielektričnosti vode pri temperaturi 20°C znaša 80,1, medtem ko znaša pri 60°C 66,8 (Malmberg in Maryott, 1956). Relativne dielektričnosti suhe sestavine večine podzemnih struktur in umetnih materialov znašajo od 2 do 9. Vrednosti za zemljine in gradbene materiale so večinoma v območju vrednosti od 4 do 40 (Daniels, 2004).

Relativna dielektričnost medija je v tesni korelaciji s sestavo, gostoto, poroznostjo, fizikalno strukturo, temperaturo in hidrološkimi značilnostmi. Električna prevodnost in relativna dielektričnost sta obratno sorazmerni. Večja kot je električna prevodnost medija, nižja je relativna dielektričnost. Najugodnejše razmere za širjenja EMV predstavlja medij z visoko relativno dielektričnostjo in nizko električno prevodnostjo.

2.4.2 Električna prevodnost

Električna prevodnost oziroma konduktivnost je lastnost medija, ki nam pove, kako hitro se v mediju pretaka električni naboj pod vplivom elektromagnetnih sil. Pretakanje naboja zaznamo kot električni tok. V kovinah so nosilci naboja elektroni, v raztopinah pa ioni. Električna prevodnost je recipročna vrednost specifične upornosti ρ [Ωm], podana v obliki (Jol, 2009):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \text{ [S/m]} \quad (24)$$

V mediju z visoko prevodnostjo bo električno polje oddvojeno v visoko prevodna tla, tako bo izgubljeno celotno EMV.

Električne prevodnosti in relativne dielektričnosti posameznih materialov, merjenih pri frekvenci 100 MHz, so prikazane v preglednici 1.

Preglednica 1: Vrednosti relativne dielektričnosti ϵ_r , in električne prevodnosti σ [S/m] pri različnih materialih (Conyers, 2013; Daniels, 2004; Jol, 2009; Lee et al., 2013).

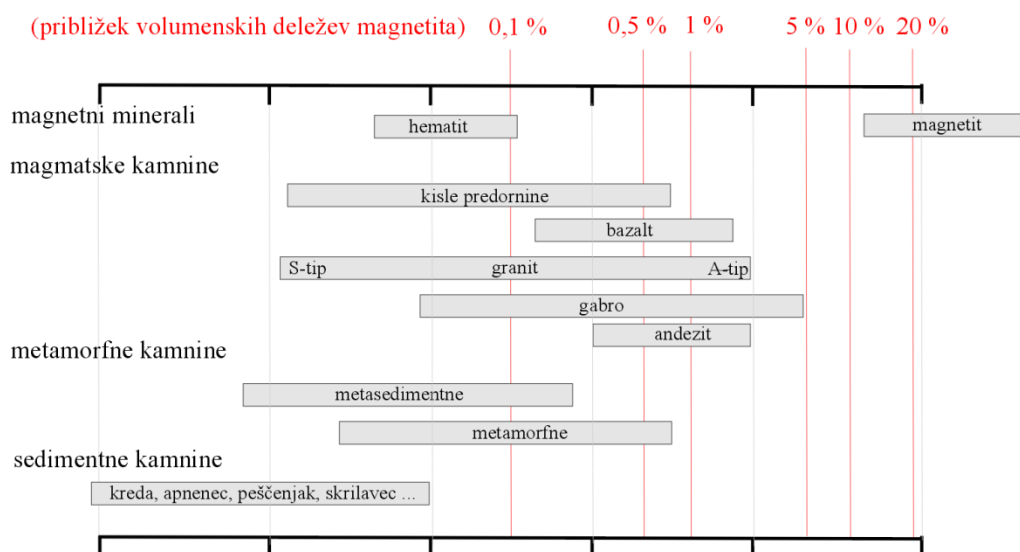
Table 1: Values of dielectric constant ϵ_r , and electric conductivity σ [S/m] of different materials (Conyers, 2013; Daniels, 2004; Jol, 2009; Lee et al., 2013).

Material	Električna prevodnost σ [S/m]	Relativna dielektričnost ϵ_r
prazen prostor	0	1
zrak	≈ 0	1,0006 ≈ 1
voda	10^{-4} – 10^{-2}	78 (25 °C)
led	10^{-3} – 10^{-9}	3–5
asfalt – suh/moker	10^{-2} – 10^{-1} / 10^{-3} – 10^{-2}	2–5/6–12
beton – suh/moker	10^{-3} – 10^{-2} / 10^{-2} – 10^{-1}	4–10/10–20
pesek – suh/moker	10^{-7} – 10^{-3} / 10^{-3} – 10^{-2}	2–6/10–30
apnenec – suh/moker	10^{-8} – 10^{-6} / 10^{-2} – 10^{-1}	4–8/6–15
glinena zemlja – suha/mokra	10^{-2} – 10^{-1} / 10^{-3} – 10^{-0}	4–10/10–30
ilovnata zemlja – suha/mokra	10^{-4} – 10^{-3} / 10^{-2} – 10^{-1}	4–10/10–30
peščena zemlja – suha/mokra	10^{-4} – 10^{-2} / 10^{-2} – 10^{-1}	4–10/10–30
granit – suh/moker	10^{-8} – 10^{-6} / 10^{-3} – 10^{-2}	5/7
polivinilklorid (PVC)	/	3
polietilen (PE)	/	2.3

Voda v porah kamnin in znotraj sedimentov vsebuje ione, električna prevodnost vode pa je skupaj z mobilnostjo ionov glavni dejavnik pri določevanju električne prevodnosti in relativne dielektričnosti celotnega materiala.

2.4.3 Magnetna permeabilnost

Magnetna permeabilnost oziroma prepustnost je sposobnost medija, da se pod vplivom EMV namagnetni. Večina sestavin v mediju, skozi katerega potuje EMV, je nizko magnetno susceptibilna. S tem predstavljajo majhen vpliv na širjenje valovanja (Olhoeft, 1998). Podajamo jo lahko kot relativno magnetno permeabilnost μ_r , ki jo predstavlja kvocient permeabilnosti materiala medija μ_m in permeabilnosti v praznem prostoru μ_0 ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m). Magnetna permeabilnost medija μ_m je pogosto zanemarjena zaradi zanemarljivega volumskega deleža feromagnetnih mineralov v naravnih materialih. Visoka magnetna susceptibilnost v feromagnetnih materialih (magnetiti in hematiti) oslabi EMV. Upoštevati jo moramo v mediju oziroma naravnih materialih z visoko vsebnostjo magnetita. Minerali magnetita so pogosteje prisotni v metamorfnih in magmatskih kamninah, medtem ko so v sedimentnih kamninah redkejši. Znatno vpliv na hitrost in dušenje georadarskih valov v mediju imajo volumenski deleži magnetita, ki so večji od 7 % (Jol, 2009), kar je znatno več, kot ga povprečno v naravi vsebujejo številne kamnine, sedimenti in zemlja. Graf na sliki 8 prikazuje povprečni volumenski delež magnetita v kamninah.



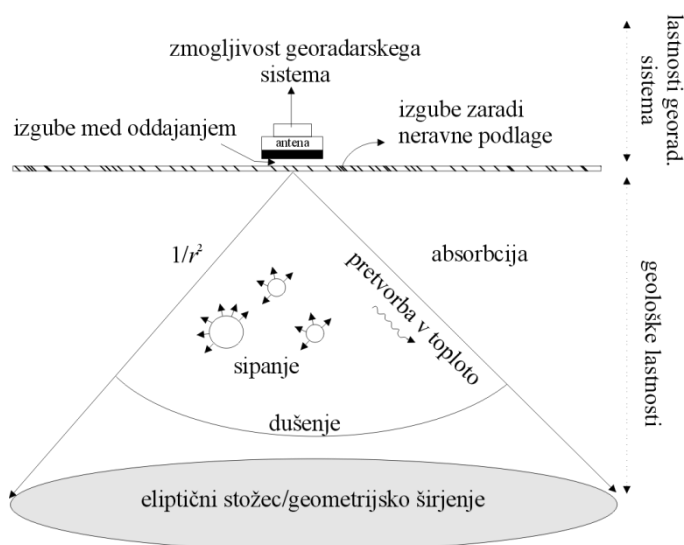
Slika 8: Približek volumskega deleža magnetita v kamninah (Clark in Emerson, 1991).

Figure 8: Approximate percent of magnetite by volume in rocks (Clark in Emerson, 1991).

2.5 Lastnosti georadarskega valovanja

V splošnem na izgube EMV vplivajo lastnosti georadarskega sistema, razgibanost reliefa oziroma neravnost podlage in geološke lastnosti medija, skozi katerega se širi. Slika 9 prikazuje vpliv različnih faktorjev na izgube EMV. Davis in Annan (1989) navajata odvisnost širjenja EMV v mediju od zmogljivosti georadarskega sistema, dušenja in značilnosti odbojev (glej razdelek 2.3). Amplituda odboja radarskega valovanja je odvisna od izbrane centralne frekvence izvora oziroma antene in se zmanjšuje zaradi geometrijskega razširjanja EMV v obliki eliptičnega stožca od antene (glej razdelek

2.1). Amplituda se zmanjšuje obratno sorazmerno s kvadratom oddaljenosti od antene r , del pa se izgubi še zaradi absorpcije, pri kateri se EMV pretvori v toploto (Reynolds, 1997; Mušič, 2009). Reynolds (1997) poleg geometrijskega razširjanja, razdalje r ter izgub antene navaja še izgube sipanja v primerih, ko so objekti enakih dimenzij kot valovna dolžina EMV ter dušenje, odvisno predvsem od elektromagnetnih lastnosti medija. Večja kot je razlika v elektromagnetnih lastnostih med dvema snovema, višja je amplituda odbojev EMV. Lastnosti, ki vplivata in opredeljujeta način širjenja oziroma dušenje EMV v konkretnem mediju, sta električna prevodnost σ (glej razdelek 2.4.2) in magnetna permeabilnost μ (glej razdelek 2.4.3). Elektromagnetne lastnosti medija so odvisne predvsem od vsebnosti vlage, ki vpliva na širjenje oziroma dušenje valov. Snovi z enako relativno dielektričnostjo omogočajo širjenje EMV brez znatnega dušenja. Bolj kot je zemljina električno prevodna, manj je relativno dielektrična (glej razdelek 2.4.2). Ob tem je treba poudariti, da se energija radarskega EMV skozi kovino ne širi, saj ga kovinski objekti v celoti odbijejo (Annan, 2003; Rhebergen et al, 2004; Lopera in Milisavljevic, 2007).



Slika 9: Vpliv različnih faktorjev na izgube EMV (Reynolds, 1997; Mušič, 2009).

Figure 9: Processes leading to reduction in signal strength (Reynolds, 1997; Mušič, 2009).

2.5.1 Dušenje

Dušenje zmanjšuje količino pridobljenih informacij, saj vpliva na globinski doseg, posledično je interpretacija rezultatov otežena. Koefficient dušenja α je odvisen od električnih σ , magnetnih μ in dielektričnih ϵ lastnosti medija ter frekvence valovanja ω , kot kaže enačba (Reynolds, 1997):

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} - 1 \right]} \quad (25)$$

Koefficient dušenja lahko poenostavljeno zapišemo kot (Reynolds, 1997)

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + P^2} - 1 \right]} \quad (26)$$

kjer smo vpeljali faktor izgub (Reynolds, 1997):

$$P^2 = \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \quad (27)$$

Iz enačbe (27) je razvidno, da na dušenje georadarskega valovanja znatno vplivajo predvsem snovi z visoko električno prevodnostjo in visoko relativno dielektričnostjo. Znatno vpliv ima frekvenca valovanja: višja kot je, večje je dušenje.

2.5.2 Hitrost

V naravnih medijih so dielektrične permitivnosti (ϵ) in magnetne permeabilnosti (μ) navadno izražene v razmerju do njihovih vrednosti v praznem prostoru ϵ_0 in μ_0 (glej razdelek 2.4.1 in 2.4.3). Na splošno sta relativna dielektričnost ϵ_r in magnetna permeabilnost μ_r odvisni od frekvence, v manjšem obsegu pa tudi od drugih okoljskih spremenljivk, npr. temperature.

Hitrost valovanja v naravnih medijih je podana z enačbo (Reynolds, 1997):

$$v_m = \frac{c_0}{\sqrt{\frac{\mu_r \epsilon_r}{2} [(1 + P^2) + 1]}} \quad (28)$$

kjer je c_0 hitrost EMV v praznem prostoru, ϵ_r relativna dielektričnost, μ_r relativna magnetna permeabilnost in P faktor izgube. Ob nizki izgubi v nekonduktivnih medijih, kjer je parameter širjenja zmanjšan na $k = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$ (glej razdelek 2.2) in faktor izgube $P \approx 0$, enačbo za hitrost širjenja EMV zapišemo z enačbo (Reynolds, 1997):

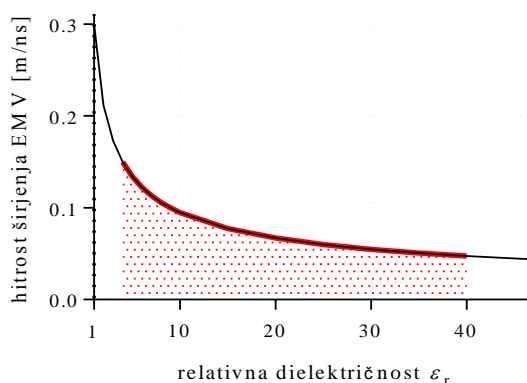
$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (29)$$

kjer je $c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ hitrost svetlobe v praznem prostoru.

Ker je magnetna susceptibilnost večine geoloških materialov relativno nizka, lahko predpostavimo, da je relativna magnetna permeabilnost $\mu_r \approx 1$ (glej razdelek 2.4.3). Hitrost širjenja EMV skozi homogene in izotropne medije se poenostavi in je odvisna le od relativne dielektričnosti:

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (30)$$

Graf na sliki 10 prikazuje odvisnost hitrosti širjenja EMV od relativne dielektričnosti ϵ_r medija. Večja kot je relativna dielektričnost medija, manjša je hitrost širjenja EMV.

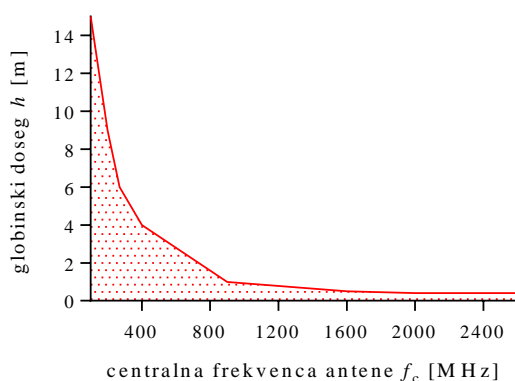


Slika 10: Odvisnost hitrosti širjenja EMV od relativne dielektričnosti medija. Relativna dielektričnost ϵ_r geoloških materialov je v intervalu od 2 do 40, kar predstavlja hitrost valovanja EMV med 0,2112 m/ns in 0,0474 m/ns.

Figure 10: Velocity dependence on transmission of EMW from dielectric constant ϵ_r of geological materials medium. Dielectric constant of soil and building materials is in the range of 2 to 40, representing EMW velocity between 0.2112m/ns and 0.0474 m/ns.

2.5.3 Globina penetracije EMV

Največja globina, ki jo doseže EMV, je funkcija frekvence valovanja in fizikalnih lastnosti medija, skozi katerega se širi (Thomas et al., 2008). Od frekvence izbrane antene je odvisna globina dosega EMV (Grealy, 2006). S frekvenco antene in fizikalnimi lastnostmi medija je določena tudi valovna dolžina valovanja. Večja kot je želena preiskovana globina medija, nižja mora biti uporabljena frekvenca oddajne antene (Mušič et al., 2010). Izbira ustrezne centralne frekvence antene je tako določena z največjo pričakovano globino GI (≈ 5 m). Najprimernejše in v praksi največkrat uporabljene antene za odkrivanje podzemne GI so tiste s centralno frekvenco 270–1600 MHz. Graf na sliki 11 prikazuje največji globinski doseg v mediju s povprečno relativno dielektričnostjo (≈ 7).



Slika 11: Največji globinski doseg pri različnih centralnih frekvencah f_c anten (GSSI, 2015).

Figure 11: Maximum depth range at various centre frequencies of antennas (GSSI, 2015).

Pasovna širina podaja razpon frekvenc, ki so v operativnem območju antene in na obeh straneh centralne frekvence. Definiramo jo lahko kot razmerje zgornjih frekvenc proti spodnjim, ali kot kvocient frekvenčnega pasu in centralne frekvence. GPR-sistemi uporabljajo dipolne antene s tipično pasovno širino oziroma spektrom oddanih frekvenc 1,5–2-kratnik centralne frekvence antene. Antena

s centralno frekvenco 400 MHz generira frekvenco od 200 do 800 MHz (Conyers, 2013). Večina anten ima definirano pasovno širino oddanih frekvenc z enačbo:

$$B = 2 \frac{(F_h - F_l)}{(F_h + F_l)} \quad (31)$$

F_h je zgornja in F_l spodnja frekvenčna meja, kjer je obseg spektra 10 dB šibkejši od absolutne vrednosti frekvenčne karakteristike celotnega frekvenčnega spektra (Jol, 2009). Pasovna širina je pri impulznih GPR-sistemih približno enaka centralni frekvenci antene (Davis in Annan, 1989; Fenner, 1992; Fisher et al., 1996; Grasmueck, 1996; Jol, 2009).

Globina ciljnega objekta, prepoznane na radargramu, je v tesni korelaciji s frekvenco valovanja in relativno dielektričnostjo oziroma hitrostjo širjenja EMV. Večina medijev, skozi katere potuje EMV, je zmes materialov z različnimi fizikalnimi lastnostmi. Materiali so pogosto razporejeni v horizontalnih plasteh, kar je na primer pravilo tudi pri voziščnih konstrukcijah (glej razdelek 3.3). Relativne dielektričnosti posameznih plasti se razlikujejo in s tem ključno vplivajo na določanje globine ciljnega objekta. Splošna enačba za določevanje globine h temelji na povprečni hitrosti in dvojnem času potovanja EMV, to je od antene do ciljnega objekta (Davis in Annan, 1989):

$$h = \frac{vt}{2} = \frac{c_0 t}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (32)$$

kjer je c_0 hitrost EMV v praznem prostoru, ϵ_r relativna dielektričnost in t čas potovanja EMV od antene do ciljnega objekta.

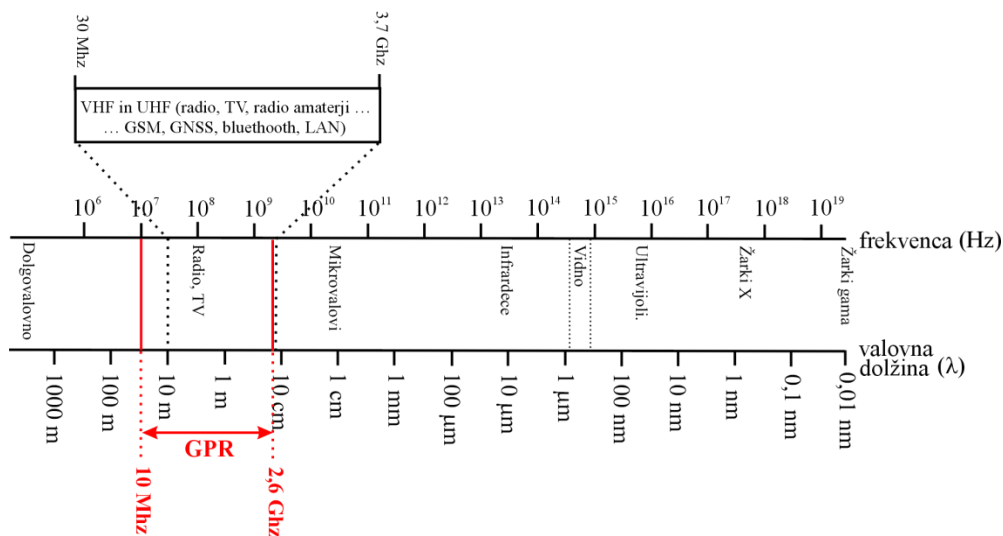
Valovna dolžina λ_m EMV v mediju se določi po enačbi (Daniels, 2004):

$$\lambda_m = \frac{v}{f} \quad (33)$$

kjer je v povprečna hitrost v mediju in f frekvenca valovanja.

2.6 Frekvenca, valovna dolžina in interferenca

Radijski valovi so elektromagnetni valovi s frekvencami od 3 Hz do 3 GHz, medtem ko radiofrekvenčni pas predstavlja del radiofrekvenčnega spektra, ki je omejen z določenima mejnima radijskima frekvencama. Radijske frekvence od 3 do 30 MHz uvrščamo med visoke frekvence (angl. high frequencies), od 30 do 300 MHz med zelo visoke frekvence (angl. very high frequencies) in od 300 MHz do 3 GHz med ultra visoke frekvence (angl. ultra high frequencies). Standardne GPR-antene omogočajo oddajanje valovanja s frekvenco od 10 MHz do 2,6 GHz (Xavier in Medeiros, 2006). V večini primerov se pri GPR-opazovanjih uporabljajo frekvence od 10 MHz do 1,5 GHz (Conyers, 2013), kot to prikazuje graf na sliki 12.

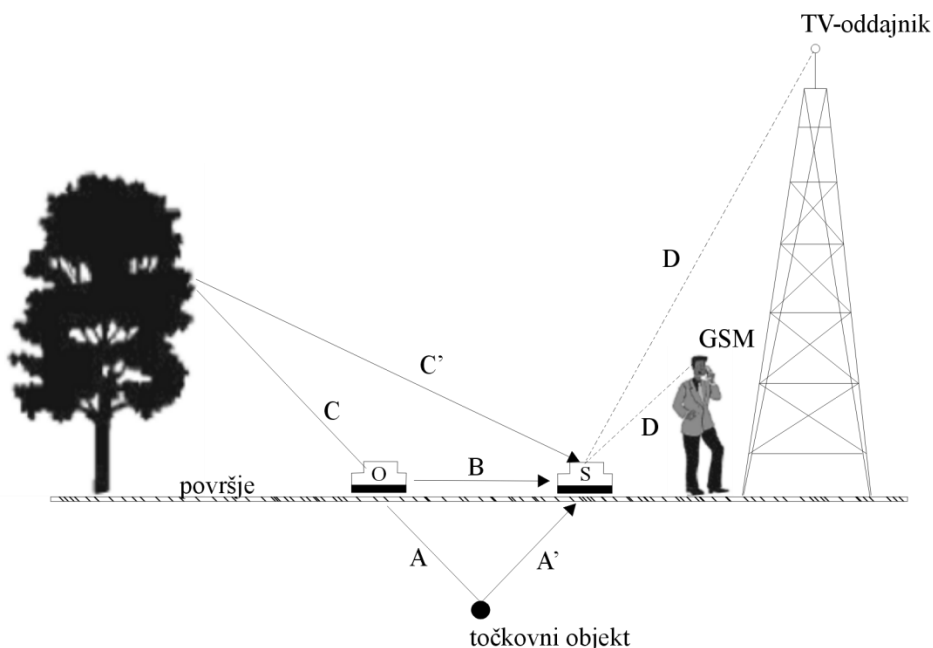


Slika 12: Frekvenčni spekter GPR.

Figure 12: GPR frequency range.

V frekvenčnem spektru visokih, zelo visokih in ultra visokih frekvenc delujejo oddajanje televizijskega signala, FM radijskih postaj, mobilna telefonija in druge osebne komunikacijske naprave, zaradi česar lahko nastane interferenca radijskih valov. Interferenca je pojav, ko se dve koherentni valovanji srečata na istem mestu, in nastane nov valovni vzorec, ki lahko onemogoči ali moti GPR-opazovanja. Pri interferenci radijskega valovanja se sešteva jakost električnega polja ali gostota magnetnega polja. Utripanje opazimo, če je na mestu GPR-izmere prisotno drugo radijsko valovanje in se frekvenci le malo razlikujeta. Amplituda jakosti električnega polja narašča in pada s frekvenco, ki je enaka razliki frekvenc. Ko sta frekvenci dveh izvorov EMV enaki, opazimo ojačitev na mestih, kamor prideta valovanji v fazi. Na mestih, kjer se srečata valovanji v nasprotni fazi, opazimo oslabitev valovanja. Da bi se izognili interferenci, nista odveč pozornost in skrbnost pri opravljanju GPR-meritev, in sicer z izklapljanjem mobilnih telefonov in drugih komunikacijskih naprav.

EMV od oddajne (O) do sprejemne (S) antene potuje po različnih poteh, kot prikazuje slika 13. Da bi zmanjšali vpliv neželenih odbojev in interference ter selektivno izboljšali želene odboje, je mogoče uporabiti zaščitene antene (angl. antenna shielding). Antena sprejema tudi odboje od predmetov na površini (grajeni objekti, drevesa, daljnovodi itd.) – imenovani tudi zračni odboji. Namen zaščite antene je: omogočiti najmočnejši neposredni odboj od točkovnega objekta na poti AA', zmanjšati neposredne valove na poti B, zmanjšati vpliv zračnih valov na poti CC' in čim bolj zmanjšati vpliv zunanje EMV, kot je prikazano na sliki 13, pot D.



Slika 13: Potovanje oddanega EMV do sprejemne (S) antene po različnih poteh ter možen vpliv interference (Jol, 2009).

Figure 13: Propagation of emitted EMV to receiver (S) antenna by different paths and possible impact of interference (Jol, 2009).

Zaščitene antene so pogostejše pri visokofrekvenčnih georadarskih sistemih, s frekvencami višjimi od 100 MHz, kjer so antene konstrukcijsko manjše. Zaščite anten so manj pogoste zaradi povečanja konstrukcijskih velikosti, teže in povečanja proizvodnih stroškov pri nizkofrekvenčnih georadarskih sistemih (Jol, 2009). Nezaščitene antene se uporabljajo, kadar želimo doseči visoko občutljivost signala ter največjo možno globino na odprtih neurbanih območjih.

2.6.1 Empirične relacije med relativno dielektričnostjo in vsebnostjo vode v mediju

Prisotnost kristalno vezane ali proste vode zmanjša ne samo hitrosti EMV v mediju, ampak se lahko odrazi v nosilnosti in deformabilnosti medija. Raziskovanje in podajanje empiričnih relacij med relativno dielektričnostjo medija in vsebnostjo vode sta bili v preteklosti pogosto predmet raziskovanja številnih avtorjev (Alharthi in Lange, 1987; Ferre et al., 1994; Graeff et al., 2010; Roth et al., 1992; Topp et al., 1980; Graeff et al., 2010). Omeniti je treba model trifazne enačbe (Dobson et al., 1985). V njem je relativna dielektričnost medija, vode in zraka (ϵ_b) izražena z modelom kompleksnega refrakcijskega indeksa (angl. Complex Refractive Index Model – CRIM):

$$\epsilon_b = \left[\theta \epsilon_v^\alpha + (1 - \eta) \epsilon_s^\alpha + (\eta - \theta) \epsilon_z^\alpha \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (34)$$

in izpeljan volumenski delež vode:

$$\theta = \frac{\epsilon_b^\alpha - (1 - \eta) \epsilon_s^\alpha - \eta \epsilon_z^\alpha}{\epsilon_v^\alpha - \epsilon_z^\alpha} \quad (35)$$

kjer je η [m^3/m^3] poroznost medija, ε_v relativna dielektričnost vode, ε_r relativna dielektričnost medija, ε_z relativna dielektričnost zraka in α orientacijski faktor glede na orientacijo električnega polja v mediju ($\alpha = 1$ za električno polje, vzporedno plastem medija, $\alpha = -1$ za električno polje, pravokotno na plasti medija, in $\alpha = 0,5$ za mešane izotropne plasti medija, izračunanega na podlagi časa potovanja EMV (Birchak et al., 1974).

Ob predpostavki $\varepsilon_z = 1$ in $\alpha = 0,5$ iz enačbe (35) sledi:

$$\theta = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_v - 1}} \sqrt{\varepsilon_b} - \frac{(1-n)\sqrt{\varepsilon_r - 1}}{\sqrt{\varepsilon_v - 1}} \quad (36)$$

kar daje fizikalno interpretacijo preproste relacije med volumenskim deležem vode in relativno dielektričnostjo (Ledieu et al., 1986; Herkelrath et al., 1991):

$$\theta = a\sqrt{\varepsilon_r} - b \quad (37)$$

Kjer ε_r lahko štejemo za relativno dielektričnost medija in sta a in b kalibracijska parametra.

Na osnovi enačbe (37) podajajo Graeff et al. (2010), Ferre et al. (1994) in Alharthi in Lange (1987) relacijo med relativno dielektričnostjo medija in vsebnostjo vode:

$$\theta_{\text{Graeff}} = 0,1324\sqrt{\varepsilon_r} - 0,2291 \quad (38)$$

$$\theta_{\text{Ferre}} = 0,1181\sqrt{\varepsilon_r} - 0,1841 \quad (39)$$

$$\theta_{\text{Alharti}} = 0,128\sqrt{\varepsilon_r} - 0,2040 \quad (40)$$

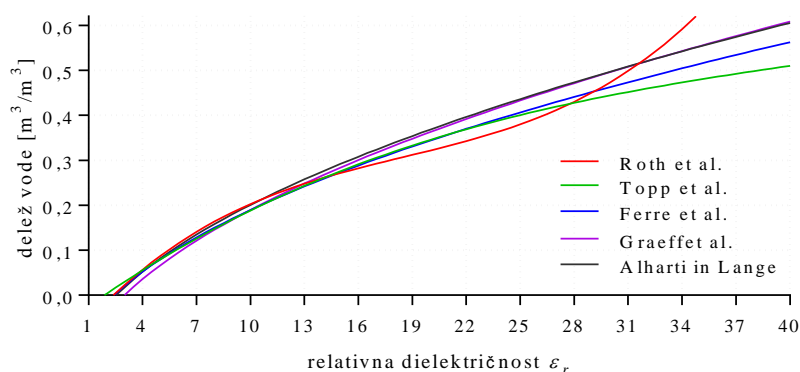
Topp et al. (1980) so s pomočjo metode merjenja TDR (angl. Time Domain Reflectometry) predlagali eno od najpogosteje uporabljenih relacij med vsebnostjo vode in relativno dielektričnostjo. S predpostavko veljavnosti v mineralnih zemljinah je volumenski delež vode θ [vode/zemljine] dan z enačbo:

$$\theta_{\text{Topp}} = 4,3 \cdot 10^{-6} \varepsilon_r^3 - 5,5 \cdot 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 2,92 \cdot 10^{-2} \varepsilon_r - 5,3 \cdot 10^{-2} \quad (41)$$

Podobne relacije podajajo tudi drugi avtorji, npr. Roth et al. (1992):

$$\theta_{\text{Roth}} = 36,1 \cdot 10^{-6} \varepsilon_r^3 - 1,95 \cdot 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 4,48 \cdot 10^{-2} \varepsilon_r - 7,8 \cdot 10^{-2} \quad (42)$$

Vpliv prisotnosti različnih volumenskih deležev vode na relativno dielektričnost v mediju prikazuje slika 14.

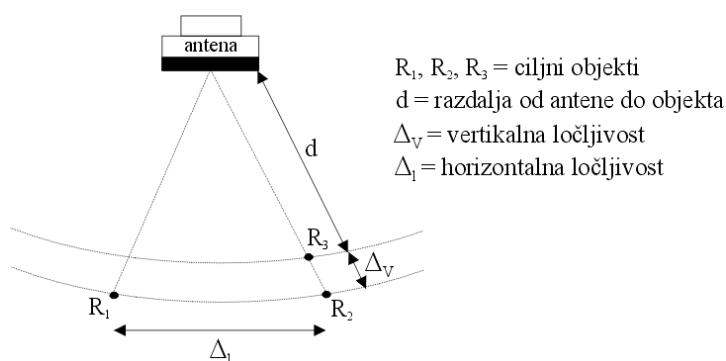


Slika 14: Odvisnosti relativnih dielektričnosti od volumskega deleža vode v mediju po različnih avtorjih.

Figure 14: Dependence between dielectric constant and volumetric water content in medium by various authors.

2.6.2 Prostorska ločljivost

Prostorska ločljivost je sposobnost georadarskega sistema ločevati od medija dielektrično različne ciljne objekte. Sestavljena je iz vertikalne Δ_v in horizontalne (lateralne) Δ_l ločljivosti, kot prikazuje slika 15 (Rial et al., 2009), in predstavljata sposobnost razlikovanja signalov v prostoru. Prostorska ločljivost v mediju je odvisna od električnih lastnosti medija in dušenja (zmanjševanje amplitude z oddaljenostjo od antene d). Snop eliptičnega stožca EMV določa razmerje med globino in ločljivostjo. Ožji kot je snop eliptičnega stožca, boljša je prostorska ločljivost. Širina snopa eliptičnega stožca EMV je odvisna od hitrosti v mediju. S povečanjem centralne frekvence se izboljšuje ločljivost, hkrati pa zmanjšuje globinski doseg, zato je treba za vsako raziskavo najti ustrezen kompromis med ločljivostjo in globinskim dosegom.



Slika 15: Razdelitev ločljivosti GPR-sistema na vertikalno in horizontalno komponento (Jol, 2009; Rial et al., 2009).

Figure 15: Resolution of GPR system divided into vertical and lateral components (Jol, 2009; Rial et al., 2009).

Pri georadarskih meritvah je spodnja meja vertikalne ločljivosti enaka najmanjši debelini prepoznanega ciljnega objekta, kar v praksi pomeni približno $\frac{1}{4}$ valovne dolžine λ (Brezigar et al., 1995). Podana je kot najmanjša vertikalna oddaljenost med ciljnim objektoma R_2 in R_3 (glej sliko 15), na kateri je mogoče dva georadarska odboja obravnavati kot dva ločena objekta

(Millard et al., 2002). Z višanjem frekvence izboljšujemo vertikalno ločljivost, ki je obratnosorazmerna valovni dolžini in premosorazmerna frekvenci.

Teoretično vertikalno ločljivost podamo z enačbo (Jol, 2009; Brezigar et al., 1995):

$$\Delta_v \geq \frac{v}{4B} = \frac{\lambda}{4} \quad (43)$$

Modificirano teoretično vertikalno ločljivost Δ_v , ob upoštevanju relativne dielektričnosti medija ε_r , podajata Eaves in Reedy (1987) z enačbo:

$$\Delta_v \geq \frac{1,39 \cdot c_0}{2B\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (44)$$

kjer je c_0 hitrost EMV v praznem prostoru, ε_r relativna dielektričnost in B pasovna širina, ki je pri impulznem georadarskem sistemu približno enaka centralni frekvenci antene f_c . Faktor 1,39 je empirično določen.

Teoretično vertikalno ločljivost po Eaves in Reedy (1987) v tej disertaciji uporabljenih centralnih frekvencah anten (270 MHz, 400 MHz, 900 MHz) v odvisnosti od relativne dielektričnosti medija prikazuje graf na sliki 16a. Predpostavlja se, da vertikalna ločljivost nikoli ni slabša od prikazane na grafu slike 16a (Jol, 2009).

Horizontalna ločljivost predstavlja najmanjšo horizontalno razdaljo, ki mora obstajati med bližnjima ciljnim objektoma R_1 in R_2 (glej sliko 15) v horizontalni smeri, tako da jih je še mogoče razlikovati (Daniels et al., 1988). Odvisna je od hitrosti širjenja EMV in frekvence valovanja, vendar nanjo pomembno vpliva še razdalja do ciljnega objekta. Pravokotne preseke snopa eliptičnega stožca EMV glede na smer razširjanja valovanja imenujemo Fresnelove cone, ki imajo obliko elipse (glej sliko 3). Horizontalno ločljivost je mogoče definirati s prvo Fresnelovo cono, dano z enačbo (Jol, 2009):

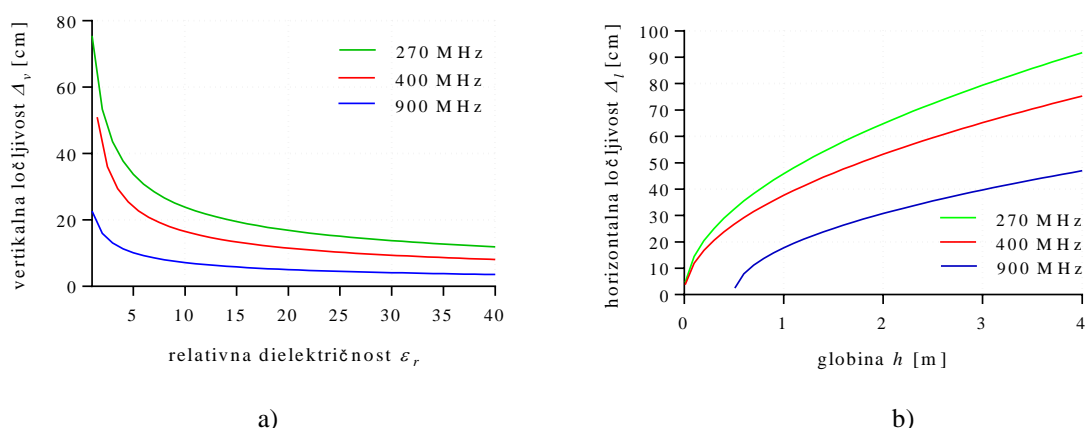
$$\Delta_h \geq \sqrt{\frac{vd}{2B}} = \sqrt{\frac{\lambda d}{2}} \quad (45)$$

Ob raziskovanju horizontalne ločljivosti so številni avtorji podali modificirane matematične enačbe, npr. Fowler (2004) in Conyers in Goodman (1997):

$$\Delta_h \geq \sqrt{\frac{\lambda^2}{4} + 2d\lambda} \quad (46)$$

$$\Delta_h \geq \frac{\lambda}{2} + \frac{2d}{\sqrt{\varepsilon_r + 1}} \quad (47)$$

kjer je λ valovna dolžina, d razdalja od antene do ciljnega objekta in ε_r relativna dielektričnost.



Slika 16: a) Vertikalna ločljivost po enačbi Eaves in Reedy (1987) v tej disertaciji uporabljenih anten v odvisnosti od relativne dielektričnosti medija; b) Horizontalna ločljivost v tej disertaciji uporabljenih anten v odvisnosti od globine h pri relativni dielektričnosti $\epsilon_r = 7$ v mediju.

Figure 16: a) Vertical resolution upon equation given by Eaves and Reedy (1987) of antennas used in the thesis depending on dielectric constant of medium; b) Horizontal resolution of antennas used in the thesis depending on the depth h at the dielectric constant of medium of antennas $\epsilon_r = 7$.

Preglednica 2 prikazuje komponenti prostorske ločljivosti v odvisnosti od izbranih centralnih frekvenc anten pri relativni dielektričnosti ϵ_r voziščne konstrukcije. Predpostavimo lahko, da teoretična vrednost relativne dielektričnosti bitumiziranih zmesi (AC surf, AC base) testnih voziških konstrukcij znaša 6, medtem ko relativna dielektričnost suhega apnenčevega drobljenca (TD in D) znaša 7 (glej poglavji 2.4 in 3.1). V testnih bazenih smo uporabili antene s centralnimi frekvencami valovanja 270 MHz, 400 MHz in 900 MHz (glej poglavje 4). Pričakovano so teoretični rezultati vertikalnih in horizontalnih ločljivosti boljši pri antenah z višjo centralno frekvenco oziroma manjšo valovno dolžino (glej sliki 16a in 16b).

Preglednica 2: Ločljivost ob predpostavljeni relativni dielektričnosti ϵ_r voziščne konstrukcije, globini $\frac{1}{2}$ m in uporabi anten z različnimi centralnimi frekvencami valovanja f_c [MHz] (vertikalna loč. $\Delta_v - 1$ (enačba (43)), $\Delta_v - 2$ (enačba (44)) ter horizontalna loč. $\Delta_l - 1$ (enačba (46)), $\Delta_l - 2$ (enačba (47))).

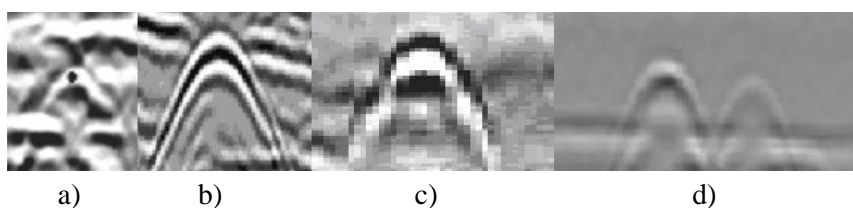
Table 2: Resolution assuming relative dielectric constant ϵ_r of road structure to the depth of $\frac{1}{2}$ m using antennas of different central frequencies f_c [MHz] (vertical resolution $\Delta_v - 1$ (see equation (43)), $\Delta_v - 2$ (see equation (44)) and horizontal resolution $\Delta_l - 1$ (see equation (46)), $\Delta_l - 2$ (see equation (47))).

Vhodni parametri (f_c in ϵ_r)				Ločljivost			
f_c [MHz]	ϵ_r []	v [m/ns]	λ [cm]	$\Delta_v - 1$ [cm]	$\Delta_v - 2$ [cm]	$\Delta_l - 1$ [cm]	$\Delta_l - 2$ [cm]
270	6	0,122	45,3	11,3	12,6	33,7	52,7
	7	0,113	42,0	10,5	10,8	32,4	50,4
400	6	0,122	30,6	7,6	8,5	27,7	42,0
	7	0,113	28,3	7,1	7,3	26,6	40,2
900	6	0,122	13,6	3,4	3,8	18,4	26,9
	7	0,113	12,6	3,1	3,2	17,7	25,9

2.6.3 Učinek materiala GI na obliko refleksijskih hiperbol

Georadarska opazovanja deloma omogočajo odkrivanje vrste materiala in tipa podzemne GI. Oblike refleksijskih hiperbol, negativni ali pozitivni vrhovi refleksijskih sledi in vrednosti amplitud nam služijo kot podlaga za oceno. Iz analize oblike refleksijske hiperbole lahko sklepamo o tipu ciljnega objekta. Kabli zaradi običajno manjšega premera povzročajo manjše hiperbole od cevi. V pomoč so tudi vpogledi v obdelano refleksijsko sled oziroma negativni ali pozitivni tip vrha, ki je pogojen z materialom voda ali cevi. Z vpogledi v obdelane refleksijske sledi je mogoče oceniti predznak koeficienta odbojnosti (glej enačbo 21). Ob negativnem predznaku koeficienta odbojnosti in spremembi faze signal prehaja iz materiala z večjo v material z manjšo relativno dielektričnostjo in obratno. Pravilo pozitivne refleksije velja, kjer ima spodnji material višjo relativno dielektričnost, in negativne refleksije, kjer ima spodnji material nižjo relativno dielektričnost kot zgornji. Ob predpostavki ocenjene hitrosti in posledično ocenjene relativne dielektričnosti materiala, v katerem je GI, lahko delno sklepamo za kakšen material ali polnilo, če ga ta vsebuje, gre.

Če se maksimalni pozitivni vrh nahaja na temenu refleksijske sledi hiperbole, pomeni, da gre za cev napolnjeno s tekočim polnilom, medtem ko ravno nasprotno najvišji negativni vrh nakazuje prazno cev. Svetli segmenti hiperbole na radargramu kažejo maksimalne pozitivne vrhove, kot to prikazujeta sliki 17a in 17b, in sicer refleksijsko hiperbolo električnega kabla DN/OD 35 ter napolnjene kovinske cevi DN/OD 110 iz realnega okolja. Temni segmenti hiperbole nakazujejo maksimalne negativne vrhove, kot to prikazuje slika 17c, in sicer refleksijsko hiperbolo prazne betonske cevi DN/OD 150. Amplituda radarskega odboja je odvisna od materiala, odstotka zapoljenosti in vrste polnila cevi (Ristič in Petrovački, 2005). Na osnovi amplitud radarskih odbojev lahko npr. sklepamo, ali gre za prazno ali zapolnjeno cev s polnilom. Zaradi neširjenja EMV skozi kovino, ki povzroča izrazitejšo amplitude radarskih odbojev, lahko sklepamo, ali gre za kovinsko ali nekovinsko cev. Amplitude refleksij signalov železnih cevi in PVC-cevi, zapoljenih s polnilom, imajo različne vrednosti. Posledično je njihova razpoznavnost na radargramu različna, kot to prikazuje slika 17d, in sicer refleksijski hiperboli kovinske in PVC-cevi – obe DN/OD 110 v realnem okolju. Refleksije kabelskih amplitud imajo večje vrednosti od polnih cevi. Prisotna kovina posledično povzroča močne ponavljajoče se refleksije (GSSI, 2006).



Slika 17: Zaznani tipi in materiali podzemne GI (Ristič in Petrovački, 2005).

Figure 17: Types and materials detection of utilities (Ristič in Petrovački, 2005).

2.7 Določevanje položaja georadarja

Položaj in višino ciljnih objektov v danem koordinatnem sistemu je mogoče pridobivati hkrati z georadarskimi opazovanji. Radarskim odbojem ciljnih objektov mora biti zagotovljena ustrezna natančnost njihovega prostorskega položaja v izbranem koordinatnem sistemu. Jol (2009) navaja, da so metode zajema v 3D-koordinatnem sistemu v realnem času sicer uporabne, vendar še niso široko raziskane v povezavi z GPR. Optimalna metoda zajema položaja in višine je odvisna od zahtevane

natančnosti, velikosti obravnavanega območja, števila ovir (npr. stavbe in drevesa) in nivoja elektromagnetnega onesnaženja, ki povzroča interference med valovanji (Lehmann in Green, 1999).

Za določanje položaja georadarja oziroma georadarskih odbojev podzemne GI lahko uporabimo moderni geodetski metodi, kot sta globalni navigacijski sistem (angl. Global Navigation Satellite System – GNSS) in klasična terestrična metoda, odvisno od značilnosti območja, predvidenega za georadarsko raziskavo.

Opazovanja GNSS so ena od učinkovitih metod določanja položaja v realnem času in hkrati zagotavljajo določitev absolutnega položaja v opredeljenem geocentričnem referenčnem sistemu. Poznamo več sistemov GNSS, in sicer ameriški GPS (angl. Global Positioning System), ruski GLONASS (rus. GLObalnaja NAVigacionnaja Sputnikovaja Sistema), evropski Galileo in kitajski Compass. Postopkov določevanja položaja na osnovi sistemov GNSS je več (Kozmus in Stopar, 2003), vendar se uporablja predvsem relativna fazna določitev položaja zaradi visoke natančnosti in določitve položaja točke v istem koordinatnem sistemu, v katerem je določena bazna/referenčna točka. Relativna fazna določitev deluje na osnovi sestavljenih dvojnih faznih razlik opazovanj, pridobljenih na dveh sprejemnikih v isti terminski izmeri, s katerimi se odstrani številne vplive (pogrešek ure satelitov in sprejemnika) oziroma zmanjšajo (ionosfera, troposfera, pogrešek položajev satelitov itd.). Podrobnejši opis lahko najdemo v Leick (1995). Metoda omogoča kinematično določitev položaja tudi v realnem času, kjer se ob navezavi na eno samo referenčno postajo GNSS imenuje RTK (angl. Real Time Kinematic), ob navezavi na omrežje stalno delujočih postaj in kreiranja virtualne postaje GNSS pa RTK-VRS (angl. RTK Virtual Reference Station).

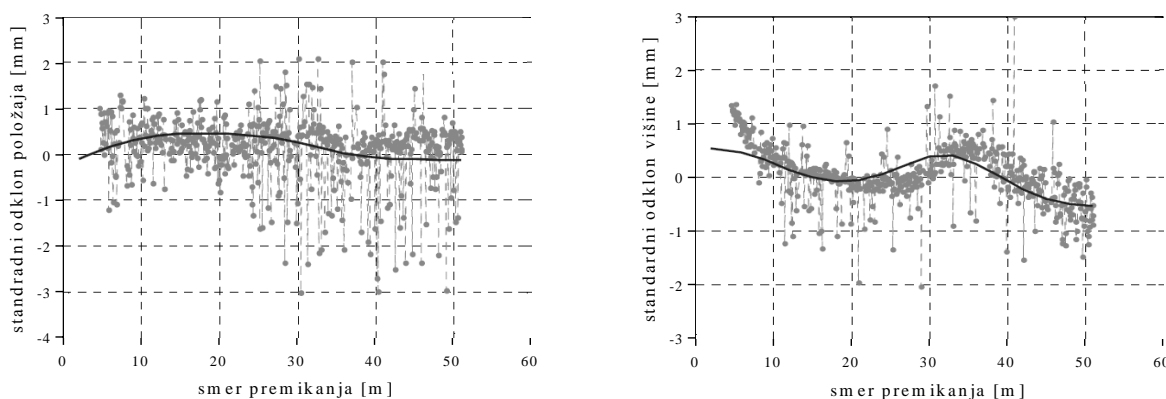
Literatura navaja več metod za določanje položaja in višin georadarja: terestrične kinematične metode izmere (polarna izmera) (Lehmann in Green, 1999; Boniger in Tronicke, 2010); kinematični metodi GNSS-izmere, kot sta RTK (Solla et al., 2014; Onishi et al., 2005) in diferencialna GNSS-izmera (DGNSS) (Streich, 2007) in rotacijski laserski sistem določevanja položaja (RLPS) (Novo et al., 2008; Grasmueck in Viggiano, 2007). Metode GNSS-izmere so omejene zaradi interference georadarskih in GNSS-valovanj, omejenega sprejema signala in vpliva večpotja na opazovanja v urbanem okolju (Barzaghi et al., 2016).

Geodetska meritev pomeni postopek spremljanja gibanja georadarja vzdolž profilov. Sodobni geodetski instrumenti omogočajo zajem kinematičnih procesov z visoko frekvenco meritev. Ta lastnost geodetskih instrumentov daje geodetskemu zajemu premikov ključno prednost, tj. opredelitev premikov v prostoru. Pri obravnavi objekta kot kinematičnega procesa se predpostavlja, da je georadar stalno v gibanju. Ob predpostavki, da so spremembe položaja georadarja zajete z merskim sistemom, ki omogoča enolično določitev položaja za posamezni časovni trenutek, nimamo na voljo nadštevilnih meritev. Klasični geodetski postopki naknadne obdelave, ki temeljijo na izravnavi nadštevilnih geodetskih opazovanj, v tem primeru niso uporabni. V kinematičnih procesih imamo opravka s časovnimi vrstami in standardnimi tehnikami odstranitve šuma iz časovne vrste, kot sta filtriranje in glajenje (Gamse, 2010). V smislu metode najmanjših kvadratov je odstranitev šuma optimalna z uporabo Kalmanovega filtra.

Načelno se lahko zanašamo le na a priori informacije o merskem sistemu in izbrani metodi. Zato je treba za vsak terestrični kinematični proces določiti naslednje vrednosti in izpolniti zahteve (Gamse, 2010; Kirschner in Stempfhuberg, 2008):

- velikost vektorja premika: tj. hitrost in smer premika reflektorja/georadarja,
- frekvenco meritev: frekvenca meritev mora zadoščati opisu gibanja v smislu smeri in hitrosti,
- samodejno sledenje in samostojno iskanje premikajočega se reflektorja ob neenakomernem gibanju ali ovirah med instrumentom in reflektorjem,
- adicijsko konstanto reflektorja,
- kalibrirani instrument: pri kinematičnem merjenju nimamo možnosti izvajanja meritev horizontalne smeri in zenitne razdalje v dveh krožnih legah in nadštevilnih meritev dolžine, ki bi omogočale odstranitev instrumentalnih pogreškov, zato je še posebej pomembno, da je instrument kalibriran,
- čas prenosa: pri shranjevanju meritev/koordinat na georadar je treba določiti čas prenosa oziroma upoštevanje latence med dvema povezanima sistemoma,
- oddaljenost elektronskega tahimetra od premikajočega se reflektorja: proizvajalci priporočajo vsaj 10 m oddaljenosti zaradi omejitev v kotni hitrosti premikanja instrumenta.

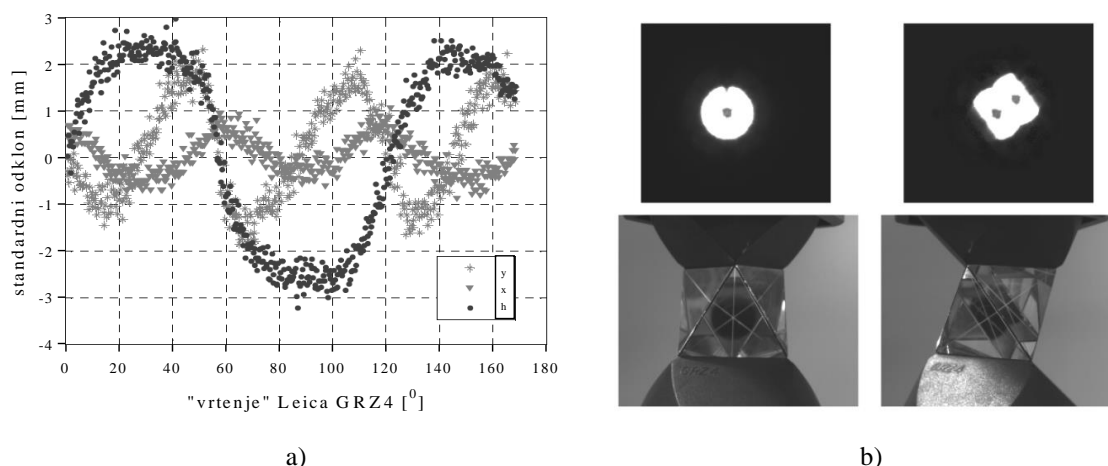
Vključitev časovne komponente neposredno v obdelavo terestričnih kinematičnih opazovanj zahteva dobro poznavanje zmogljivosti sodobnih elektronskih tahimetrov in postopkov obdelave terestričnih kinematičnih opazovanj. V sklopu raziskave Kirschnerja in Stempfhuberga (2008) je bil simuliran kinematični proces v lokalnem koordinatnem sistemu vzdolž poznane 50-metrске vodoravne referenčne tirnice na Inštitutu za geodezijo in fotogrametrijo ETH Zürich (angl. Swiss Federal Institute of Technology). V kinematičnem procesu sta uporabila elektronski tahimeter Leica TPS1200+ s samodejnim prepoznavanjem in sledenjem reflektorja ter reflektor Leica GPR1. Frekvenca meritve je znašala 8–10 Hz, konstantna hitrost premikajočega se reflektorja pa 0,6 m/s. Avtorja navajata položajno in višinsko točnost kinematične metode, manjšo od centimetra, v nadzorovanih laboratorijskih pogojih in ob upoštevanju večine vplivov (glej sliko 18).



Slika 18: Standardni odklon položaja in višine vzdolž referenčne 50 m tirnice (Kirschner in Stempfhuberg, 2008).

Figure 18: Position and height deviations along the 50 m reference calibration track line (Kirschner and Stempfhuberg, 2008).

Uporaba 360° reflektorjev je danes v kinematični metodi z merjenjem neodvisno od njene horizontalne orientacije že pravilo. Kot slabost v kinematični metodi navajata vpliv »vrtenja« tako konstruiranega reflektorja okoli svoje vertikalne osi (glej sliko 19).



Slika 19: a) Standardni odklon zaradi »vrtenja« reflektorja Leica (GRZ4); b) Točki zajema reflektorja pri 90° (levo) in 60° (desno) (Kirschner in Stempfhuberg, 2008).

Figure 19: a) Standard deviation caused by continual rotation of Leica GRZ4 all-round reflector; b) Capture points of reflector rotation angle at 90° and 60° (Kirschner in Stempfhuberg, 2008).

Pričakovana natančnost položaja reflektorja v kinematični metodi je pretežno odvisna od hitrosti reflektorja. Lehmann in Green (1999) sta v svojem preizkusu uporabila dve hitrosti premikajočega se reflektorja, 1 m/s in 3 m/s, pri frekvenci meritve 4 Hz sta pridobila položaj in višino na intervalih razdalje $\approx 0,25$ m in $\approx 0,6$ m. Prav tako sta uporabila lokalni koordinatni sistem in vodoravne referenčne tirnice na ETH Zürich. Oddaljenost elektronskega tahimetra s samodejnim prepoznavanjem in sledenjem reflektorja od referenčne tirnice je znašala ≈ 7 m. Ocenila sta največji odklon od prave vrednosti po položaju ≈ 4 cm in višini < 1 cm pri hitrosti 1 m/s. Največji odklon položaja od prave vrednosti se je ob povečanju hitrosti na 3 m/s pričakovano poslabšal na ≈ 8 cm, medtem ko je odklon po višini ostal < 1 cm. Ob povečanju oddaljenosti elektronskega tahimetra od referenčne tirnice na 10 m se je največji odklon po položaju pri obeh hitrostih zmanjšal za faktor 0,25.

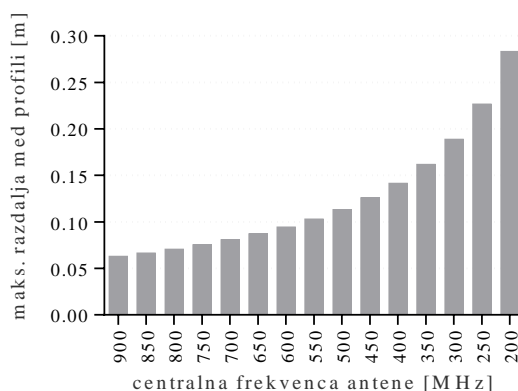
Določevanje položajev na osnovi klasične terestrične kinematične metode temelji na vzpostavljeni geodetski mreži, ki predstavlja geometrično osnovo. Vzpostavitev geodetske mreže je kompleksno opravilo, pri katerem upoštevamo pravila načrtovanja mreže, izbiramo med številnimi merskimi tehnikami in zmogljivostjo uporabljene merske opreme. Nadzorovati moramo zajem in obdelavo podatkov, upoštevati popravke merjenih količin in uporabiti primerno metodo izravnave.

Pri georadarskih raziskavah, kjer ne uporabimo geodetskih kinematičnih metod izmere, se najpogosteje uporablja ortogonalne mreže, razvite znotraj raziskovanega območja v referenčnem koordinatnem sistemu. Relativne položaje, podane s koordinatami radarskih odbojev v prostoru, se določa glede na njihov položaj znotraj ortogonalne mreže, postavljene z geodetsko terestrično metodo izmere. Pri georadarskih meritvah navadno uporabljamo dva načina določanja razdalj vzdolž profila. Prvi način so meritve v časovni domeni (angl. time mode), kjer določimo časovni interval proženja signala in vzdolž georadarskega profila markerje za naknadno umerjanje georadarskega profila. Drugi način je meritev z merilnim kolesom, ki proži radarske signale na izbrani razdalji (angl. distance mode) (Mušič et al., 2012).

2.7.1 Opredelitev dimenzije mreže in zahtevane položajne natančnosti

Pri izvedbi geodetskega zajema ali s pomočjo ortogonalne mreže moramo definirati medsebojni razmik med vzporednimi profili, vzdolž katerih zajemamo sledi. Razdaljo oziroma razmik med sledmi (angl. step size) predstavljajo točke, kjer se izvede proženje impulza vzdolž posameznega profila. Nyquist-Shannonovo pravilo o vzorčenju definira rekonstrukcijo signala brez napake takrat, kadar je frekvenca vzorčenja signala dvakrat višja od najvišje frekvence, ki je vsebovana v signalu. V večini primerov anten georadarskih sistemov je razmerje pasovne širine B in centralne frekvence f_c enaka 1, kar pomeni, da impulz seva energijo od 0,5 do 1,5 centralne frekvence (glej razdelek 2.5.3). To se kaže v najvišji frekvenci georadarskega valovanja, ki jo predstavlja 1,5-kratnik centralne frekvence. Za razdaljo razmika med sledmi uporabimo 2-kratnik centralne frekvence, s čimer smo pri načrtovanju vzorčenja varni. Radarskim odbojem oziroma sledem vzdolž profila moramo zagotoviti vzorčenje, ne manjšega kot $\lambda/4$ (Lehmann in Green, 1999). Proizvajalci GPR-sistemov običajno kot minimalno dolžino intervala vzorčenja predlagajo četrtino valovne dolžine centralne antenske frekvence (Jol, 2009).

Da bi se izognili preredkemu prostorskemu vzorčenju, je največji razmik med vzporednimi profili v ortogonalni mreži odvisen od najmanjše valovne dolžine λ_{min} EMV v mediju. Razmik med profili kot funkcija različnih centralnih frekvenc anten ob relativni dielektričnosti $\epsilon_r = 7$ je prikazan na sliki 20, medtem ko je velikost celice v ortogonalni mreži prikazana v preglednici 3.



Slika 20: Velikost celice ortogonalne mreže pri različnih centralnih frekvencah anten ob relativni dielektričnosti $\epsilon_r = 7$.

Figure 20: The size of the orthogonal grid cell at different centre frequencies of antennas by relative dielectric permittivity $\epsilon_r = 7$.

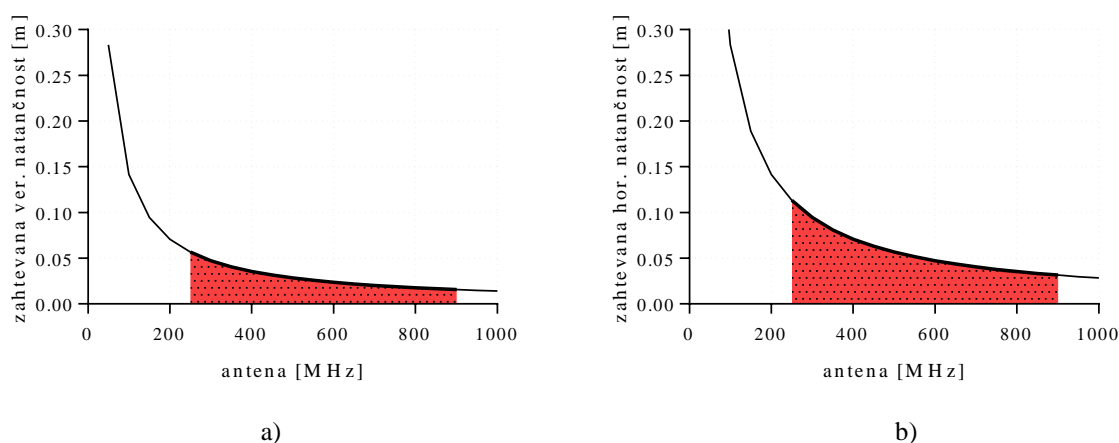
Preglednica 3: Velikost celice v ortogonalni mreži ob predpostavljani relativni dielektričnosti voziščne konstrukcije $\epsilon_r = 7$ ob uporabi izbranih anten.

Table 3: Size of cell in orthogonal grid assuming relative dielectric permittivity of road structures and subgrade soil $\epsilon_r = 7$ with the usage of chosen antennas.

f_c [MHz]	Velikost celice ortogonalne mreže $\lambda/2$ [m]
270	0,211
400	0,141
900	0,139

Radarskim odbojem oziroma sledem vzdolž profila moramo zagotoviti ustrezno natančnost njihovega horizontalnega položaja v prostoru, ne manjše kot $\lambda/4$ oziroma $\lambda/8$ valovne dolžine za višine (Lehman in Green, 1999).

Ob predpostavki hitrosti širjenja EMV (v testnih bazenih – glej poglavje 3), $v = 0,113$ m/ns, in uporabi anten s centralnimi frekvencami valovanja 270 MHz, 400 MHz in 900 MHz morajo biti rezultati teoretične vertikalne natančnosti boljši od $\pm 0,062$ m do $\pm 0,015$ m in teoretične horizontalne natančnosti boljši od $\pm 0,124$ do $\pm 0,031$ m, tako kot to prikazujeta grafa na sliki 21.



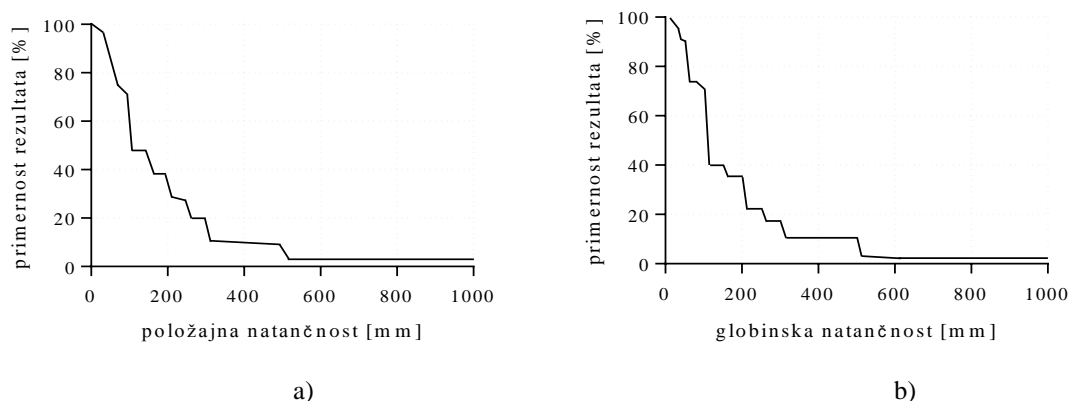
Slika 21: Zahtevane natančnosti pri relativni dielektričnosti ($\epsilon_r = 7$) izbranih anten: a) Zahtevana teoretična vertikalna natančnost; b) Zahtevana teoretična horizontalna natančnost.

Figure 21: Required accuracy at dielectric constant ($\epsilon_r=7$) chosen antennas. a) Required theoretical vertical accuracy; b) Required theoretical horizontal accuracy.

2.7.2 Zahtevana natančnost položaja in globin georadarskih opazovanj

Natančnost položaja in globin, pridobljenih z georadarskimi opazovanji, se lahko bistveno razlikuje zaradi slabljenja EMV v mediju in kontrasta med GI in medijem, v katerem so. Kontrast določa moč refleksije in brez dokazanih toleranc v odstopanjih bo zaupanje v metodo GPR pri določevanju položaja nizko (Thomas et al., 2008). Na natančnost določanja položaja nekoliko vpliva tudi globina objekta, ker pri interaktivnem določanju položaja temena radarskega odboja neposredno na radarskem profilu večinoma lažje določimo položaj odboja za plitve objekte, kjer so hiperbole ožje kot pri globlje ležečih objektih, pri katerih so lahko bistveno širše (Mušič et al., 2012).

Na slikah 22a in 22b so prikazane želje oziroma zahteve lastnikov in upravljavcev GI po položajni in višinski natančnosti georadarske metode. Zahtevana natančnost horizontalnih koordinat GI je določena z velikostjo 95 % elipse zaupanja, katere daljša polos je krajša od 30 cm. Večino bi zadovoljila globina penetracije do 2 m in natančnost določevanja višin oziroma globin, ko je natančnost višin GI podana z polovično dolžino intervala s 95 % zaupanjem v višino točke krajša od 30 cm (Thomas et al., 2008).



Slika 22: Opredeljena primernost natančnosti georadarske metode lastnikov in upravljavcev GI:
a) Povprečna zelena položajna natančnost; b) Povprečna zelena globinska natančnost
(Thomas et al., 2008).

Figure 22: Defined suitability of GPR method by owners and operators of infrastructure: a) Average plain accuracy requirements; b) Average depth accuracy requirements (Thomas et al., 2008).

Ameriško združenje gradbenih inženirjev podaja smernice in priporočila za evidentiranje obstoječe podzemne gospodarske infrastrukture CI/ASCE 38-02 (angl. Standard Guideline for the Collection and Depiction of Existing Subsurface Utility Data). V skladu s temi smernicami obstajajo štiri ravni kakovosti podatkov (A, B, C in D), pridobljene z različnimi metodami, med katere spada tudi tehnologija GPR (ASCE, 2014). GPR uvrščajo v drugi kakovostni razred (B).

V preteklosti je bila tema zahtevane natančnosti pogosto obravnavana. Ambroš (1988) navaja zahtevano položajno natančnost katastrov elektronskih komunikacij, ocenjeno z daljšo polosjo standardne elipse zaupanja v koordinati točke, ki ne sme biti slabša od 8 cm, in višinsko natančnost, ocenjeno s standardnim odklonom višine točke, ki ne sme biti slabša od 3,5 cm. V Sloveniji Priročnik o evidentiranju gospodarske infrastrukture (Šarlah et al., 2010) podaja zahtevano natančnost koordinat točk (2D) temena objekta GI, ocenjeno z daljšo polosjo standardne elipse zaupanja v koordinati točke, ki ne sme biti slabša od 12 cm. Natančnost višine točk, ocenjena s standardnim odklonom višine točke, ne sme biti slabša od 10 cm. Predvidena ocena natančnosti položaja radarskih odbojev/infrastrukturnih objektov znotraj ortogonalne mreže, ocenjena z daljšo polosjo standardne elipse zaupanja v koordinati točke, je približno 10 cm na ravnih površinah in nekoliko več na območjih z manjšimi fizičnimi preprekami (Mušič et al., 2012).

Globina dosega EMV je odvisna od frekvence oddajne antene. Ta znaša pri 400 MHz anteni v okoliščinah urbanega okolja približno 2,5 m. Zaradi večinoma majhnih globin, v katerih so ciljni objekti, so npr. tudi napake pri določanju globin radarskih odbojev sorazmerno majhne. Johnson et al. (1979) navajajo podatek razlike radargramske interpretirane in geodetsko merjene globine na pretežno peščenih tleh in dobro izraženih horizontalnih plasteh v rangu od $\pm 2,5$ do 5,0 cm. Asmussen et al. (1986) navajajo razliko $\pm 19,2$ cm pri globini objektov od 0,2 do 4,5 m v glinenih in ilovnatih tleh. Rebertus et al. (1989) pri globini objektov od 0,1 do 2,5 m navajajo napako manjšo od ± 15 cm. Collins et al. (1989) navajajo povprečno odstopanje ± 6 cm v trdih in suhih tleh pri globini od 0,8 do 2,4 m.

2.7.3 Slikovno ujemanje parov profilov

Položajna točnost pridobljenih georadarskih podatkov s terestrično kinematično metodo je pretežno odvisna od treh dejavnikov: natančnosti uporabljenega merskega sistema, izbrane metode izmere ter sistematične latence. Latenco ali zakasnitev predstavlja čas, ki preteče od oddaje do sprejema sporočila. V našem primeru se latenca nanaša na časovni zamik med dejansko izmerjenim položajem in njegovim zapisom na georadarsko sled. Področje je v gradbeništvu dobro poznano, vendar je bilo bolj ali manj prezrto pri georadarskih meritvah oziroma plitvi geofiziki (Boniger in Tronicke, 2010).

Ob predpostavki identične globine ciljnega objekta smo pri odkrivanju latence oziroma lateralnega zamika (glej razdelek 4.5) parov radargramov (r_t, r_n) enega profila oziroma radargramov v obeh smereh: tja (r_t) in nazaj (r_n), ob predpostavki enake hitrosti gibanja georadarja, uporabili slikovno ujemanje (angl. image matching). Obstaja več različnih metod slikovnega ujemanja (Kosmatin Fras et al., 2008). Subjektivne tehnike so zamudne in neuporabne pri veliki količini slik, medtem ko objektivne delimo v tri glavne kategorije: ujemanje na osnovi značilik (angl. feature-based matching), ujemanje na osnovi površin (angl. area-based matching) in strukturno ujemanje (angl. structural matching). Relativna preprostost uvršča metodo ujemanja po površini med najpogosteje uporabljene (Zitova in Flusser, 2003).

Eno od metod poravnave in ujemanja po površini imenujemo korelacijska tehnika (Fonseca in Manjunath, 1996). Temelji na ujemanju izbranega območja dveh slik. Običajno so območja kvadratne oblike. Goshtasby (2005) navaja uporabo okroglih območij, ki se izkažejo za smiselne pri zasukanih slikah, a slabše pri večjih geometrijskih deformacijah. Korelacijo uporabimo, ko ugotovljamo ujemanje dveh slik ali območij. V osnovi gre za premikanje ene slike proti drugi in računanje njenega medsebojnega ujemanja pri posameznih premikih. Mesto z največjo vrednostjo korelacije ustreza rešitvi, pri kateri sta sliki najboljše poravnani, in opredeljuje naše iskane parametre (zamik v številu slikovnih elementov). Natančnost, ki jo postopek dosega, je v velikosti enega slikovnega elementa, vendar jo lahko s pomočjo interpolacijskih postopkov še izboljšamo. Podobnost lahko iščemo tudi med slikami, v katerih so manjša neskladja zaradi zasuka ali velikosti, kar je pogost pojav pri radargramih (Gonzales in Woods, 2007; Zitova in Flusser, 2003; Rakun, 2010).

Za mero slikovne poravnave in ujemanja parov radargramov (r_t, r_n) lahko uporabimo različne kriterije. Širše uporabljena sta korelacijski koeficient (angl. correlation coefficient) in srednji kvadratni pogrešek (MSE). Ujemanje temelji na preverjanju podobnosti posameznih slikovnih elementov na obeh radargramih. Izračun korelacijskega koeficienta je izpeljan iz standardnega odklona $\sigma(r_t)$ in $\sigma(r_n)$ radiometričnih vrednosti v izseku radargrama (r_t) in (r_n) in njihove kovariance $\sigma(r_t r_n)$:

$$r_{(r_t, r_n)} = \frac{\sigma_{(r_t r_n)}}{\sigma_{(r_t)} \sigma_{(r_n)}} \quad (48)$$

$$\mu_{(r_t)} = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M r_t(i, j) \quad (49)$$

$$\mu_{(r_n)} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M r_n(i, j) \quad (50)$$

$$\sigma_{(r_t)} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)(M-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (r_t(i, j) - \mu_{(r_t)})^2} \quad (51)$$

$$\sigma_{(r_n)} = \sqrt{\frac{1}{(N-1)(M-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (r_n(i, j) - \mu_{(r_n)})^2} \quad (52)$$

$$\sigma_{(r_{tr_n})} = \frac{1}{(N-1)(M-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (r_t(i, j) - \mu_{(r_t)})(r_n(i, j) - \mu_{(r_n)}) \quad (53)$$

kjer je r korelacijski koeficient, $\sigma_{(r_{tr_n})}$ kovarianca radiometričnih vrednosti para primerjanih slik, $\sigma_{(r_t)}$ in $\sigma_{(r_n)}$ standardna odklona in $\mu_{(r_t)}$ in $\mu_{(r_n)}$ srednji vrednosti posameznih slik (Wang in Bovik, 2002).

Za najverjetnejši zamik homologne refleksije oziroma hiperbole se tako izbere položaj na sosednjem radargramu, kjer ima korelacijski koeficient največjo vrednost. Vrednost korelacijskega koeficienta je lahko med vrednostma -1 in 1 , kjer 1 pomeni popolno ujemanje, vrednost 0 pa kaže na popolno neujemanje.

Med bolj uveljavljene metode poravnave in ujemanja sodi MSE. Temelji na izračunu srednjega kvadratnega pogreška slikovnih elementov primerjanih radargramov. Metoda je privlačna zaradi enostavnosti izračuna, jasnega fizikalnega pomena in matematične prikladnosti v okviru optimizacije (Kumar in Rattan, 2012; Wang in Bovik, 2009).

$$MSE_{(r_t, r_n)} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (r_t(i, j) - r_n(i, j))^2 \quad (54)$$

2.8 Obdelava radargramov

Obdelava in analiza georadarskih opazovanj oziroma njihovih grafičnih prikazov v obliki zaporednih združenih refleksijskih sledi v radargrame (glej razdelek 2.9) sta med vsemi temami eni najkontroverznejših in predmet pogostih znanstvenih razprav. Kako daleč naj bi šel posameznik pri napredni obdelavi, je odvisno od njegove presoje, izkušenj, tematike, vrste iskanega ciljnega objekta in navsezadnje od lastnosti posameznih opazovanj. Pravilo, ki se je uveljavilo v svetu obdelave opazovanj, temelji na preprosti logiki, da slabih in nepopolnih surovih podatkov opazovanj ne more rešiti še tako sofisticiran in napreden postopek obdelave (angl. rubbish in, rubbish out) (Jol, 2009).

Za razumevanje in pridobitev ocene zelenih parametrov in informacij morajo surovi georadarski podatki skozi številne osnovne in napredne procese naknadne obdelave. Ti postopki, ki so najpogosteje izvajani ročno, so zamudni, podvrženi subjektivnim intervencijam in zahtevajo veliko angažiranja. Smiselno se jih povezuje v nize oziroma avtomatske modele procesov (angl. processing flow) z razlogom zmanjšanja človeškega dejavnika in prihranka časa. Obdelava zahteva izkušenega, sistematičnega in doslednega strokovnjaka z razumevanjem ozadja procesov in sposobnostjo ločevanja potencialnih ciljnih objektov od neurejenosti in šumov, ki so posledica tehničnih konstrukcijskih posebnosti sistema anten in številnih vplivov iz okolja ter lastnosti preiskovanega medija.

Annan (2003) priporoča obdelavo podatkov v štirih zaporednih fazah: urejanje podatkov, osnovna obdelava, napredna obdelava in vizualna interpretacija. Urejanje podatkov vključuje podatkovno

reorganizacijo, združevanje datotek, dodajanje metapodatkov in osnovnih informacij v glavo datotek, položajne in topografske korekcije. Osnovno obdelavo sestavljajo trije koraki: določanje vpliva nižjih frekvenc, ojačitev signala in časovni filter. Napredna obdelava vključuje atributne analize, f-k-filtriranje, selektivno dušenje, globinske filtre, glajenje signala, analize hitrosti, odstranitve ozadja; vizualna interpretacija pa migracijo, analize amplitud, ročno ali avtomatsko izbiranje vrhov in subjektivne ojačitve signala.

Conyers (2013) priporoča podobno izvajanje korakov obdelave. Prvi korak predstavljajo horizontalni in vertikalni popravki, kot so različne interpolacije, umerjanje razdalje in statični popravki. Drugi korak so odstranitve ozadja in visokopasovni filtri. Tretji korak vsebuje odstranjevanje visokofrekvenčnih šumov z uporabo f-k- in nizkopasovnih filtrov. V četrtem koraku se zmanjšujejo večkratni odboji s pomočjo glajenja signala. Zadnji, peti korak je namenjen vizualizaciji s pomočjo migracije.

V strokovni literaturi obstajajo za večino podatkovnih nizov splošni priporočeni koraki obdelave. V praksi ni nobenega industrijskega standarda obdelave GPR-podatkov, zato je apliciranje enolično določenega modela zaporednih korakov obdelave z vnaprej določenimi parametri nad GPR-podatki, pridobljenimi v različnih raziskavah za različne namene, nesmiselno. Vsak nabor podatkov oziroma opazovanj je edinstven in bo zahteval različne korake obdelave za odpravo njegovih nezaželenih lastnosti in okrepil za raziskavo pomembne značilnosti. Pomembno je biti odprt in hkrati kritičen do vseh predlaganih korakov obdelave in si na podlagi namena, izkušenj in rezultatov posameznih korakov izoblikovati svoj model.

Med osnovne korake obdelave georadarskih podatkov, ki so že skoraj standardni, literatura uvršča urejanje podatkov (angl. editing), interpolacijo podatkov (angl. interpolation), korekcijo vpliva nizkih frekvenc in nihanja jakosti enosmernega toka (angl. dewow) ter popravek začetnega časa (angl. time-zero correction) (Jol, 2009). Med dodatne postopke sodijo časovni in prostorski filtri (angl. filtering), ojačitev signala (angl. gain function), višinske in topografske korekcije (angl. elevation and topographic correction) in določevanje globine (angl. depth conversion), med napredne postopke obdelave pa so navadno uvrščeni glajenje signala (angl. deconvolution), analiza migracij (angl. migration analysis) in analiza hitrosti (angl. velocity analysis).

2.8.1 Organizacija podatkov

Organizacija oziroma urejanje podatkov sta v tesni povezavi z uporabljenim programskim paketom za obdelavo in tipom uporabljene GPR-opreme. Način zapisa in organizacije izhodnih datotek GPR-podatkov ni enoličen za vse proizvajalce GPR-opreme.

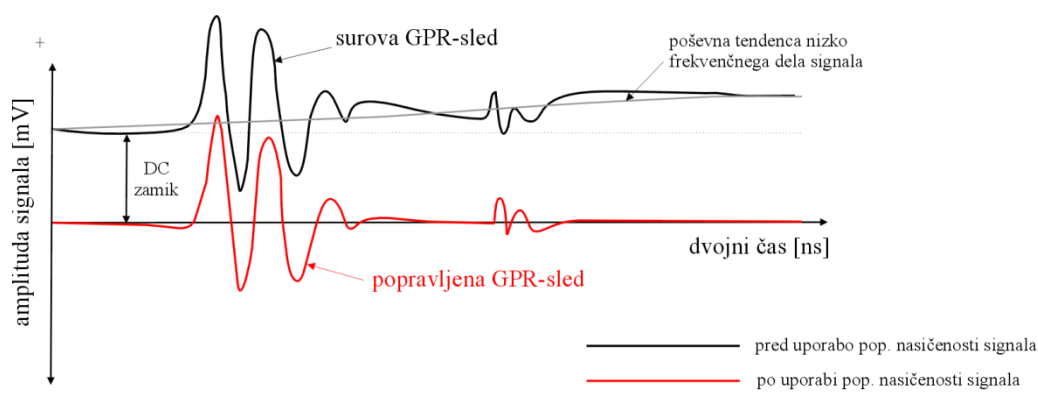
Ob predpostavki, da je položaj premikajočega se georadarja pridobljen z eno od geodetskih metod izmere v realnem času, je treba posamezni profil v fazi urejanja povezati s prostorskim položajem, ki ga predstavlja ločena datoteka. Ročno podajanje položaja posameznega profila pa je potrebno, kadar določamo relativni položaj znotraj ortogonalne mreže (glej razdelek 2.7). Če izvajamo meritve v časovni domeni, kjer se signal proži v enakih časovnih intervalih, je treba podatke popraviti, saj dolžina radargrama zaradi spreminjajoče se hitrosti gibanja ne ustreza dejanski dolžini. Radargram moramo z ustreznimi funkcijami umeriti na znano dolžino v ortogonalni mreži (Jol, 2009). Programski paketi za obdelavo ponujajo več različnih imen opisane funkcije, npr. normalizacijo dolžine (angl. dist. norm ali interpolation).

Pri organizaciji je smiselno posamezne profile organizirati v serije profilov, kjer morajo imeti posamezni profili enakomeren razmik med sledmi in enak časovni prirastek sledi. Zaradi prepegostega sprožanja signalov, zunanjih virov in sistemskih napak se lahko pojavijo odsotne sledi oziroma sledi zaradi šumov. Funkcijo urejanje sledi (angl. trace editing) uporabljamo za upravljanje s sledmi (Jol, 2009). V ortogonalni mreži serijo profilov predstavlja več vzporednih profilov z enakim številom sledi in vzorcev na sledi. Obdelavi podatkov lahko tako podvržemo celotno serijo profilov in ne več posameznih profilov oziroma radargramov. Navadno tvorimo dve seriji med sabo pravokotnih profilov, ki omogočajo tridimenzionalno prikazovanje.

2.8.2 Odstranitev zamika signala

Popravek nasičenosti signala (angl. dewow) je nizkoprepustni filter, delujoč nad vsako sledjo, s katere odstrani oziroma popravi inicialni istosmerni tok (angl. DC – direct current) in/ali poševno tendenco nizkofrekvenčnega dela signala, ki ga povzročata nasičenost signala s prvimi prihodi zračnih in neposrednih valov (glej razdelek 2.5), induktivnega sklapljanja (angl. coupling effect) in/ali tehničnih omejitev instrumenta (angl. instrumentation dynamic range limitations), tako kot to prikazuje slika 23. Filter prestavi oziroma zamakne podatke na nivo osrednje ničle in omogoča uporabo pozitivnih in negativnih amplitud v zaznanih sledeh. Ob nepravilni uporabi filtra bodo podatki podvrženi slabitvam amplitud signala in odmikom nizkofrekvenčnega dela signala (Annan, 2003; Jol, 2009; Sandmeier, 2014; Sensors & Softwares, 2003).

Popravek inicialnega istosmernega toka (angl. DC Shift) je funkcija, ki odstrani DC iz vsake posamezne sledi v radargramu ali seriji radargramov. Uporablja se lahko kot del ali nadomestek popravka nasičenosti signala. Programska oprema navadno ponuja ročno funkcijo DC Shift, ki odstrani enako raven DC iz vsake sledi, medtem ko programska DC avtomatska metoda izračuna in odstrani DC za vsako posamezno sled (Sandmeier, 2014; Sensors & Softwares, 2003).



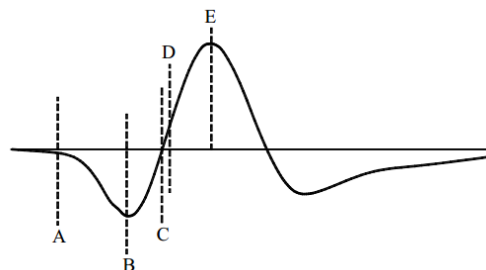
Slika 23: Popravek nasičenosti signala surove georadarske sledi (Jol, 2009).

Figure 23: Dewow filter correction on raw GPR trace (Jol, 2009).

2.8.3 Popravek ničelnega časa

Popravek ničelnega časa (angl. time zero correction) poravnava sledi na skupni ničelni čas. Zamik ničelnega časa se pojavi zaradi inherentnih lastnosti elektronike, ki generira signal, odmika antene od tal in spremembe električnih lastnosti medija, skozi katerega potuje EMV. Ko se antena postavi na površino medija ali blizu nje, EMV spremeni obliko in povzroči zamik časa tudi za več kot nekaj

desetink nanosekund zaradi dielektričnosti materiala v bližini antene. Tudi čas odbojnega signala je obremenjen z zamikom ničelnega časa, ki mora biti določen za vsako delovišče in uporabljeno anteno posebej. Popravek ničelnega časa, kot to prikazuje slika 24, je treba upoštevati pred napredno obdelavo podatkov v smislu boljše opredelitve natančnosti in ponovljivosti določevanja globine ali meritev debelin plasti.



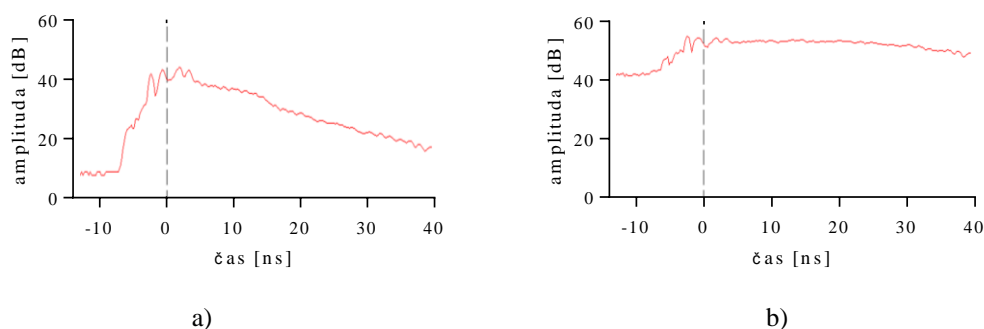
Slika 24: Predlagani položaji določitve ničelnega časa: A) prvi odboj; B) prvi negativni vrh; C) točka ničelne amplitude; D) točka srednje amplitude; E) prvi pozitivni vrh (Yelf in Yelf, 2007).

Figure 24: Proposed determination of time zero correction of GPR users. A) First reflection; B) First negative peak; C) Point of zero amplitude; D) Point of mid-amplitude; E) First positive peak (Yelf and Yelf, 2007).

Natančna nastavitev ničelnega položaja na terenu je težavna. Večina uporabnikov se nagiba k določitvi relativno stabilnega in z lahkoto določljivega položaja (npr. prvi negativni ali prvi pozitivni vrh neposrednega vala) pri poznejši obdelavi (Yelf in Yelf, 2007).

2.8.4 Ojačitev signala

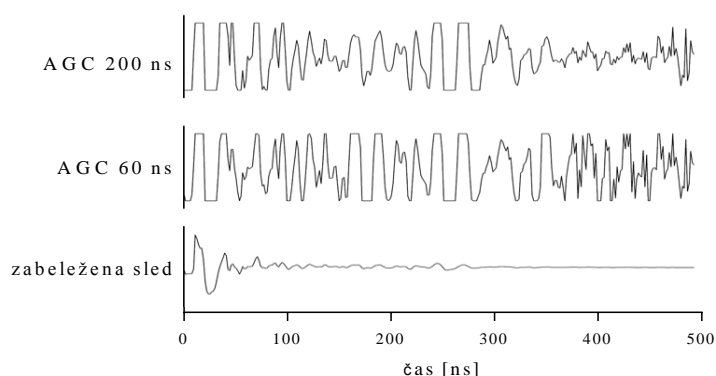
Ojačitve moči signala se uporabljajo za povečanje moči signala vzdolž refleksijskih sledi. Odboji signala oziroma njihove amplitude se na splošno zmanjšujejo z globino, delno zaradi širjenja EMV v obliki eliptičnega stožca, toplotne pretvorbe in dejstva, da nekonsolidirane plitve podpovršinske strukture absorbirajo večjo količino energije EMV kot nižje ležeče kompaktne strukture (Jain, 1986). Annan (2003) predlaga uporabo grafa, pri katerem se primerja upadanje amplitude signala z dvojnimi časom vzdolž refleksijske sledi, pred uporabo funkcije ojačitve signala in po njej. Pred uporabo funkcije amplituda signala z globino pada, medtem ko bi po uporabi faktorja ojačitve morala ostati čim bolj nespremenjena. Faktor ojačitve se v večini programske opreme podaja v enotah decibelov (dB). Slika 25 prikazuje grafa amplitud signala vzdolž refleksijske sledi pred uporabo funkcije ojačitve signala in po njej.



Slika 25: a) Amplituda signala, ki z globino pada; b) Krivulja ampl. signala po ojačitvi (Annan, 2003).
Figure 25: a) Signal amplitude decaying with the depth; b) The gain of a signal curve (Annan, 2003).

Ločiti moramo med ojačitvijo amplitude signala, izvedeno že med samimi georadarskimi meritvami, in naknadno obdelavo oziroma ojačitvijo. Pred naknadno obdelavo moramo zato zagotoviti odstranitev izvedenih »terenskih« ojačitev na posameznih profilih oziroma serijah profilov s pomočjo odstranitvene funkcije »terenskih« ojačitev (angl. remove header gain). S tem pridobimo surove podatke, poenotimo profile in olajšamo nadaljnjo interpretacijo rezultatov.

Poznamo več tipov naknadne ojačitve signala: izenačevanje sledi (angl. trace equalisation), avtomatski ojačitveni popravek (angl. automatic gain correction), sferični in eksponentni ojačitveni popravki (angl. SEC – spherical and exponential compensation) in programabilne ojačitvene funkcije (angl. programmable gain functions) (Sensors & Softwares, 2003). Načelno vsi slonijo na metodi ojačenja signala s pomočjo množitelja oziroma faktorja ojačitve vzdolž sledi v definiranem časovnem intervalu, kar se izraža v enakomerni vrednosti amplitude vzdolž refleksijske sledi. Funkcije ojačitve signala lahko uporabimo na celotnem radargramu v lateralni ali vertikalni smeri. Izenačevanje sledi predstavlja najpreprostejšo metodo. Vse absolutne vrednosti sledi seštejemo in primerjamo z referenčno vrednostjo. Faktor povečanja oziroma množitelja določimo iz razlike med seštevkom in referenčno vrednostjo, ki se uporablja za množenje vseh podatkov. Za določitev množitelja lahko uporabimo tudi povprečno vrednost, mediano, ali najvišjo vrednost sledi. Funkcija SEC temelji na poskusu posnemanja spremembe širjenja amplitude signala v mediju. Leckebusch (2003) priporoča uporabo funkcije SEC pred AGC (angl. automatic gain control), saj slednja izkrivlja relativne amplitude. Graf na sliki 26 prikazuje vpliv AGC-funkcije na sled georadarskega profila. Funkcija AGC temelji na razliki med povprečno amplitudo signala znotraj določenega časovnega intervala in največjo amplitudo signala celotne sledi. Ponavadi uporabljamo dva načina: ročnega, kjer se uporabi ročno nastavljena največja ojačitev nad celotnimi podatki, in dinamičnega, kjer se uporabljajo različne nastavitve ojačitve za posamezne sledi, izračunane na podlagi šuma v okolici. Ob preudarni uporabi lahko funkcija AGC zagotovi odlično radargramsko definicijo lokalnih značilnosti (Annan, 2003; Jol, 2009; Sandmeier, 2014).



Slika 26: Vpliv funkcije AGC na zaznano sled georadarskega profila (Monnier et al., 2009).

Figure 26: Influence of AGC function on recorded trace of GPR profile (Monnier et al., 2009).

2.8.5 Časovni in prostorski filtri

Filtriranje je v splošnem namenjeno odstranitvi šumov, ki jih povzročajo antropogeni dejavniki, uporabljeni sistem, električne lastnosti medija, interference z drugimi napravami, naravne danosti, razgibanost terena, tudi objekti v mediju, ki niso predmet raziskave. Njegov glavni namen je izboljšati prikazovanje in interpretacijo podatkov. Obstaja veliko različnih vrst filtrov, od preprostih pasovnoprepustnih do sofisticiranih transformacijskih filtrov. Za odstranjevanje nizkih ali

visokofrekvenčnih šumov se odlično izkažejo že preprosti filtri, medtem ko so za reševanje specifičnih težav, npr. neželenih lateralnih refleksij, namenjeni kompleksnejši filtri. Vprašljivost uporabe se pokaže, kadar refleksije ciljnih objektov niso dobro izražene in je prisoten močan šum na radargramih. V tem primeru lahko s filtri odstranimo tudi podatke, ki so pomembni za interpretacijo. Filtre načelno uporabljamo pred ojačitvami signalov, manj po ojačitvah (Conyers, 2013; Jol, 2009; Szymczyk, 2013).

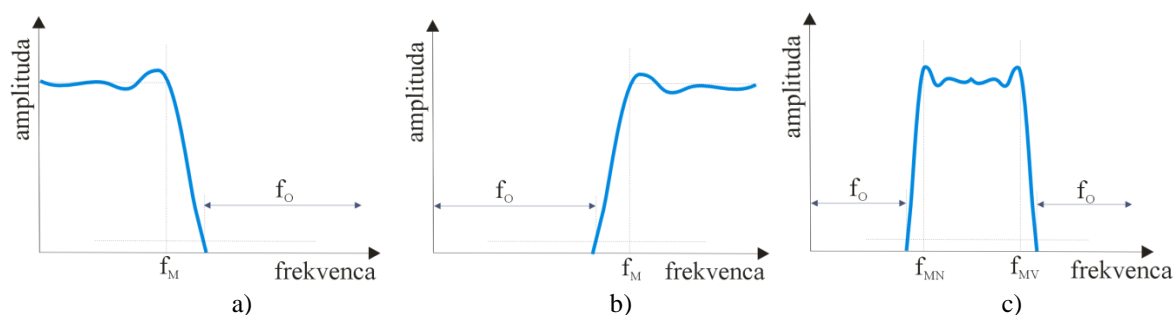
V grobem filtre ločimo na časovne (angl. temporal filters), delujoče vzdolž posamezne sledi v izbranem časovnem intervalu, in prostorske (angl. spatial filters), delujoče prek več sledi hkrati v izbranem intervalu razdalje. Pogosto se časovne in prostorske filtre povezuje v napredne 2D-filtre, ki delujejo hkrati v času in prostoru (Jol, 2009).

Enodimenzionalne časovne filtre, ki lahko delujejo nad vsemi ali samo nad izbranimi sledmi, predstavljajo filtri povprečenja (angl. simple mean filter), ki izračunajo srednjo vrednost nad izbranimi podatki/sledmi v določenem časovnem oknu in jih gladijo. Uporabni so za odstranjevanje visokofrekvenčnega šuma kot posledic interference radijskih frekvenc georadarja z drugimi komunikacijskimi napravami. Slabost omenjenih filtrov je, da ima lahko osamelec (slikovni element, ki ekstremno odstopa od drugih) precejšen vpliv na srednjo vrednost preostalih okoliških slikovnih elementov. Zabrisani robovi so prav tako posledica interpolacije vrednosti slikovnih elementov na robovih. Zaradi naštetih razlogov je bolje uporabiti filtre, ki temeljijo na mediani. Ta razdeli populacijo na dve enaki polovici po številu elementov. Prednost mediane pred aritmetično sredino je, da osamelci manj vplivajo na njeno vrednost. Mediana dejansko predstavlja vrednost slikovnega elementa v bližini. Filter enostavne mediane (angl. simple median filter) izračuna mediano nad izbranimi podatki v določenem časovnem oknu. Frekvenčni filtri delujejo v frekvenčni domeni (ločevanje komponent različnih frekvenc). Temeljijo na diskretni Fourierjevi transformaciji, s katero pretvorimo posnetek v frekvenčni prostor, izberemo del frekvence (pomnožimo s funkcijo filtriranja) in nato naredimo pretvorbo nazaj v prostorsko domeno. Vsi frekvenčni filtri se lahko implementirajo tudi v prostorsko domeno. V osnovi jih delimo na (Jol, 2009; Oštir, 2006; Sandmeier, 2014, in Szymczyk, 2013): nizkoprepustne filtre, viskoprepustne filtre in pasovnoprepustne filtre, kot prikazuje slika 27.

Nizkoprepustne filtre (angl. low-pass filters) uporabljamo za odstranjevanje visokofrekvenčnih šumov. Šum ima večinoma visoke frekvence in se na radargramu kaže v obliki sneženja (angl. snow). Filtru določimo mejno frekvenco, od katere odstrani vse višje frekvence. Z njihovo odstranitvijo radargram načelno zgladimo. Prostorski nizkoprepustni filtri navadno dosegajo enake rezultate kot zaporedni časovni nizkoprepustni filtri.

Viskoprepustne filtre (angl. high-pass filters) uporabljamo za odstranjevanje nizkofrekvenčnih šumov. Filtri delujejo ravno nasprotno kot nizkoprepustni, če matematična operacija glajenja predstavlja povprečenje, je odvajanje matematična operacija ostrenja, kar se kaže v izostrenem in poudarjenem radargramu. Nizkofrekvenčni šumi so posledica naprav ali anten ter razgibanosti površja. Prostorski viskoprepustni filtri navadno dosegajo enake rezultate kot zaporedni časovni viskoprepustni filtri.

Pasovnoprepustne filtre (angl. band-pass filters) uporabljamo za slabenje zelo nizke in zelo visoke frekvence, pri čemer se ohranja srednji razpon frekvence. Filtri so kombinacija filtrov za visoke in nizke frekvence. Pasovnoprepustni filtri izostrijo (slabenje nizkofrekvenčnih šumov), hkrati pa zgladijo (slabenje visokofrekvenčnih šumov).



Slika 27: a) Nizkofrekvenčni filter (f_M – mejna frekvenca, f_O – odstranjene frekvence); b) Visokofrekvenčni filter (f_M – mejna frekvenca, f_O – odstranjene frekvence); c) Pasovnoprepustni filter (f_{MN} – nizka mejna frekvenca, f_{MV} – visoka mejna frekvenca, f_O – odstranjene frekvence).

Figure 27: a) Low-pass filter (f_M – cut-off frequency, f_O – removed frequencies); b) High-pass filter (f_M – cut-off frequency, f_O – removed frequencies); c) Band-pass filter (f_{MN} – low cut-off frequency, f_{MV} – high cut-off frequency, f_O – removed frequencies).

Prostorski filter odstranitve ozadja (angl. background removal filter) izračuna povprečje vseh sledi v izbranem oknu, ki se odšteje od vsake posamezne sledi. Uporabljamo ga za odstranitev šuma ozadja in efektov zvonjenja antene (angl. antenna ringing). Šumi se najpogosteje kažejo kot površinska horizontalna plast v plitvih strukturah in s tem zakrivajo določene informacije.

2D-filtri v osnovi kažejo enake rezultate kot 1D, delujoči v časovni in prostorski domeni. Delimo jih na filtre povprečenja in medianske filtre, delujoče nad izbranimi sledmi v času in prostoru. Ključna prednost filtra (npr. filter f-k) je v dušenju dogodkov v posamezni smeri vpada, ker so transformirani podatki v frekvenčno-valovno domeno pozitivni za eno smer in negativni za drugo smer vpada. S poudarjanjem oziroma ojačenjem ene od strani vpadov zadržimo oziroma izgubimo drugo smer vpadov. Filter je lahko zelo močno orodje za interpretacijo, pri kateri je treba biti zelo previden zaradi pojava novih odbojev v filtriranih podatkih.

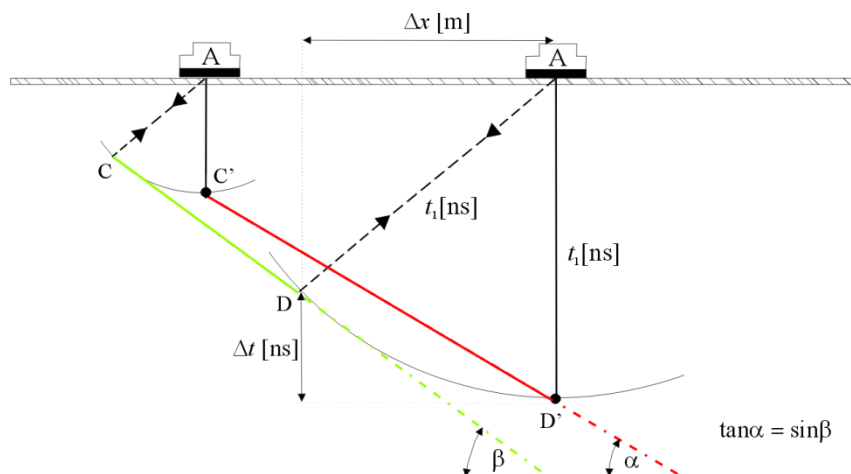
2.8.6 Glajenje signala

Frekvenčna in fazna korekcija ima nalogo okrepiti signal, zmanjšati šum in izboljšati vertikalno ločljivost podatkov. To dosežemo s frekvenčnim pasovnoprepustnim filtriranjem in dekonvolucijo (inverzno filtriranje), s katero zmanjšamo spremenljiv značaj signala in ga čim bolj približamo konici (angl. spike). Dekonvolucija se uporablja tudi za dušenje večkratnih odbojev (Gosar in Ravnik, 2007). Njen namen je odstraniti del signala na radargramu, ki se je v večplastnem mediju ukrivil ter spremenil obliko, in s tem izboljšati vertikalno ločljivost (Schmelzbach in Huber, 2015). Uporablja se za zmanjšanje prekrivanja in izboljšanje ocene natančnosti časa potovanja EMV pri ciljnih objektih, ki so tesno skupaj. Abdel-Qader et al. (2014) navajajo več metod dekonvolucije v povezavi z obdelavo georadarskih podatkov: homomorfna dekonvolucija (angl. homomorphic deconvolution), metoda singularnega razcepa (angl. singular value decomposition), valjčna transformacija (angl. discrete wavelet transform) in dekonvolucija Wiener. Uspešnost uporabe se kaže predvsem v dobro definiranim in manj kompleksnem mediju. Najboljše rezultate daje homomorfna dekonvolucija (Abdel-Qader et al., 2014). Jol (2009) navaja precej omejeno uporabnost dekonvolucije v postopkih obdelave georadarskih podatkov. Omejitve se kažejo, ker algoritem za dekonvolucijo predpostavlja horizontalno plastnost medija, nespremenljivo hitrost znotraj plasti, in da se pri širjenju EMV energija ne izgublja.

2.8.7 Migracija

Migracija je postopek, pri katerem iz radargrama georadarskega profila ničelnega odmika (npr. posnet z monostatično anteno) dobimo migriran radargram, v katerem se izboljša ločljivost in so ciljni objekti v pravem prostorskem položaju. Pri migraciji se refleksijske hiperbole ciljnih objektov na radargramu skrčijo v njihove vrhove oziroma izvorne točke odbojev in s tem dajejo veliko bolj realistične informacije o prostorskem položaju. Popolna migracija vključuje tudi pretvorbo časa v globino oziroma prehod iz časovne v globinsko domeno. Dobro poznavanje porazdelitve hitrosti v mediju je pomembno za njeno realizacijo, čeprav pogosto nastopa kot neznanka in je nimamo na voljo. V praksi se pogostokrat uporablja ocenjena povprečna hitrost na podlagi analize hitrosti (glej razdelek 2.8.9). Zaradi nenatančnih podatkov o hitrosti in lažje primerjave migriranih profilov z nemigriranimi se migracija lahko izvaja v časovni domeni. Časovna migracija je sprejemljiva, če so bočne spremembe hitrosti majhne, v nasprotnem primeru uporabimo globinsko migracijo (Annan, 2003; Gosar in Ravnik, 2007; Sandmeier, 2014).

Koristnost migracij se kaže v izboljšanju ločljivosti radargrama in določevanju zelo dobrih približkov položajev ciljnih objektov (Orlando, 2007). Leckebusch (2003) navaja možnost določevanja hitrosti s pomočjo migracij ob pojavu inverzij hiperbol na radargramu. Jol (2009) opozarja na izjemno pazljivost pri uporabi migracije, kjer se zmanjša amplituda signala in s tem poslabša kakovost odkrivanja ciljnih objektov v mediju. Annan (2003) in Conyers (2013) opozarjata na slabost migracij, ki lahko poudarijo lažne odboje reflektorjev ali celo izkrivljajo refleksije nepravilno, medtem ko Conyers (2013) priporoča analizo in prepoznavanje pomembnih ciljnih elementov s pomočjo hiperbol pred samo migracijo. Uporaba migracijskih algoritmov je manj uspešna pri kompleksnih in heterogenih okoljih (Jol, 2009).



Slika 28: Princip migracije linearnega objekta z naklonom. Linearni objekt (C'D') se v postopku migracije prestavi višje, zmanjša, poveča naklonski kot in prestavi v pravilni prostorski položaj (CD).

Figure 28: Migration principle of sloped linear object. Linear object (C'D'), when migrated, is moved up, dipped, steepened, shortened, and mapped onto its true subsurface location (CD).

Slika 28 prikazuje, ob predpostavki konstantne hitrosti širjenja EMV v mediju, da lahko z migracijo na radargramu vpad oziroma prostorski položaj refleksije linijskega objekta (rdeča daljica C'D') z

naklonskim kotom (α) prestavimo s premikom posameznih refleksij v njihov pravi položaj (zelena daljica CD) s pravi naklonskim kotom (β). Monostatična antena (A) oddaja valovanje v obliki eliptičnega stožca (glej sliko 3), posledično se zaznane refleksije pred anteno evidentirajo točno nad središčno točko antene (črna točka) z identičnim dvojn timerom potovanja signala (t_1). Tako zaznan linijski objekt je na radargramu napačno prostorsko evidentiran v obliki linearne refleksije (rdeča daljica C'D') z napačnim naklonskim kotom (α).

Yilmaz (1987) podaja enačbi, na podlagi katerih je mogoče izračunati lateralni in časovni (globinski) premik posamezne refleksije pri konstantni hitrosti širjenja EMV v mediju:

$$\Delta x = \frac{v^2 t_1 \tan \alpha}{4} \quad (55)$$

$$\Delta t = t_1 \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{v^2 \tan^2 \alpha}{4}} \right\} \quad (56)$$

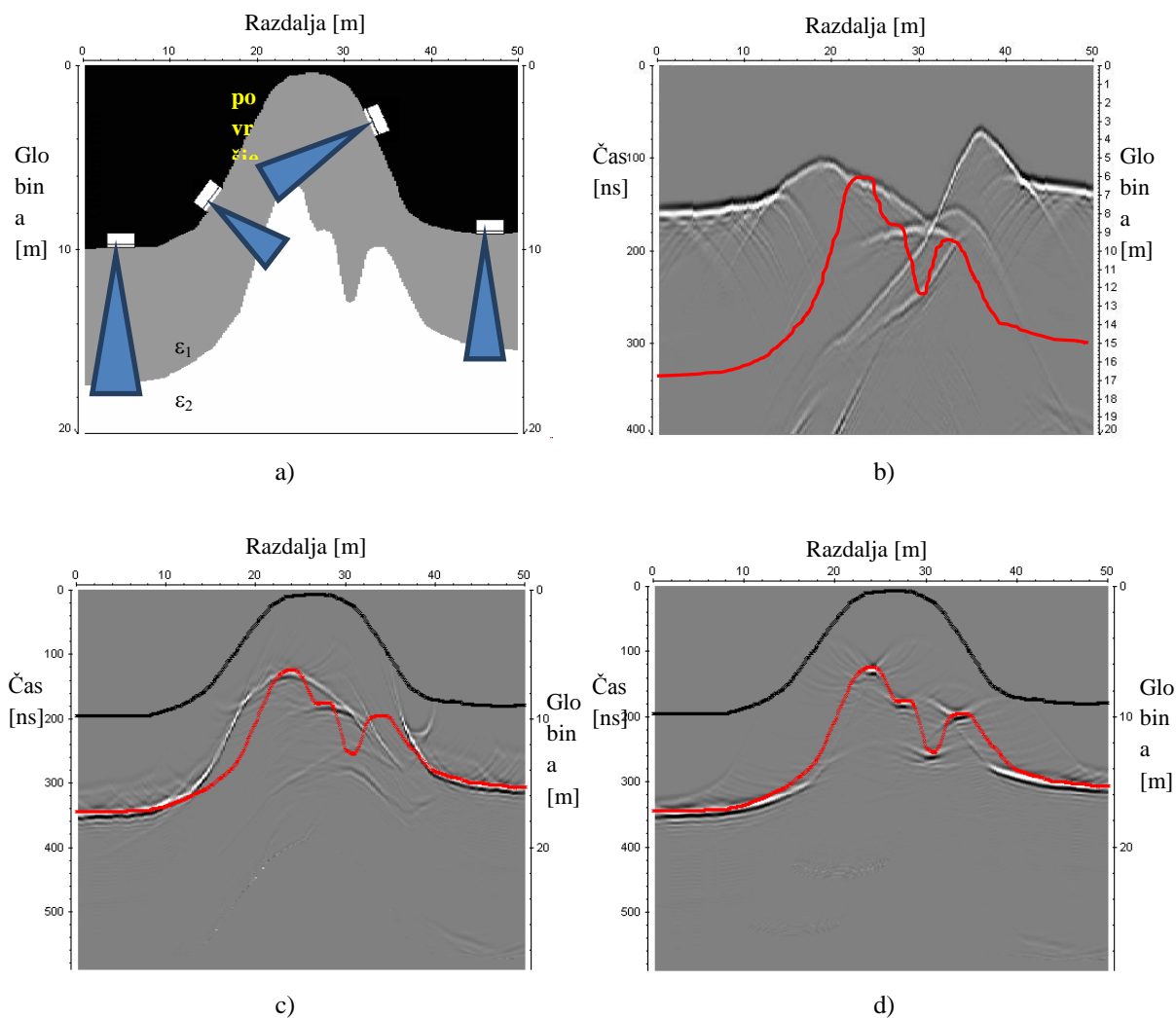
kjer je naklonski kot α izmerjen na nemigriranem radargramu, t_1 dvojni čas potovanja signala do linijskega objekta, v hitrost širjenja EMV v mediju, Δx lateralni premik in Δt časovni oziroma globinski premik posamezne refleksije.

V povezavi z georadarskimi meritvami se omenjajo in uporabljajo časovno obratna migracija, f-k migracija, Kirchhoffova migracija, migracija na osnovi frekvenčne domene, migracije končnih razlik ter 3D-vektorska in topografska migracija (Jol, 2009).

2.8.8 Topografska korekcija

Standardni migracijski algoritmi ne dajejo zadovoljivih rezultatov za georadarske podatke, če se med georadarsko meritvijo gibamo po razgibanem reliefu. Zato na razgibanem terenu s prisotnimi nakloni uporabimo topografsko korekcijo. Ta, pogosto imenovana statična korekcija (angl. static correction), ki ji sledi klasičen migracijski postopek, omogoča postavitve georadarskih podatkov v pravi prostorski položaj (Annan, 2011). Podatke oziroma sledi postavljamo v pravi prostorski položaj s premikanjem dvojnega časa gor ali dol na podlagi znane višinske razlike med sledmi.

Topografsko korekcijo lahko razumemo kot proces povezovanja topografskih in georadarskih podatkov. Topografske podatke predstavlja skupina točk, ki opisujejo relief območja georadarskih meritev. Vsaki točki s pripadajočo višino izračunamo višinsko razliko glede na namišljeno horizontalno ravnino, katere višina je opredeljena z najvišjo višino v celotni skupini točk. Slika 29 prikazuje sintetični radargram (b) kot rezultat močno razgibanega reliefa, nad katerim izvajamo georadarske meritve (a), ter dejansko prostorsko mejo med dvema podpovršinskima plastema z različno relativno dielektričnostjo, označeno z rdečo črto. V nadaljevanju so prikazani rezultati Kirchhoffove migracije s hitrostjo 0,1 m/ns in topografske korekcije sintetičnega radargrama georadarskega profila ničelnega odmika, kjer je rekonstrukcija refleksije slaba (c). Primernejše je izvesti topografsko korekcijo pred migracijskim postopkom, kjer je rekonstrukcija refleksije boljše (d).

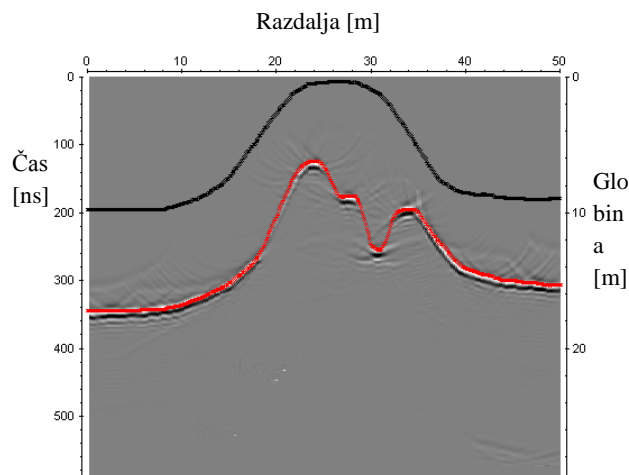


Slika 29: a) Sintetični primer podatkov močno razgibanega reliefa; b) Neobdelan radargram georadarskega profila ničelnega odmika brez topografske korekcije; c) Izvedena Kirchhoffova migracija ter topografska korekcija; d) Izvedena topografska korekcija ter Kirchhoffova migracija (Sandmeier, 2014).

Figure 29: a) Synthetic data example with strong surface topography; b) Raw radargram of zero offset without topographic correction; c) Kirchhof migration and topographic correction; d) Topographic correction and Kirchhof migration (Sandmeier, 2014).

Topografska korekcija in klasični migracijski postopki pri precej razgibanem terenu ne dajejo zadovoljivih rezultatov. Lehmann in Green (2000) opredelujeta rešitev s topografsko migracijo georadarskih podatkov na podlagi Kirchhoffovega algoritma. Smiselnost uporabe migracije navajata pri naklonu, večjem od 10 %. Ključnega pomena učinkovite topografske migracije sta poznavanje položaja in višine georadarja oziroma antene, ki mora biti boljši kot 10 % prevladujoče valovne dolžine v mediju, in ocena hitrosti EMV v mediju, ki ne sme odstopati od dejanske za več kot 10–20 %. Zahtevana položajna in višinska natančnost vhodnih podatkov pri uporabi 400 MHz antene in relativni dielektričnosti $\epsilon_r = 7$ voziščne konstrukcije znaša $\pm 2,8$ cm. McClymont et al. (2008) so metodo uporabili v 3D-načinu na precej razgibani topografiji. V medijih, kjer EMV doseže večje hitrosti, Dujardin in Bano (2013) navajata smiselnost uporabe algoritma topografske migracije tudi pri naklonih reliefa, manjših od 5 %.

Slika 30 prikazuje izvedbo topografske migracije s hitrostjo 0,1 m/ns nad sintetičnim radargramom, opredeljenim na sliki 29. Razvidna je boljša rekonstrukcija refleksije oziroma dober približek dejanski meji med dvema plastema različnih dielektričnosti, označeni z rdečo črto, kot je to v primeru topografske korekcije in Kirchhoffove migracije, prikazane na sliki 29.

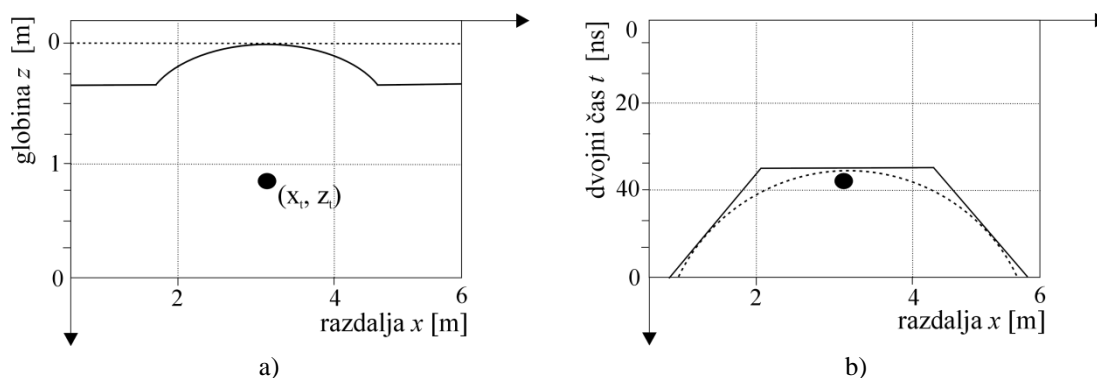


Slika 30: Topografska migracija s hitrostjo 0,1 m/ns nad sint. radargramom iz slike 29b (Sandmeier, 2014).

Figure 30: Topographic migration with velocity of 0,1 m/ns under synt. radargram from figure 29b (Sandmeier, 2014).

2.8.8.1 Topografska migracija

Vzemimo preprost georadarski globinski profil ničelnega odmika (x - z), sestavljen iz refleksijske točke (x_t in z_t), ob predpostavki konstantne hitrosti EMV v mediju. Ob predpostavki premikanja georadarja po ravni horizontalni površini (prekinjena črta na sliki 31) bo rezultat časovnega profila (x - t) refleksijska hiperbola. Rezultat premikanja po topografsko spremenljivi površini (neprekinjena črta) bo popačena refleksijska krivulja. Na sliki 31a je topografija izbrana tako, da ima lok, po katerem se premika georadar, center v refleksijski točki (x_t in z_t). Ob premikanju antene po loku je oddaljenost antene od refleksijske točke konstanta. Rezultat časovnega profila je popačena refleksijska krivulja, ki je ploska na vrhu (neprekinjena črta). Ob uporabi topografske korekcije se refleksijska krivulja preoblikuje v hiperbolo (prekinjena črta).



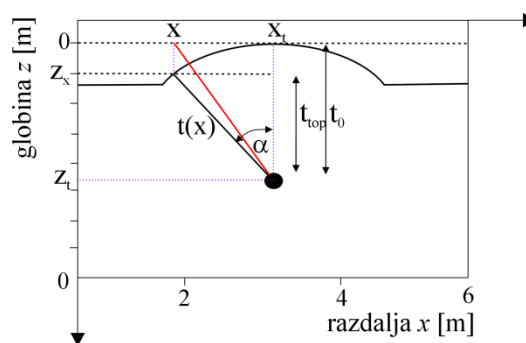
Slika 31: a) Globinski (x - z) profil; b) Časovni (x - t) profil (Dujardin in Bano, 2013).
Figure 31: a) Depth (x - z) profile; b) Time (x - t) profile (Dujardin and Bano, 2013).

V primeru, prikazanem na sliki 31, bo standardna Kirchhoffova migracija brez upoštevanja topografije dala napačen rezultat. Dvojni čas $t(x)$ standardne Kirchhoffove migracije položaja x na ravni datumski ploskvi ($z = 0$) predstavlja rdeča črta na sliki 32, dan z enačbama (Dujardin in Bano, 2013):

$$t(x) = \sqrt{t_0^2 + \frac{4(x - x_t)^2}{v^2}} \quad (57)$$

$$t_0 = \frac{2z_t}{v} \quad (58)$$

kjer je v hitrost EMV v mediju, t_0 dvojni čas potovanja EMV nad refleksijsko točko, x_t horizontalni položaj in z_t globina refleksijske točke.



Slika 32: Prikaz topografske korekcije. Dvojni čas EMV $t(x)$, izračunan na topografski (z_x) in ravni datumski ploskvi (z_0) (Dujardin in Bano, 2013).

Figure 32: Schematic topographic correction. Double time of EMW $t(x)$ calculated on topographic (z_x) and flat date plane (z_0) (Dujardin and Bano, 2013).

Za pridobitev pravilnega dvojnega časa in globine horizontalnega položaja x moramo upoštevati topografsko korekcijo. Dvojni čas je dan z enačbama (Dujardin in Bano, 2013):

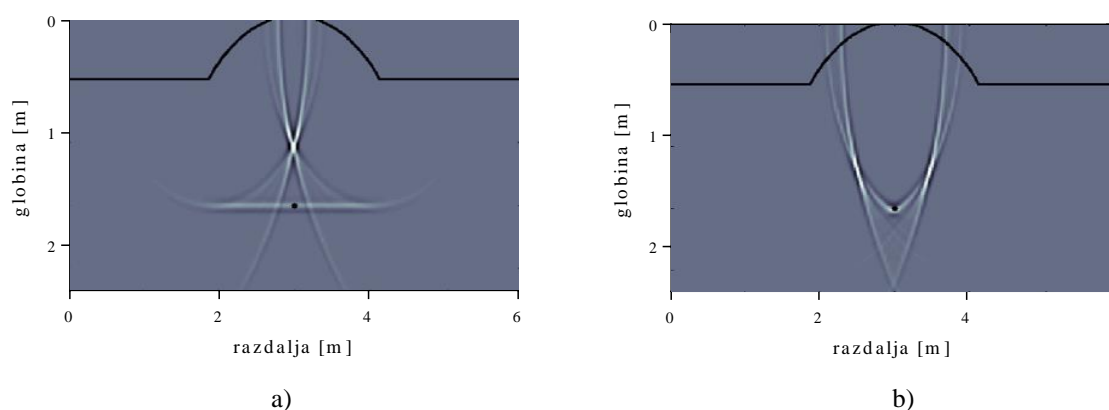
$$t(x) = \sqrt{t_{iop}^2 + \frac{4(x - x_d)^2}{v^2}} \quad (59)$$

$$t_{iop} = t_0 - \frac{2(z(x) - z_0)}{v} \quad (60)$$

kjer je $z(x)$ višina topografske ploskve (neprekinjena črta na sliki 32). Enačbo za 2D-topografsko migracijo, ki jo podajajo Lehmann et al. (1998), zdaj izpeljemo, dana je z:

$$t(x) = \sqrt{t_0^2 + 4 \frac{(x - x_0)^2 (z(x) - z_0)^2}{v^2} - 4 \frac{t_0 (z(x) - z_0)}{v}} \quad (61)$$

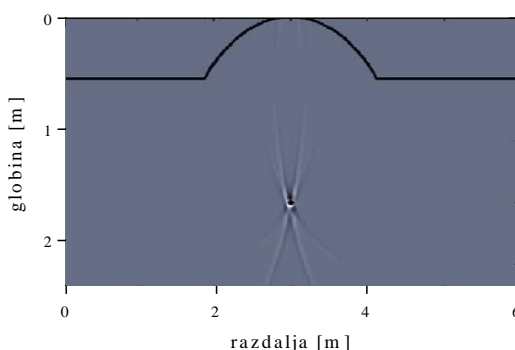
Slika 33 prikazuje primerjavo rezultatov standardne Kirchhoffove migracije brez upoštevanja in z upoštevanjem topografske korekcije. Vizualizacija primerjave je narejena na sintetičnih radargramih v homogenem mediju s hitrostjo 0,1 m/ns pri uporabi 500 MHz antene (Dujardin in Bano, 2013).



Slika 33: a) Standardna Kirchhoffova migracija brez upoštevanja topografske korekcije; b) Standardna Kirchhoffova migracija z upoštevano topografsko korekcijo (Dujardin in Bano, 2013).

Figure 33: a) Standard Kirchhoff migration without topographic correction; b) Standard Kirchhoff migration with topographic correction (Dujardin and Bano, 2013).

Pri izvedbi migracije je smiselno utežiti amplitude refleksijskih sledi s kotnim amplitudnim faktorjem (angl. directivity factor). Kotni amplitudni faktor je upoštevan zaradi kotne odvisnosti amplitude, ki ga definirata smer širjenja EMV in vertikalna os. Kotni amplitudni faktor je podan s kosinusom kota med smerjo širjenja EMV in vertikalno osjo (Yilmaz, 1987). Slika 34 prikazuje rezultate Kirchhoffove topografske migracije, ustrezno utežene s kotnim amplitudnim faktorjem $\cos(\alpha) = t_{top}/t_{(x)}$.



Slika 34: Sintetični radargram uporabe topografske migracije v homogenem mediju s hitrostjo 0,1 m/ns pri uporabi 500 MHz antene (Dujardin in Bano, 2013).

Figure 34: Synthetic radargram of topographic migration in homogeneous medium with a velocity of 0.1 m/ns using 500 MHz antenna (Dujardin and Bano, 2013).

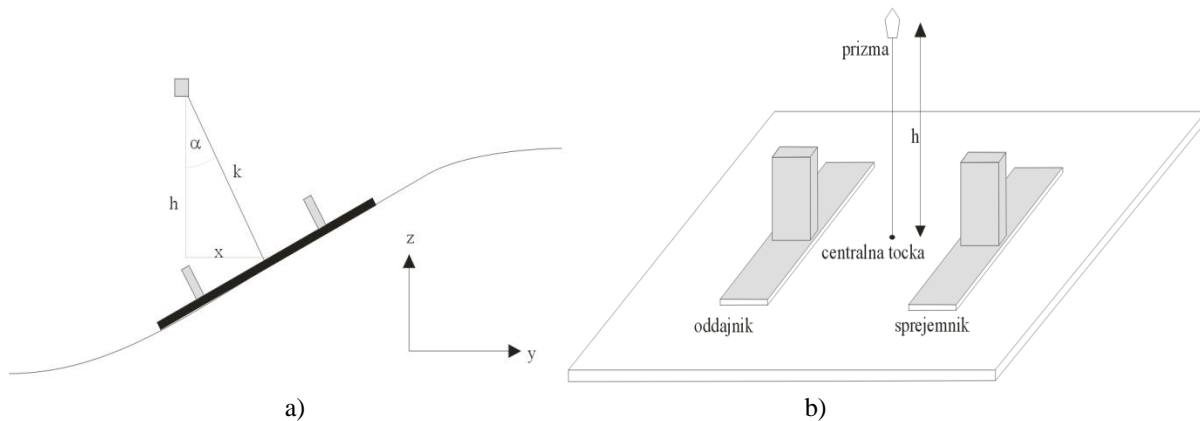
2.8.8.2 Položajna in višinska korekcija zaradi višine reflektorja

Pred izvedbo topografske korekcije ali Kirchhoffove topografske migracije je ob večjih nagibih treba opazovanja s terestrično metodo izmere popraviti za pogrešek nevertikalnosti reflektorja, ki nastopi zaradi razgibanega terena. Terestrična metoda temelji na določanju položaja s sočasnim merjenjem horizontalnega kota, zenitne razdalje in poševne dolžine (glej razdelek 4.2.2). Na georadar s pomočjo nosilca pritrdimo reflektor nad središčno točko (glej sliko 35b). Ob poznavanju položaja in višine reflektorja je poznavanje naklona nosilca (georadarja) ključnega pomena pri določevanju koordinat središčne točke georadarja. Pogrešek nevertikalnosti reflektorja precej vpliva na končne rezultate pri

večjih naklonih. Ob naklonu 1,7 % in višini reflektorja $k = 40$ cm znaša odklon reflektorja od središčne točke 0,7 cm po x-osi in 0,6 mm po višini (glej sliko 35a).

Izračun položaja in višine centralne točke antene opravimo s pomočjo merjenih koordinat reflektorja ob upoštevanju nagiba nosilca reflektorja. Ob premikanju georadarja nad tlemi položaj reflektorja oziroma trajektorije, ki jih opiše reflektor, predstavljajo spremembo v reliefu terena (topografije), nad katerim izvajamo meritve. Ploskev, po kateri se gibamo, lahko zapišemo s funkcijo dveh spremenljivk $f(x, y)$. Geometrično si graf funkcije dveh spremenljivk predstavljamo kot ploskev v prostoru.

Če graf prerežemo z ravnino $x = x_0$ ali $y = y_0$, dobimo krivuljo, ki ustreza grafom $y \rightarrow f(x_0, y)$ oziroma $x \rightarrow f(x, y_0)$. Če te krivulje zložimo skupaj, dobimo ploskev, ki predstavlja graf funkcije dveh spremenljivk. Ob poznavanju ploskve v prostoru, definirane s trajektorijami reflektorja oziroma dane s polinomom dveh spremenljivk drugega reda $f(x, y)$, ki se po metodi najmanjših kvadratov popravkov najbolje ujema s položajem reflektorja, lahko izračunamo položaj središčne točke (Lehman in Green, 1999).



Slika 35: a) Nagib georadarja ob meritvi in odklon od središčne točke; b) Namestitvev reflektorja nad središčno točko georadarja (Lehman in Green, 1999).

Figure 35: a) GPR inclination at measurement and deviation (no longer vertically above) from the midpoint point; b) Target prism fixed to a mast above the midpoint point of GPR antenna (Lehman in Green, 1999).

$$F(x, y) = a_1x^2 + a_2x + a_3y^2 + a_4y + a_5xy + a_6 \quad (62)$$

Naklona funkcije sta:

$$\frac{\partial F(x, y)}{\partial x} = 2a_1x + a_2 + a_5y \quad (63)$$

$$\frac{\partial F(x, y)}{\partial y} = 2a_3y + a_4 + a_5x \quad (64)$$

Pristop sta Lehman in Green (1999) testirala s 3D-simulacijo modela površine, danega z enačbo:

$$Z = 3(1-x)^2 \cdot e^{-(x^2+(y+1)^2)} - 10\left(\frac{x}{5} - x^3 - y^5\right) \cdot e^{-(x^2+y^2)} - \frac{1}{3}e^{-((x+1)^2+y^2)} \quad (65)$$

Lehman in Green (1999) navajata absolutni pogrešek izračuna položaja in višine centralne točke po enačbah (63) in (64) ob običajni hitrosti premikanja georadarja (1 m/s) in predpostavki vsaj 10-metrске oddaljenosti elektronskega tahimetra, manjšega od 0,04 m (0,01 m kot posledica naklona reflektorja z nosilcem). Pri izredno majhnih naklonih v bazenskih in urbanih testnih okoljih smo zavestno izpustili korekcijo višine reflektorja.

2.8.9 Globina ciljnega objekta

Georadarski profili v časovni domeni nam ne podajajo dejanske globine odbojev od ciljnih objektov. Da lahko čase valovanja do ciljnih objektov pretvorimo v globino, je nujno poznavanje relativne dielektričnosti ali povprečne hitrosti EMV v mediju. Relativna dielektričnost se v mediju, skozi katerega potuje EMV, lahko spreminja horizontalno ali vertikalno. Najzanesljivejša je laboratorijska analiza relativne dielektričnosti vsakega posameznega materiala znotraj medija, kar je lahko zelo zamudno v smislu števila posegov v medij (vrtine), globine posega in števila vzorcev vzdolž georadarskega profila.

Podlago za določitev približka hitrosti EMV lahko predstavlja ujemanje oblike hiperbol, ki nastopijo pri odbojih od ciljnih objektov s krivuljo hitrostne hiperbolične funkcije (angl. hyperbolic velocity analysis). Pogoji so dobro izražene refleksijske hiperbole ciljnih objektov na radargramu (Jol, 2009).

Hitrosti valovanja lahko merimo tudi z dvema neposrednima metodama, in sicer širokokotno (angl. wide angle – WA) in metodo skupne središčne točke (angl. common mid-point – CMP). WA-metoda temelji na statični in premikajoči se anteni vzdolž georadarskega profila, medtem ko se pri CMP-metodi razdalja med obema antenama sistematično povečuje v obe smeri, pri čemer se ohranja točka odboja signalov v središčni točki. Hitrost EMV vzdolž profila tako določimo na podlagi sprememb dvojnih časov (Tillard in Dubois, 1995; Onishi et al., 2005).

Pogoj za relevantno določitev približka hitrosti in posledično globine po direktnih metodah in metodi ujemanja oblike hiperbole je opravljena obdelava georadarskih opazovanj in topografska korekcija. Jol (2009) ocenjuje odstopanje približka hitrosti $\pm 10\%$ ali več od prave vrednosti, kar ima neposredni vpliv na natančnost določevanja globine.

V praksi se pogosto ocenjuje približek hitrosti na podlagi posamezne globine referenčnega ciljnega objekta ali znane debeline plasti znotraj voziščne konstrukcije, ki služi kot referenčna globina. Pogoj je izvedena migracija, katere rezultat so izvorne točke odbojev. Ob poznavanju globine referenčnih izvornih točk odbojev lahko ocenimo popravek približka hitrosti, uporabljenega pri migraciji.

2.8.10 Dimenzija ciljnega objekta

Pasolli et al. (2009) navajajo, da večina raziskovalcev odkriva podzemno infrastrukturo v smislu njenega položaja in globine, medtem ko je zelo malo raziskav o določevanju njenih dimenzij. Pri določevanju odbojev v obliki hiperbol je treba biti pozoren na velikost iskanega zunanega premera cevi ali voda v mediju in ločljivost uporabljene antene (glej razdelek 2.6.2). Če je premer manjši od ločljivosti antene, je določevanje oteženo. Horizontalne ločljivosti se ne sme enačiti z zmožnostjo prepoznavanja reflektorjev, ker se reflektorji, ki so manjši od Fresnelove cone, na radargramu vseeno pojavijo kot refleksijski vzorci. Večji premeri ciljnih objektov povzročajo svetlejše refleksije.

Avtomatska analiza na splošno vključuje pridobivanje več značilnosti, povezanih s podzemnimi objekti, ki jih Pasolli et al. (2009) delijo v štiri osnovna področja. Prostorsko prepoznavanje oziroma odkrivanje, določevanje oblike, določevanje velikosti in določevanje materiala. Večinoma je raziskovalna dejavnost osredotočena na področje odkrivanja objektov, medtem ko druga vprašanja ostajajo odprta. Pasolli et al. (2009) navajajo 62 % uspešnost prepoznavanja ciljnih objektov na sintetičnih radargramih. Uspešnost samodejnega prostorskega prepoznavanja v realnem okolju je močno podvržena kakovosti radargrama in je v nasprotju s sintetičnimi radargrami precej slabša. Uspešnost je odvisna od centralne frekvence, vertikalne in horizontalne ločljivosti, prisotnosti šuma ter kakovosti refleksij ciljnih objektov. Pogosto se zaradi lastnosti ciljnih objektov in naravnih okoliščin v smislu sprememb lastnosti podpovršja ter posledično sprememb relativne dielektričnosti zgodi, da so refleksije prekinjene, delne ali nepopolne, kjer avtomatsko prepoznavanje ne daje zadovoljivih rezultatov.

Prvo predpostavko določevanja premerov ciljnih objektov sta podala Stolte in Nick (1994). Avtorja podajata funkcijsko odvisnost med polmerom in ekscentričnostjo refleksijske hiperbole. Shihab et al. (2004) dokažejo, da je ekscentričnost hiperbole samo funkcija hitrosti širjenja EMV v mediju. V osnovi se lahko pri določanju premera cilindričnih ciljnih objektov uporabi direktna metoda, ki temelji na matematičnih osnovah ali uporabi metode prilagajanja oziroma ujemanja hiperbol (angl. hyperbola fitting) in naknadnega določevanja premera na njihovih osnovah (He et al., 2009).

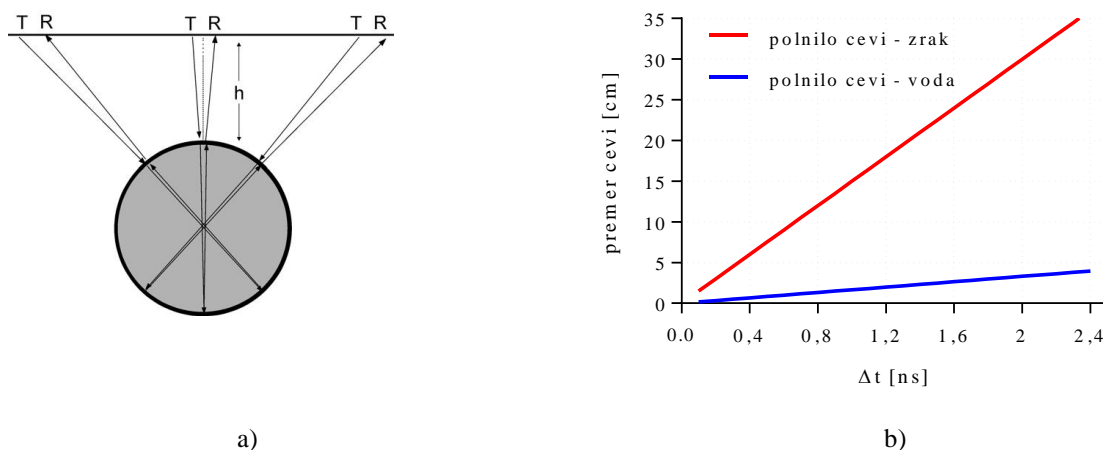
Ujemanje hiperbol je omogočeno ob predhodnem prostorskem odkrivanju hiperbol na radargramu (angl. hyperbola classification) (Shahbaz-Khan, 2011). Literatura navaja različne samodejne metode in algoritme določevanja dimenzij, ki uporabljajo tehnike umetnih nevronske mreže (Shaw et al., 2003) objektne klasifikacije refleksijskih hiperbol iz radargramov ob predhodni avtomatski segmentaciji, npr. pri določevanju praga (angl. thresholding techniques). Tehnike ujemanja v grobem delimo na Houghove transformacije (Windsor et al., 2005), polinomske metode (Olhoeft, 2000; Shihab, 2005) ter modificirano neposredno tehniko ujemanja najmanjših kvadratov (Fitzgibbon et al., 1999), pri kateri se izračunata polmera refleksijskih hiperbol. Windsor et al. (2005) navajajo pri uporabi generalizirane Houghove transformacije pri uporabi 600 MHz antene in globini betonske cevi (DN/OD 180) 1 m, rezultat premera cevi $0,174 \text{ m} \pm 0,059 \text{ m}$.

Za raziskavo sta pomembni dve metodi ocene dimenzije cilindričnega objekta (Sandmeier, 2015). Prva temelji na hitrosti širjenja EMV v cevi in je odvisna od poznavanja elektromagnetnih lastnosti polnila cevi (Annan, 2003). Druga temelji na obliki in velikosti prilagojene refleksijske hiperbole (angl. hyperbola fitting). Prva metoda temelji na predpostavki odvisnosti refleksije točkastega objekta oziroma v našem primeru cilindričnega ciljnega objekta od polnila in ne samo od sestave cevi. Določevanje dvojnega časa potovanja EMV v cevi je podvrženo predpostavki, da so odboji od dna cevi zakasnjeni glede na teme oziroma obod. Na radargramu je v praksi mogoče pogosto zaznati refleksije vrha in dna plastične cevi, napolnjene z vodo ali drugim polnilom. Ko EMV prečka cev, se ga del odbije od običajne točke na obodu cevi, preostali del pa nadaljuje pot diagonalno do notranje stene cevi, kjer se ga del znova odbije. Valovi, ki predstavljajo refleksije vrha in dna cevi in vedno prečkajo center cevi, so prikazani na sliki 36a. Časovna razlika časa potovanja EMV med vrhom in dnom cevi je premer, ki je dan z enačbo:

$$\Delta t = \frac{2R}{v_p} \quad (66)$$

$$R = \frac{v_p \Delta t}{2} \quad (67)$$

kjer je Δt dvojni čas potovanja EMV v polnilu cevi, v_p hitrost EMV v polnilu in R premer cevi. Na sliki 36b je prikazana korelacija časa potovanja EMV in premera cevi pri različnih polnilih cevi.



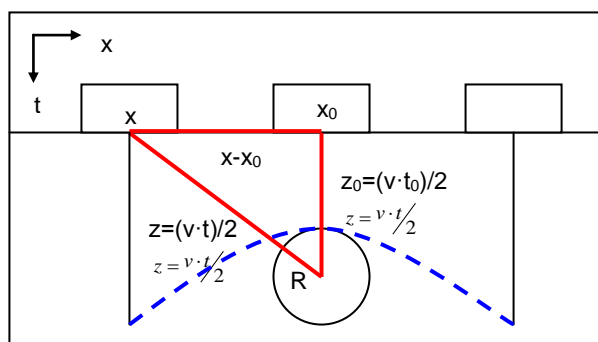
Slika 36: a) Refleksija vrha in dna cevi, kjer je h – globina, T – točka oddaje valovanja in R – točka sprejema (Annan, 2003); b) Korelacija časa potovanja EMV in premera cevi pri različnih polnilih.

Figure 36: a) Reflection of the pipe top and bottom, where there are: h – depth, T – starting point of transmitted energy and R – end point of received energy (Annan, 2003); b) Presentation of travel time versus pipe diameter relation in case of different fillers.

Refleksije cilindričnih ciljnih objektov, kot so cevi in vodi v obliki refleksijskih hiperbol, je smiselno podati v odvisnosti od geometrijske oblike ciljnega objekta. S tem lahko oblike hiperbol podajajo relevantne podatke o geometrijski obliki cilindričnih ciljnih objektov. Ob predpostavki, da ima cilindrični objekt zunanji premer R , je Shihab (2005) podal zvezo z enačbo:

$$(z_i + R)^2 = (z_0 + R)^2 + (x_i + x_0)^2 \quad (68)$$

kjer je z_i razdalja antene v položaju x_i do temena cilindričnega objekta, z_0 razdalja antene do temena v trenutku, ko je center antene točno nad cevjo x_0 , in R zunanji premer cilindričnega objekta, kot to prikazuje slika 37.



Slika 37: Odvisnost premera cilindričnega objekta od geometrije refleksijske hiperbole.
Figure 37: Cylindrical object radius and hyperbola geometry dependence.

Z zamenjavo $z_i = (vt)/2$ in $z_0 = (vt_0)/2$ v enačbi 68 dobimo enačbo refleksijske hiperbole v odvisnosti od premera ciljnega objekta (cevi, voda) z izhodiščem v $(x_0, -2R/v)$.

$$\left(\frac{t + \frac{2R}{v}}{t_0 + \frac{2R}{v}} \right)^2 - \left(\frac{x - x_0}{\frac{v}{2}t_0 + R} \right)^2 = 1 \quad (69)$$

kjer sta t_0 in t_i dvojna časa potovanja EMV od antene do ciljnega objekta ob položaju antene x_0 in x_i ter v hitrost širjenja EMV v mediju.

Polosi hiperbole lahko zdaj zapišemo kot:

$$a = t_0 + \frac{2R}{v} \quad (70)$$

$$b = \frac{v}{2}t_0 + R = \frac{v}{2}a \quad (71)$$

iz katerih izpeljemo enačbo polmera cilindričnega objekta:

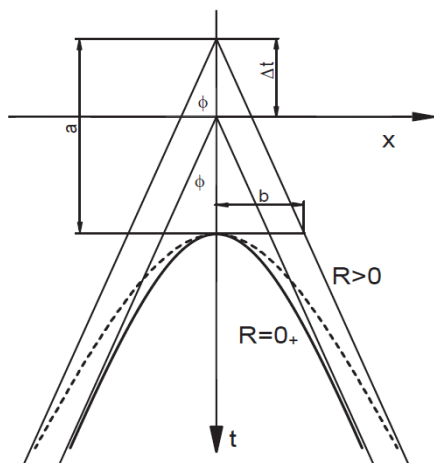
$$R = \frac{v}{2}(a - t_0) \quad (72)$$

$$R = b - \frac{v}{2}t_0 \quad (73)$$

Kot med asimptotama hiperbole lahko z uporabo enačb 71 in 72 podamo:

$$\Phi = \frac{b}{a} = \frac{v}{2} \quad (74)$$

Iz enačbe 73 izhaja neposredna sorazmernost kota Φ s hitrostjo širjenja EMV v mediju. S povečevanjem hitrosti se povečuje tudi kot med asimptotama pri konstantnem polmeru cilindričnega objekta. V skladu z zgoraj navedenim dejstvom je pri georadarskih meritvah pod istimi pogoji oziroma identičnimi fizikalnimi lastnostmi medija, cilindričnih objektov končnih premerov in točkovnih objektov ($R \approx 0_+$) kot med asimptotama hiperbol identičen (Ristič et al., 2009). Posledično lahko na radargramih, kjer predpostavljamo enako hitrost širjenja EMV, uporabimo refleksije točkovnih objektov ali cilindričnih objektov manjših dimenzij kot ničelne referenčne hiperbole (angl. zero fitting hyperbola). Referenčnim hiperbolam v nadaljevanju spreminjamo vrednosti polmerov in ugotavljamo skladnost/ujemanje z refleksijami na radargramu (glej sliko 38).



Slika 38: Vpliv polmera ciljnega objekta na kot med asimptotama hiperbole. Z neprekinjeno črto je prikazana referenčna hiperbola, s prekinjeno pa hiperbola pri danem polmeru točkovnega ali cilindričnega objekta (Ristič et al., 2009).

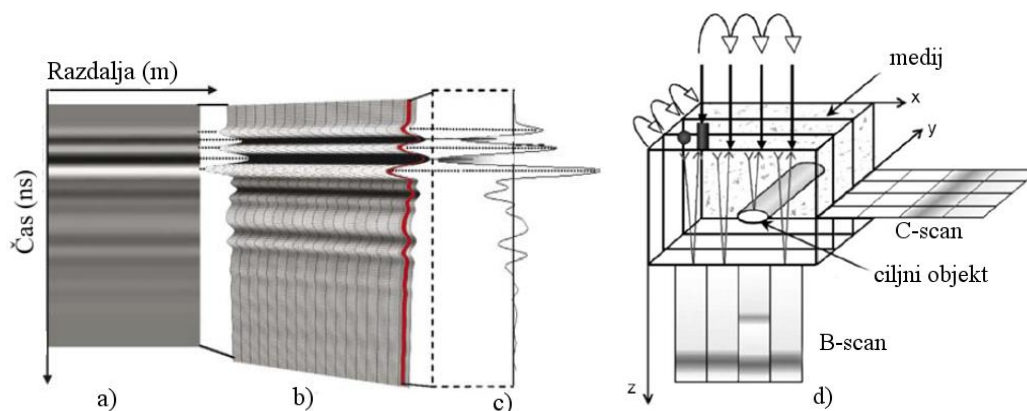
Figure 38: The influence target object radius on the angle between the asymptotes of hyperbola. Reference hyperbola is presented as the solid line, while the broken line shows a hyperbola at given radius of point or cylindrical object (Ristič et. al., 2009).

2.8.11 Povezovanje postopkov obdelav v modele

Standardne postopke obdelave, ki združujejo različne faze v modele za samodejno prepoznavanje ciljnih objektov, so v zadnjih letih skušali opredeliti nekateri avtorji (Bristow in Jol, 2003; Handayani, 2015; Jol, 2009; Szymczyk in Szymczyk, 2013; Yilmaz, 2001). V modelih se prepletajo postopki za uravnavanje dolžine časovnih rezov, števila sledi vzdolž rezov in korekcije položaja. Sledijo odpravljanje šumov, ki so posledica tehničnih konstrukcijskih posebnosti anten in številnih vplivov iz okolja, ustrezni načini ojačitve signala v pogojih izrazitega dušenja signala, izbiranje lokalnih vrhov v izbranem območju amplitud ter izbiranje predmetov in algoritmov za migracijo. Pri določevanju dimenzij ciljnih objektov iz posamičnih radarskih prerezov se v model povezujejo tudi migracije in Hilbertove transformacije.

2.9 Grafično prikazovanje rezultatov

Načini grafičnega prikazovanja rezultatov georadarskih opazovanj so: grafični prikaz refleksijske sledi (angl. A-scan), radargram georadarskega profila (angl. B-scan) in grafični prikaz prereza (angl. C-scan). Točkovna refleksijska sled je opredeljena kot krivulja spreminjanja amplitude odboja signala v odvisnosti od časa. Vse zbrane točkovne refleksijske sledi vzdolž enega georadarskega profila imenujemo radargram georadarskega profila. Radargram predstavlja 2D-grafično predstavitev časovne odvisnosti amplitude odbitega valovanja. Grafični prikaz prereza oziroma prerezi preiskovane prostornine predstavljajo 2D-prerez na določeni globini preiskovanega medija (Kohl et al., 2005).



Slika 39: Načini grafičnega prikazovanja rezultatov georadarskih opazovanj: a) Radargram georadarskega profila (B-scan); b) 3D-prikaz refleksijskih sledi; c) Posamezna refleksijska sled (A-scan); d) Prerez preiskovane prostornine (B-scan) in (C-scan) (Kohl et al., 2005; Lester in Bernold, 2007).

Figure 39: Graphic methods of GPR display: a) Radargram of GPR profile (B-scan); b) 3D display of reflection trace; c) Individual reflection trace (A-scan); d) Section of observed volume (B-scan) and (C-scan) (Kohl et al., 2005; Lester in Bernold, 2007).

Najbolj razširjen način prikazovanja rezultatov je s t. i. časovnimi preseki (angl. time slices) (Gosar in Ravnik, 2007). Ustvarjamo jih iz serije vzporednih in večinoma enako oddaljenih radarskih prereзов. Priporočljiva razdalja med prerezi, kjer je relativno malo spreminjanja smeri, je od 0,5 do 1 m, le izjemoma več, če tega ne dopuščajo okoliščine na terenu (Jol, 2009). Rezultat časovnih presekov je diagram enakih amplitud odbojev v istem časovnem območju povratnih valov, ki lahko predstavljajo serije »tlorisov« na izbranih globinah (glej sliko 39d; C-scan).

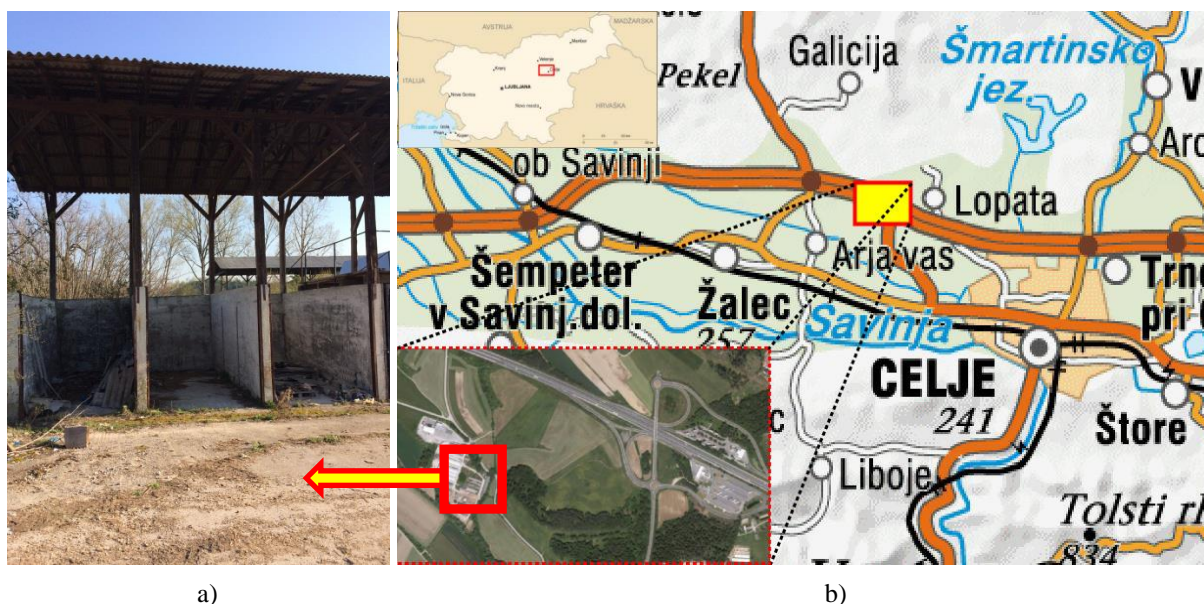
Za prikazovanje rezultatov se pogosto uporabljajo prerezi preiskovane prostornine tal v poljubnih smereh, s čimer dobimo natančen vpogled v prostorske odnose posameznih elementov. Ta postopek je še posebno dobrodošel za interaktivno interpretacijo v 3D-okolju. Meats (1996) je z uvedbo postopka migracije, ki v veliki meri zmanjša subjektivnost interpretacije rezultatov georadarske raziskave, naredil prvi odločnejši korak k 3D-prikazu georadarskih rezultatov.

Modul 3D-interpretacije podatkov omogočajo številne programske rešitve za obdelavo georadarskih opazovanj. 3D-moduli vključujejo prikazovanje prereзов v treh pravokotnih ravninah x, y ali z ali interaktivno pomikanje po izbrani ravnini. 3D-način prikazovanja rezultatov nam omogoča interaktivno interpretacijo radarskih odbojev. Prednost tega načina je vpogled v amplitude radarskih odbojev s sočasnim opazovanjem presekov radarskih odbojev v treh pravokotnih ravninah, kar omogoča natančno sklepanje o obliki in prostorskih razsežnostih ciljnih objektov (Mušič, 2008; Sandmeier, 2014).

3 TESTNI BAZENI

Cilj konstrukcije in gradnje testnih bazenov je pri natančno nadzorovanih spremenljivkah relativne dielektričnosti, vlage, položaja, premera in globine ciljnih objektov ugotovljati odzivnost vseh pogosto uporabljenih vrst podzemne GI v Sloveniji. Veliko število nenadzorovanih spremenljivk v realnem okolju namreč onemogoča ustvarjanje modela oziroma zaporedja postopkov obdelave georadarskih signalov za učinkovito in zanesljivo prepoznavanje posameznih elementov podzemne GI.

Testni bazeni so v okolju z raznolikimi naravnimi danostmi v Zalogu pri Celju in so lahko dostopni. Uporabili smo opuščene betonske silose z nadstreškom, kot to prikazuje slika 40. Položaj testnih bazenov je omogočal, da je bilo mogoče določiti značilnosti, pomembne za GPR-opazovanja, kot so: velikosti ciljnih objektov, globine, v katerih so, in dielektričnosti različnih materialov v preiskovanem mediju. Konstrukcijsko so bazeni omogočali navoz materiala oziroma medija pri gradnji voziščnih konstrukcij cest in hodnika za pešce, s katerimi so simulirana dejanska okolja podzemne GI.



Slika 40: a) Opuščeni betonski silosi z nadstreškom, uporabljeni za testne bazene; b) Karte z označenimi položaji testnih bazenov v Zalogu pri Celju.

Figure 40: a) Abandoned covered silos used for testing pool; b) The location of testing pools in Zaloga near Celje marked on the map.

3.1 Načrtovanje testnih bazenov

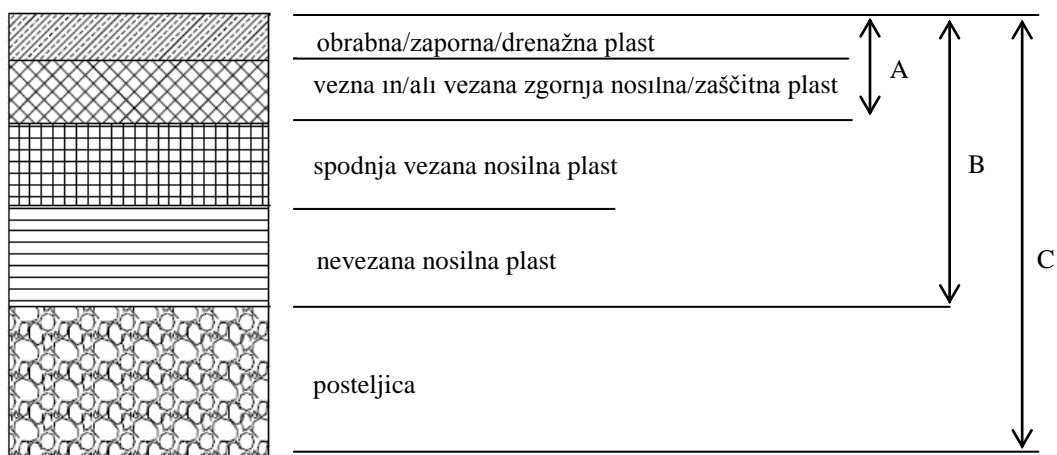
Največ GI je pod javnimi površinami, kot so regionalne in lokalne ceste ter hodniki za pešce. Za prepoznavanje vgrajene GI pod omenjenimi javnimi površinami so za preverjanje postavljene hipoteze v tej doktorski disertaciji vzpostavljeni trije testni bazeni, s katerimi smo se želeli približati voziščnim konstrukcijam regionalnih in lokalnih cest ter pločnikov.

Uredba o merilih za kategorizacijo javnih cest določa razdelitev cest glede na funkcionalno in prostorsko klasifikacijo (TSC 03.200, 2003). Državne ceste se kategorizirajo na avtoceste, hitre ceste, glavne ceste I. reda, glavne ceste II. reda, regionalne ceste I. reda, regionalne ceste II. reda, regionalne

ceste III. reda in kolesarske poti, ki jih pri nas upravlja država. Ceste v upravljanju občin se kategorizirajo na lokalne ceste in javne ceste, kolesarske poti pa v javne poti za kolesarje.

Regionalne ceste (RC) so namenjene vsem vrstam cestnega prometa in imajo dvo- ali večpasovno vozišče. Po 14. členu Zakona o javnih cestah jih delimo na: regionalne ceste I. reda (R1), regionalne ceste II. reda (R2) in regionalne ceste III. reda (R3). Lokalne ceste (LC) so namenjene mešanemu prometu in imajo dvo- ali večpasovno vozišče. Povezujejo naselja v občini z naselji v sosednjih občinah ali naselja in dele naselij v občini med seboj in so pomembne za navezovanje prometa na javne ceste enake ali višje kategorije. Občine lahko v naseljih, kjer je uveden uličen sistem, lokalne ceste razvrstijo na: glavne mestne ceste (LG), ki so kot nadaljevanje državnih cest skozi mesto in povezujejo mestna območja in četrti; zbirne mestne ali zbirne krajevne ceste (LZ), ki so namenjene zbiranju in navezovanju prometnih tokov iz posameznih območij ali mestnih četrti in delov naselij na ceste višje kategorije; in mestne ali krajevne ceste (LK), ki so kot nadaljevanje cest višje kategorije namenjene dostopu do zaključenih prostorskih enot (stanovanjske soseske blokovne in individualne gradnje, industrijske cone, nakupovalni in rekreacijski centri ipd.) v posameznih območjih ali mestnih četrtih in delov naselij.

Cesta je infrastrukturni objekt nizke gradnje, namenjen različnim vrstam prometa. Sestavljena je iz več plasti. Plasti voziščnih konstrukcij cest, ki so del utrditvene prometne površine, so lahko sestavljene iz različnih materialov, ki morajo imeti dobre nosilne lastnosti. Voziščna konstrukcija mora biti zasnovana tako, da preprečuje pronicanje vode v podlago. Voziščne konstrukcije so večinoma zgrajene iz naslednjih plasti: obrabne/zaporne, vezane nosilne in nevezane nosilne, kot je prikazano na sliki 41.



Slika 41: Plasti vozišča: A) krovna plast; B) voziščna konstrukcija; C) utrditev.

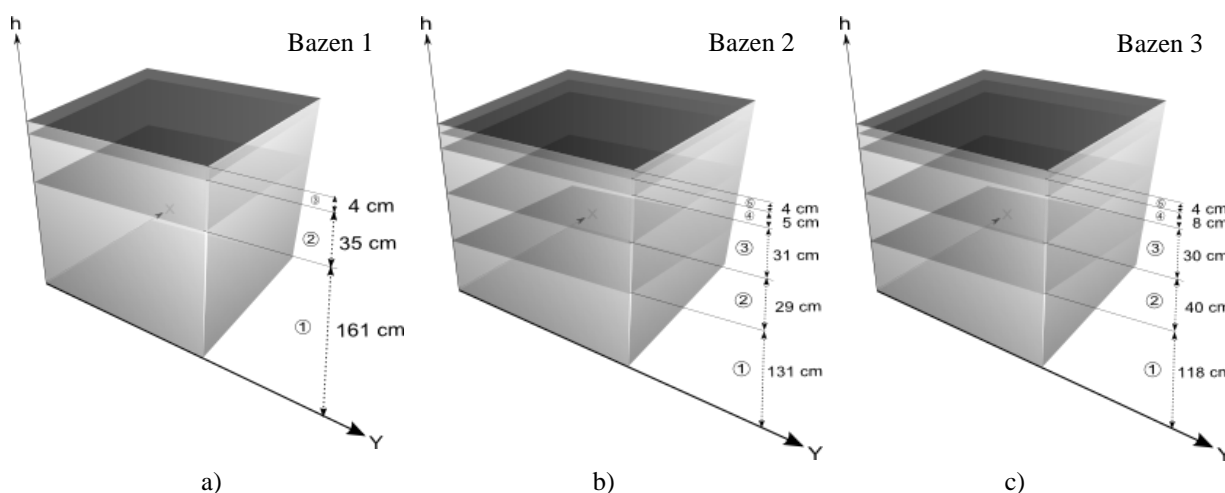
Figure 41: Pavement layers: a) Surface course; b) Pavement structure; c) Pavement structure and compacted sub-base.

Pri postopkih načrtovanja testnih bazenov, s katerimi se želimo približati voziščnim konstrukcijam regionalnih (R2 in R3) in lokalnih cest (LG, LZ in LK) ter hodnikom za pešce, ki so dejansko najpogosteje izvedeni v naravi, je treba upoštevati številne dejavnike. Pri debelini voziščne konstrukcije v testnih bazenih moramo upoštevati osnovna dognanja o nosilnosti podlage, prometnih obremenitvah, značilnostih načrtovanih materialov in lokalnih vremenskih pogojih. Vsaka od teh osnovnih značilnosti je pomembna pri načrtovanju posameznih tipov voziščnih konstrukcij in debelini njenih plasti.

V testnih bazenih so upoštevane tehnične specifikacije za načrtovanje voziščnih konstrukcij:

- TSC 06.511:2009 – prometne obremenitve – določitev in razvrstitev
- TSC 06.512:2003 – projektiranje – klimatski in hidrološki pogoji
- TSC 06.520:2009 – projektiranje – dimenzioniranje novih asfaltnih voziščnih konstrukcij

Za potrebe doktorske disertacije so zgrajeni trije povezani bazeni, v katere je na podlagi pravilnikov in tehničnih specifikacij položena posamezna vrsta infrastrukture. V prvem bazenu tlorisne površine 6,03 m² je zgrajen hodnik za pešce, ki je konstrukcijsko najmanj zahteven. V drugem bazenu tlorisne površine 5,73 m² je zgrajeno vozišče lokalne ceste in v tretjem bazenu tlorisne površine 6,21 m² vozišče regionalne ceste. Načelno je vozišče predstavljeno z nosilnimi tlemi, posteljico in voziščno konstrukcijo. Glede na določeno (predvideno) prometno obremenitev, nosilnost podlage in povprečne vremenske značilnosti posameznih konstrukcij vozišč in hodnikov za pešce so izračunane debeline plasti ter določene sestave in material posameznih plasti, kot jih prikazujeta slika 42 in preglednica 4.



Slika 42: Debeline plasti testnih bazenov: a) Hodnik za pešce; b) Lokalna cesta; c) Regionalna cesta.
Figure 42: Thickness of testing pools layers: a) Pedestrian pavement; b) Local road; c) Regional road.

Preglednica 4: Sestava plasti posameznih testnih bazenov.
Table 4: Composition of layers of individual testing pools.

	Bazen 1	Bazen 2	Bazen 3
Tip bazena	hodnik za pešce	lokalna cesta	regionalna cesta
Asfaltna obrabna in nosilnoobrabna plast	AC 8 surf 50/70 A3 (4 cm)	AC 8 surf 50/70 A3 (4 cm)	AC 8 surf 50/70 A3 (4 cm)
Asfaltna zgornja vezana nosilna plast	/	AC 22 base 50/70 A3 (5 cm)	AC 22 base 50/70 A3 (8 cm)
Spodnja nevezana nosilna plast	tam. drobljenec 0–32 mm (35 cm)	tam. drobljenec 0–32 mm (31 cm)	tam. drobljenec 0–32 mm (30 cm)
Posteljica pod voziščno konstrukcijo	/	drobljenec 0–125 mm (29 cm)	drobljenec 0–125 mm (40 cm)
Temeljna tla	navadna zemlja s pos. večjim kamenjem (161 cm)	navadna zemlja s pos. večjim kamenjem (131 cm)	navadna zemlja s pos. večjim kamenjem (118 cm)

V cestogradnji v Sloveniji se uporabljajo pretežno naravne in drobljene zmesi zrn iz karbonatnih kamnin, tj. apnenca in dolomita. Za obrabne plasti se predvsem na bolj prometno obremenjenih cestah uporabljajo kakovostnejše zmesi iz silikatnih zrn. Drugi osnovni materiali v cestogradnji so veziva: bitumenska in hidravlična – cement in apno. Izboljšanje določenih lastnosti asfaltov dosežemo tudi z uporabo polimernih bitumenskih veziv.

Pri gradnji cest oziroma voziščnih konstrukcij se je izkazalo, da določanje nosilnosti podlage in značilnosti materiala ne predstavlja težave. Dileme se pojavljajo pri dejavnikih, kot sta prometna obremenitev in globina zmrzali.

3.2 Posteljica testnih bazenov

Posteljica pod voziščno konstrukcijo oziroma zaključna plast podlage pod voziščno konstrukcijo mora zagotoviti čim bolj enakomerno nosilnost in zmanjšati občutljivost na učinke zmrzali. Za njo se v praksi uporabljajo predvsem kamninski drobir zaradi prostorske stabilnosti in obstojnosti v vodi. Debelina posteljice navadno ne presega 50 cm. Primerno geometrijsko lastnost oziroma zrnavost dosežemo, če premer največjega zrna v zmesi ne presega $2/3$ debeline plasti, sploh pa ne sme biti večji od 300 mm. Kakovost sestavljenih zmesi zrn lahko ovrednotimo z nagibom presejne krivulje v določenem območju, ki ga predstavlja količnik neenakomernosti presejne krivulje U in ga podamo z enačbo (Žmavc, 2007):

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (75)$$

kjer je d_{60} dolžina stranice sita, skozi katero se preseje 60 m.-% zmesi zrn (mm), in d_{10} dolžina stranice sita, skozi katero se preseje 10 m.-% zmesi zrn (mm).

Vrednost količnika U se spreminja v odvisnosti od vrednosti eksponentne funkcije n po enačbi (Žmavc, 2007):

$$U = \sqrt[n]{6} \quad (76)$$

kjer se vrednost količnika U manjša, čim bolj enakozrnata je zmes. Količnik neenakomernosti presejne krivulje pri kamninah, primernih za posteljico, mora biti večji od 8 (Žmavc, 2007).

Nosilnost posteljice je treba določiti po postopkih, podrobno opredeljenih v tehnični specifikaciji za meritve in raziskave – deformacijski moduli vgrajenih materialov TSC 06.720:2003. Nosilnost pomeni mehansko odpornost planuma vgrajenega materiala proti obremenitvam. Za opredelitev nosilnosti je v Sloveniji v uporabi vrednost CBR -testa (kalifornijski indeks nosilnosti).

Z vrednostmi obremenitev σ , izmerjenimi za vtisnjenje pritisnega bata do normirane globine 2,54 mm oziroma 5,08 mm, in standardiziranimi vrednostmi za drobljenec σ_s , se vrednosti CBR določi na osnovni enačbe:

$$CBR = \frac{\sigma}{\sigma_s} \cdot 100 \% \quad (77)$$

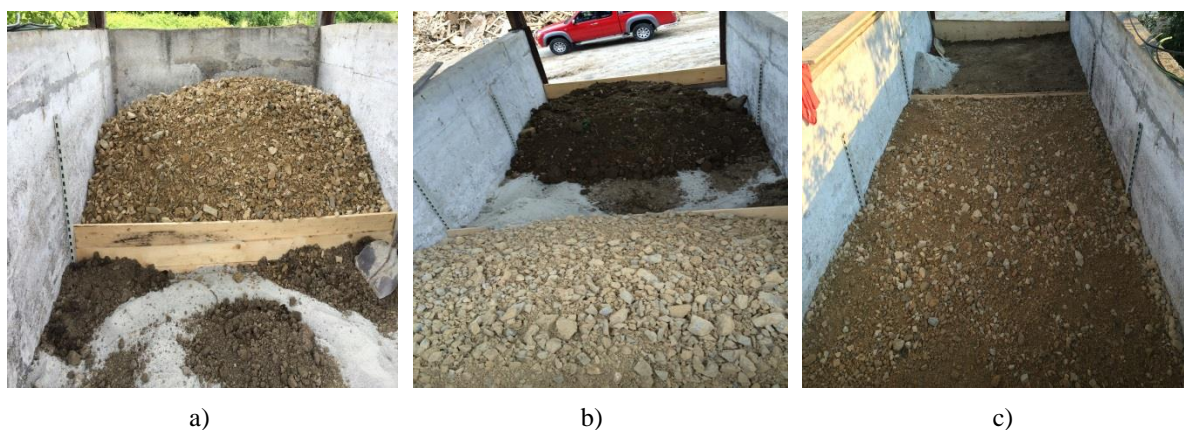
Če z naravnimi materiali primerne nosilnosti ni mogoče doseči, je treba uporabiti postopke za izboljšanje, utrditev in/ali stabiliziranje. Ker so postopki razmeroma cenen, je treba z njimi zagotoviti čim večjo nosilnost, najmanj pa vrednost $CBR = 7\%$.

Primerno enakomerno nosilnost na planumu posteljice, to je na planumu pod voziščno konstrukcijo, je mogoče doseči z vgraditvijo naslednjih debelin plasti obstojnih kamnitih materialov (zrnavosti praviloma do 100 mm) v posteljico:

- na pretežno vezljivih zemljinah 50 cm
- na zelo zaglinjenih kamnitih materialih 40 cm
- na kamnitih materialih (izravnalna plast – zrnavost do 63 mm) 20 cm

Tako je na planumu posteljice zagotovljena vrednost nosilnosti $CBR = 15\%$, ki zagotavlja vse pogoje za kakovostno vgraditev materialov v nadgrajene plasti voziščne konstrukcije.

Uporabljeni material za posteljico v testnih bazenih, prikazan na sliki 43, je apnenčev drobljenec 0–125 mm iz kamnoloma Liboje. Apnenec iz Liboj uvrščamo med sedimentne kamnine, pretežno je sestavljen iz kalcijevega karbonata in je po petrografskih in mehanskih značilnostih za ta namen visoko kakovosten material. Lastnosti uporabljenega drobljenega kamnena agregata 0–125 mm za posteljico po standardu SIST EN 13242:2003+A1:2008 so podane v dodatku A.1.1.



Slika 43: a–c) Vgradnja posteljice pod voziščno konstrukcijo v testnih bazenih 2 in 3 (apnenčev drobljenec 0–125 mm).

Figure 43: a–c) Installation of sub-base under pavement in testing pools 2 and 3 (limestone gravel 0–125 mm).

Preglednica 5 prikazuje vgrajene/določene debeline posteljic na podlagi namena in priporočenih debelin.

Preglednica 5: Debeline posteljic v posameznih testnih bazenih.

Table 5: Thickness of sub-bases in testing pools.

Bazen	Debelina posteljice (drobljenec 0–125 mm)
Bazen 1	0 cm
Bazen 2	29 cm
Bazen 3	40 cm

Predpostavljamo, da je na planumu posteljice zagotovljena vrednost nosilnosti $CBR = 10 \%$, ki je vhodni parameter pri dimenzioniranju asfaltnih voziščnih konstrukcij. Debelina posteljice v testnih bazenih ne presega 40 cm. Valjarje smo uporabili, da bi se približali predpisani gostoti materiala.

3.3 Vrste in dimenzioniranje voziščnih konstrukcij

V cestogradnji se uporablja več vrst voziščnih konstrukcij, od katerih sta največkrat uporabljeni asfaltna in cementno-betonska. Asfaltna voziščne konstrukcije so lahko zgrajene v treh značilnih sestavah, ki se v osnovi razlikujejo v spodnjih nosilnih plasteh. Za namen te doktorske disertacije smo se v testnih bazenih poskusili približati asfaltni voziščni konstrukciji s spodnjo nevezano zmesjo kamnitih zrn, kot jo opredeljuje tehnična specifikacija za projektiranje in dimenzioniranje novih asfaltnih voziščnih konstrukcij javnih cest (TSC 06.520:2009, 2009).

Tehnična specifikacija za ceste TSC 06.520 temelji na rezultatih AASHO-testa (Ameriško združenje za državne avtoceste in transport), dopoljenih s preveritvami merodajnih napetosti in deformacij na mejnih površinah posameznih plasti v voziščni konstrukciji.

Osnovni parametri pri tem empiričnem postopku določanja dimenzij voziščnih konstrukcij so (podrobnejši opis nekaterih spremenljivk je v dodatku A.1):

- doba trajanja voziščne konstrukcije (n),
- uporabnost vozne površine na koncu dobe trajanja (p),
- nosilnost podlage = posteljice (CBR),
- merodajna dnevna prometna obremenitev (T_d),
- klimatski in hidrološki pogoji (R),
- značilnost materialov v načrtovani voziščni konstrukciji (a_i, d_i).

Uporabnost vozne površine je kot ciljna vrednost določena z indeksom vozne sposobnosti p , ki znaša:

- za nova, idealno ravna asfaltna vozišča $p = 5,0$,
- za popolnoma dotrajana (porušena) vozišča, po katerih promet ni več mogoč, pa $p = 0$.

Meritev uporabnosti vozne površine oziroma določitev indeksa vozne sposobnosti na osnovi rezultatov meritev v praksi ni uveljavljena. Kot merodajna mejna vrednost indeksa vozne sposobnosti na koncu dobe trajanja voziščne konstrukcije je sprejeta vrednost $p_k = 2,0$, ki pomeni sicer še uporabno, vendar skrajno mejno stanje vozne površine.

V postopku določitve dimenzij novih asfaltnih voziščnih konstrukcij so klimatski in hidrološki pogoji (glej dodatek A.1.4 in razdelke) upoštevani s privzeto vrednostjo regionalnega faktorja $R = 2,0$ pri določitvi dimenzij za zagotovitev primerne odpornosti načrtovanih materialov proti utrujanju in z določeno mejno debelino voziščne konstrukcije h_{min} (glej preglednico 32) za zaščito proti učinkom zmrzovanja in odtajevanja.

Vrednosti regionalnega faktorja znašajo od $R = 0,5$ za najtežje klimatske in hidrološke pogoje do $R = 5$ za najugodnejše. Za pogoje v našem okolju je kot osnovna vrednost privzeta $R = 2,0$.

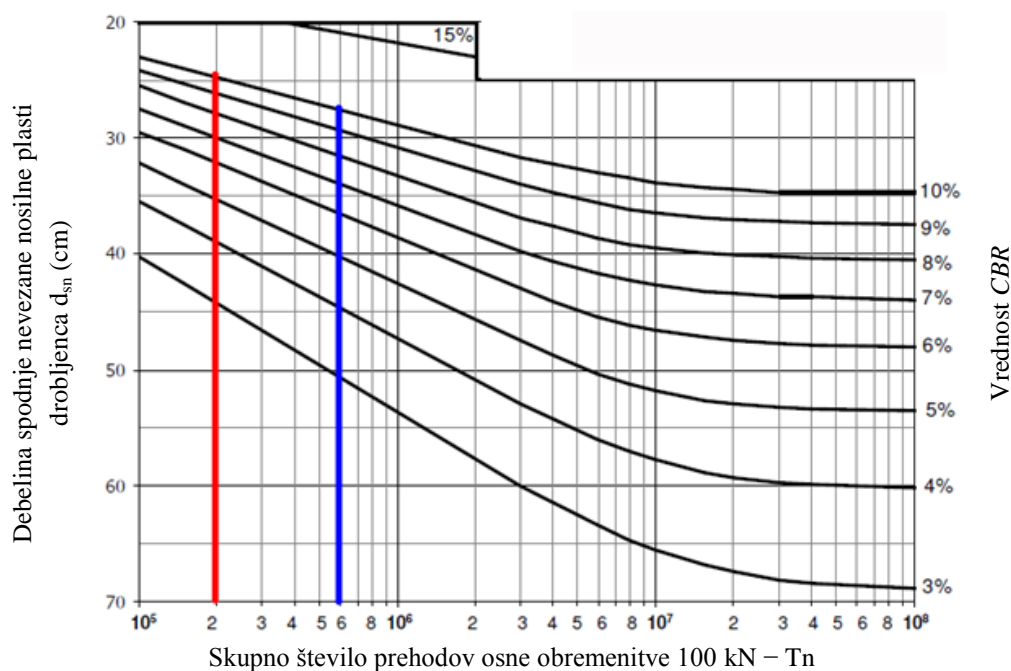
3.3.1 Spodnja nevezana nosilna plast testnih bazenov

Uporabljeni material spodnje nevezane nosilne plasti v testnih bazenih je apnenčev drobljenec 0–32 mm iz kamnoloma v Veliki Pirešici (glej sliko 45). Apnenec iz Velike Pirešice uvrščamo med sedimentne kamnine, pretežno je sestavljen iz kalcijevega karbonata in je po petrografskih in mehanskih značilnostih visokokakovosten kamen. Podrobnejši opis namena, materialov in računskih debelin spodnje nevezane nosilne plasti je podan v dodatku A.1.5.

Debeline plasti nevezane zmesi kamnitih zrn, v dobi trajanja voziščne konstrukcije načrtovane prometne obremenitve T_n in določeni vrednosti nosilnosti podlage $CBR = 10\%$ (posteljica), je treba določiti na osnovi diagrama, prikazanega na sliki 44. Debelina plasti v diagramu je opredeljena za zmes drobljenih zrn z računskim količnikom ekvivalentnosti $a_m = 0,14$ (glej dodatek A.1.2).

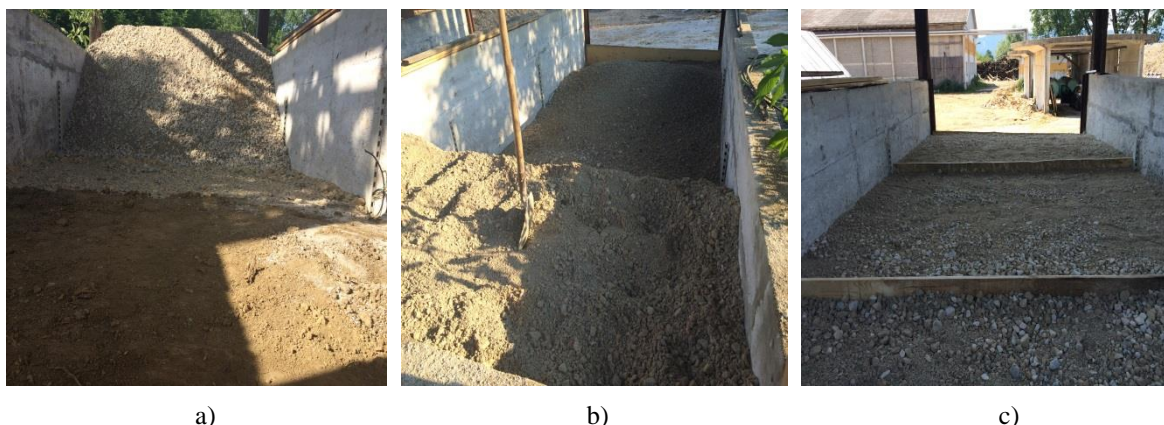
Iz diagrama za določitev debeline plasti nevezane zmesi kamnitih zrn na sliki 44 lahko opredelimo d_{sn} za posamezni testni bazen:

- testni bazen 2 ($CBR = 10\%$, $T_{20} = 2 \times 10^5$), debelina $d_{sn} = 24$ cm in
- testni bazen 3 ($CBR = 10\%$, $T_{20} = 6 \times 10^5$), debelina $d_{sn} = 28$ cm.



Slika 44: Diagram za določitev debeline plasti nevezane zmesi kamnitih zrn: rdeča linija – testni bazen 2 ($CBR = 10\%$, $T_{20} = 2 \times 10^5$), debelina $d_{sn} = 24$ cm; modra linija – testni bazen 3 ($CBR = 10\%$, $T_{20} = 6 \times 10^5$), debelina $d_{sn} = 28$ cm (TSC 06.520:2009, 2009).

Figure 44: Diagram for determination of thickness of the base course layer made of stone aggregate: red line – testing pool 2 ($CBR=10\%$, $T_{20} = 2 \times 10^5$), thickness $d_{sn} = 24$ cm; blue line – testing pool 3 ($CBR=10\%$, $T_{20} = 6 \times 10^5$), thickness $d_{sn} = 28$ cm (TSC 06.520:2009, 2009).



a)

b)

c)

Slika 45: a–c) Vgradnja spodnje nevezane nosilne plasti v testnih bazenih (ap. drobljenec 0–32 mm).

Figure 45: a–c) Installation of the base course layer in testing pools (limestone gravel 0–32 mm).

V testne bazene so na podlagi pogojenih priporočenih debelin za spodnjo nevezano nosilno plast v odvisnosti od predvidene prometne obremenitve (glej dodatek A.1.3) in vrednosti *CBR* (glej razdelek 3.2) vgrajene/določene debeline, kot jih prikazujeta slika 42 in preglednica 6.

Preglednica 6: Debeline spodnjih nevezanih nosilnih plasti v posameznih testnih bazenih.

Table 6: Thicknesses of lower decoupled layers in testing pools.

	Debelina spodnjih nevezanih nosilnih plasti (drobljenec 0–32 mm)
Bazen 1	35 cm
Bazen 2	31 cm
Bazen 3	30 cm

3.3.2 Asfaltna krovna plast testnih bazenov

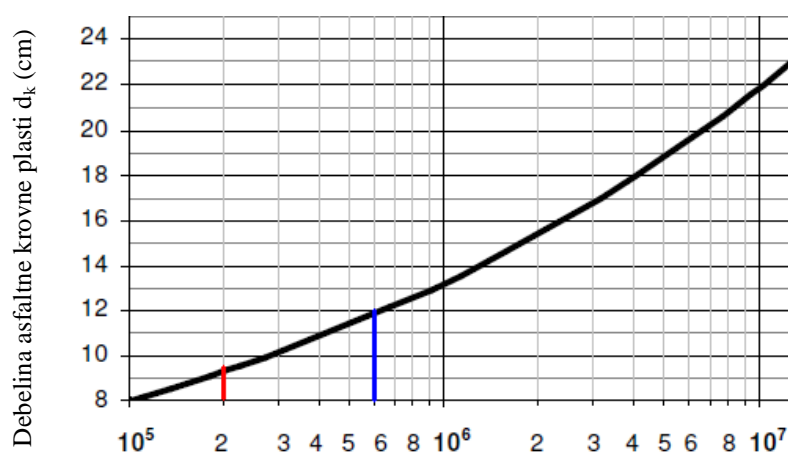
Asfaltna krovna plast je vrhnji del voziščne konstrukcije. Sestavljata jo obrabna plast in vezana zgornja nosilna ali nosilnoobrabna plast iz bituminizirane zmesi. Bituminizirana (asfaltna) zmes je zmes kamnitih zrn polnila, peska, drobirja in/ali proda ter bitumenskega veziva in morebitnih potrebnih dodatkov, proizvedena po vročem postopku v asfaltnem obratu. Izbira bituminiziranih zmesi za obrabno in zgornjo vezano nosilno plast je odvisna od specifičnih pogojev uporabe, tj. predvsem predvidene prometne obremenitve, klimatskih pogojev in poteka trase, ki jim mora biti prilagojena sestava zmesi kamnitih zrn kot tudi vrsta bitumenskega veziva. Kakovost izbranih bituminiziranih zmesi mora ustrezati zahtevam v veljavni tehnični regulativi za proizvedeno in vgrajeno bituminizirano zmes.

Veživo bituminiziranih zmesi predstavlja bitumen, ki je pri predelavi ustreznega zemeljskega olja (nafte) pridobljena težko hlapljiva temnobarvna zmes različnih organskih substanc, katerih se elastoviskozno obnašanje s temperaturo spreminja. V testnih bazenih je bilo izbrano veživo krovnih plasti 50/70. Vrste veziva krovnih plasti glede na vrste bitumiziranih zmesi, uporabljenih v testnih bazenih (AC 22 base in AC 8 surf), izbranih na podlagi prometne obremenitve, gostote in hitrosti prometa ter klimatskega območja, so podrobneje podana v dodatku A.2.1.

Debeline asfaltne krovne plasti v dobi trajanja voziščne konstrukcije načrtovane prometne obremenitve T_n je treba določiti na osnovi diagrama, prikazanega na sliki 46. Asfaltna krovna plast je opredeljena s povprečno kakovostjo bitumizirane zmesi z računskim količnikom ekvivalentnosti $a_{rk} = 0,38$, na podlagi katere je opredeljena debelina plasti. Tehnične regulative za kakovost materialov načrtovanih za uporabo v novih asfaltnih konstrukcijah in vrednosti količnika ekvivalentnosti so podane v dodatku A.1.2.

Iz diagrama za določitev debeline asfaltne krovne plasti na sliki 46 lahko opredelimo d_k za posamezni testni bazen:

- testni bazen 2 ($T_{20} = 2 \times 10^5$), debelina $d_k = 9$ cm,
- testni bazen 3 ($T_{20} = 6 \times 10^5$), debelina $d_k = 12$ cm.



Slika 46: Diagram za določitev debeline asfaltne krovne plasti: rdeča linija – testni bazen 2 ($T_{20} = 2 \times 10^5$), debelina $d_k = 9$ cm; modra linija – testni bazen 3 ($T_{20} = 6 \times 10^5$), debelina $d_k = 12$ cm (TSC 06.520:2009, 2009).

Figure 46: Diagram for determination of thickness of the covering asphalt layer: red line – testing pool 2 ($T_{20} = 2 \times 10^5$), thickness $d_k = 9$ cm; blue line – testing pool 3 ($T_{20} = 6 \times 10^5$), thickness $d_k = 12$ cm (TSC 06.520:2009, 2009).

3.3.2.1 Asfaltna zgornja vezana nosilna plast testnih bazenov

V testnih bazenih je na podlagi priporočil in izkušenj za asfaltno nosilno plast uporabljen bitumizirani drobljenec, vezan z bitumenskim vezivom 50/70, zrnivosti 22 za srednjo skupino prometne obremenitve. Njegovo polaganje v testne bazene prikazuje slika 47. Oznaka bitumiziranega drobljenca iz proizvodnega obrata asfaltne baze Ammann A 240-U v Veliki Pirešici je AC 22 base 50/70 A3. Podrobnejši opis, namen, področja uporabe v odvisnosti od prometne obremenitve in pogojene projektne debeline asfaltnih nosilnih plasti so podani v dodatku A.2.2.

V testnih bazenih so na podlagi pogojenih projektnih debelin asfaltne krovne plasti za zgornjo vezano nosilno plast v odvisnosti od predvidene prometne obremenitve vgrajene/določene debeline, kot so razvidne v preglednici 7. Prostorske in mehanske lastnosti uporabljene AC 22 base 50/70 A3 bitumizirane zmesi za asfaltno zgornjo nosilno plast po standardu SIST EN 1038-1:2008/AC:2008 so navedene v dodatku A.2.3.

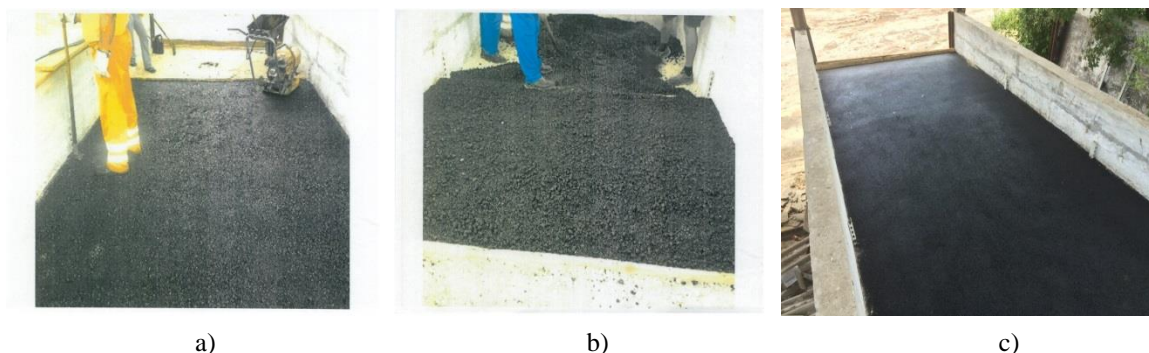
Preglednica 7: Debeline asfaltnih nosilnih plasti v posameznih testnih bazenih.

Table 7: Thicknesses of asphalt base layers in testing pools.

Bazen	Debelina asfaltne nosilne plasti AC 22 base 50/70 A3 (mm)
Bazen 1	0
Bazen 2	50
Bazen 3	80

3.3.2.2 Asfaltna obrabna in nosilnoobrabna plast testnih bazenov

V testnih bazenih je na podlagi priporočil in izkušenj za asfaltno obrabno in nosilnoobrabno plast uporabljen bitumizirani beton, vezan z bitumenskim vezivom 50/70, zrnivosti 8 za srednjo skupino prometne obremenitve. Njegovo polaganje v testne bazene prikazuje slika 47. Oznaka bitumiziranega betona iz proizvodnega obrata asfaltne baze Ammann A 240-U v Veliki Pirešiči je AC 8 surf 50/70 A3. Podrobnejši opis, sestava, področja uporabe v odvisnosti od prometne obremenitve in pogojene projektne debeline asfaltnih obrabnih in nosilnoobrabnih plasti so podani v dodatku A.2.4.



Slika 47: a–c) Polaganje asfaltne krovne plasti v bazenih (AC 22 base in AC 8 surf).

Figure 47: a–c) Installation of asphalt covering layer in the pools (AC 22 base and AC 8 surf).

V testnih bazenih so na podlagi pogojenih projektnih debelin asfaltne krovne plasti za asfaltno obrabno plast in nosilnoobrabno plast v odvisnosti od predvidene prometne obremenitve vgrajene/določene debeline, kot so razvidne v preglednici 8. Prostorske in mehanske lastnosti uporabljene AC 8 surf 50/70 A3 bitumizirane zmesi za asfaltno obrabno in nosilnoobrabno plast po standardu SIST EN 1038-1:2008/AC:2008 so navedene v dodatku A.2.5.

Preglednica 8: Debeline asfaltnih obrabnih in nosilnoobrabnih plasti v posameznih testnih bazenih.

Table 8: Thickness of asphalt wearing course in testing pools.

Bazen	Debelina asfaltne obrabne in nosilnoobrabne plasti AC 8 surf 50/70 A3 (mm)
Bazen 1	40
Bazen 2	40
Bazen 3	40

3.3.2.3 Debelinski indeks voziščnih konstrukcij testnih bazenov

Debelinski indeks voziščne konstrukcije predstavlja vsota zmnožkov faktorjev ekvivalentnosti posameznih vgrajenih materialov (a_i) in debelin plasti teh materialov (d_i) (TSC 06.520:2009, 2009).

$$D_{pot} = a_{rk} \cdot d_k + a_m \cdot d_{sn} \quad (78)$$

$$D_{dej} = a_0 \cdot d_0 + a_{zv} \cdot d_{zv} + a_{sn} \cdot d_{sn} \quad (79)$$

Za prevzem predvidene lahke/srednje obremenitve v testnem bazenu 3, ki predstavlja RC, $T_{20} = 6 \times 10^5$, prehodov NOO 100 kN, je ob predvideni nosilnosti podlage $CBR = 10 \%$ treba izvesti minimalno voziščno konstrukcijo z 12 cm debelo asfaltno krovno plastjo in 28 cm debelo nevezano nosilno plastjo, kar pomeni potrebni debelinski indeks na dane pogoje ($D_{pot} = 0,38 \cdot 12 \text{ cm} + 0,14 \cdot 28 \text{ cm} = 8,48$). Prav tako je bilo za prevzem predvidene zelo lahke/lahke obremenitve v testnem bazenu 2, ki predstavlja LC, obremenitve $T_{20} = 2 \times 10^5$, prehodov NOO 100 kN, ob predvideni nosilnosti podlage $CBR = 10 \%$, treba izvesti minimalno voziščno konstrukcijo z 9 cm debelo asfaltno krovno plastjo in 24 cm debelo nevezano nosilno plastjo, kar pomeni potrebni debelinski indeks na dane pogoje ($D_{pot} = 0,38 \cdot 9 \text{ cm} + 0,14 \cdot 24 \text{ cm} = 6,78$).

Dejanski debelinski indeksi zgrajenih bazenov so prikazani v preglednicah 9–11.

Preglednica 9: Dejanski debelinski indeksi testnega bazena 3 – regionalna cesta.

Table 9: Actual thickness index of testing pool 3 – regional road.

Plast	Debelina d_i (cm)	Faktor ekvivalentnosti materiala a_i	Debelinski indeks $D_i = d_i \cdot a_i$
Drobljenec D 125	40	0	0
Tamponski drobljenec TD 32	30	0,14	4,2
AC 22 base 50/70 A3	8	0,35	2,8
AC 8 surf 50/70 A3	4	0,42	1,68
Skupaj	82	–	8,68

Dejanski debelinski indeks testnega bazena 3 znaša $D_{dej} = 8,68 > D_{pot} = 8,48$.

Preglednica 10: Dejanski debelinski indeksi testnega bazena 2 – lokalna cesta.

Table 10: Actual thickness index of testing pool 2 – local road.

Material	Debelina d_i (cm)	Faktor ekvivalentnosti materiala a_i	Debelinski indeks $D_i = d_i \cdot a_i$
Drobljenec D 125	29	0	0
Tamponski drobljenec TD 32	31	0,14	4,34
AC 22 base 50/70 A3	5	0,35	1,75
AC 8 surf 50/70 A3	4	0,42	1,68
Skupaj	69	–	7,77

Dejanski debelinski indeks testnega bazena 2 znaša $D_{dej} = 7,77 > D_{pot} = 6,78$.

Preglednica 11: Dejanski debelinski indeksi testnega bazena 1 – hodnik za pešce.

Table 11: Actual thickness index of testing pool 1 – pavement.

Material	Debelina d_i (cm)	Faktor ekvivalentnosti materiala a_i	Debelinski indeks $D_i = d_i \cdot a_i$
Tamponski drobljenec TD 32	35	0,14	4,90
AC 8 surf 50/70 A3	4	0,42	1,68
Skupaj	39	–	6,58

3.3.2.4 Odpornost proti učinkom zmrzovanja

Izvedena oziroma zgrajena voziščna konstrukcija skupaj s posteljico, ki je iz zmrzljivo odporne kamnitega materiala, zagotavlja primerno zaščito proti škodljivim učinkom heterogenega zmrzovanja:

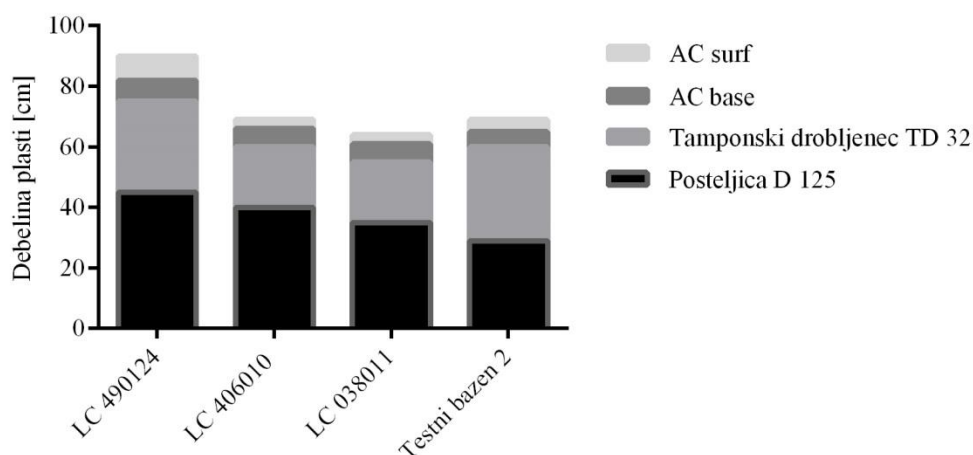
- bazen 2 (LC) = 40 cm (voziščne konstrukcije) + 29 cm (posteljice) = 69 cm $> h_{min} = 63$ cm
- bazen 3 (RC) = 42 cm (voziščne konstrukcije) + 40 cm (posteljice) = 82 cm $> h_{min} = 63$ cm

3.4 Skladnost cest podobnih obremenitev in lastnosti s cestami v testnih bazenih

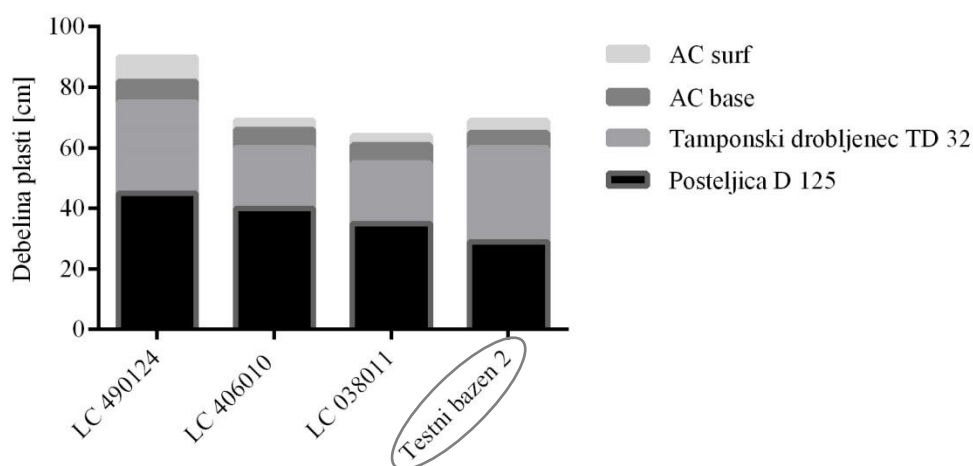
Ceste se gradijo na način in pod pogoji, ki jih določajo predpisi za urejanje javnih cest, varstva okolja, prostora in graditve objektov ter občinski odloki. Osnovne karakteristike tehničnih elementov podajata Zakon o javnih cestah (Uradni list RS, št. 33/2006) in Pravilnik o projektiranju cest (Uradni list RS, št. 91/2005, 26/2006).

V praksi je zgrajenih in rekonstruiranih veliko število lokalnih, regionalnih in glavnih cest ter hodnikov za pešce. V nadaljevanju smo primerjali vozišča posameznih že zgrajenih cest z zgrajenimi vozišči v bazenih. V analizi ugotavljamo, da se debeline plasti in uporabljeni materiali bistveno ne razlikujejo.

Na primer tehnična poročila za lokalne ceste LC 490124 Ropasija–Vransko (AC 8 surf B 50/70 A3 = 8 cm, AC 22 base B 50/70 A4 = 7 cm, TD 32 = 30 cm, kamniti material D 125 = 45 cm); LC 406010 Orehova vas–Dolga Gora (AC 8 surf B 50/70 A4 = 3 cm, AC 22 base B 50/70 A3 = 6 cm, TD 32 = 20 cm, kamniti material D 125 = 40 cm); in LC 038011 Maistrova–Anski vrh (AC 8 surf B 50/70 A3 = 3 cm, AC 22 base B 50/70 A3 = 6 cm, TD 32 = 20 cm, kamniti material D 125 = 35 cm), ki so bile projektirane v zadnjih petih letih, za obrabnozaprno plast navajajo bitumizirani beton, zgornjo nosilno plast bitumizirani drobljenec, vezan z bitumenskim vezivom, nevezano nosilno plast tamponski drobljenec TD 32 in za posteljico kamniti material D125 (LC 490124, 2015; LC 406010, 2015; LC 038011, 2015).



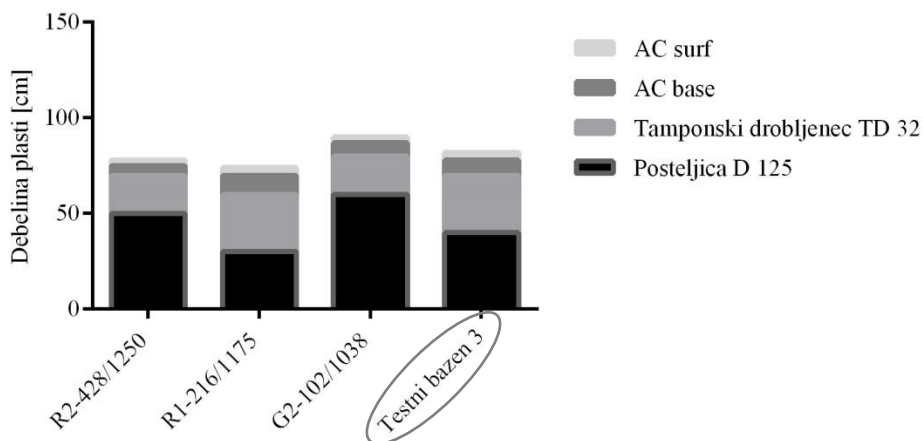
Slika 48 prikazuje debeline projektiranih plasti in materialov lokalnih cest in testnega bazena 2 (glej sliko 42).



Slika 48: Primerjava debelin plasti vozišč LC 490124, LC 406010, LC 038011 ter testnega bazena 2.

Figure 48: Thickness of pavement structure layers LC 490124, LC 406010, LC 038011 and testing pool 2.

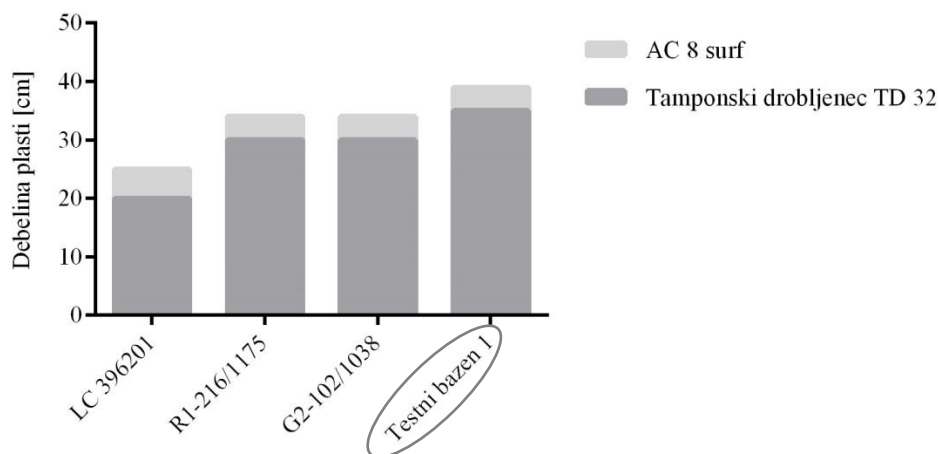
Tehnična poročila za regionalni cesti in glavno cesto R2-428/1250 Luče–Sestre Logar (AC 8 surf B 100/150 A4 = 3 cm, AC 16 base B 70/100 A4 = 5 cm, TD 32 = 20 cm, kamniti material D 125 = 50 cm); R1-216/1175 Krka–Žužemberk (AC 11 surf B 50/70 A2 = 4 cm, AC 32 base B 50/70 A2 = 10 cm, TD 32 = 30 cm, kamniti material D 125 = 30 cm); in G2-102/1038 Bača–Dolenja Trebuša (AC 11 surf B 70/100 A3 = 3 cm, AC 22 base B 50/70 A3 = 7 cm, TD 32 = 20 cm, kamniti material D 100 = 60 cm), ki so bile projektirane v zadnjih štirih letih, za obrabnozaprno plast navajajo bitumizirani beton, zgornjo nosilno plast bitumizirani drobljenec, vezan z bitumenskim vezivom, nevezano nosilno plast tamponski drobljenec TD 32 in za posteljico kamniti material D 100 in D 125 (R2-428, 2015; R1-216, 2015; G2-102, 2015). Slika 49 prikazuje debeline projektiranih plasti in materialov regionalnih cest in testnega bazena 3 (glej sliko 42).



Slika 49: Primerjava debeline plasti vozišč R2-428/1250, R1-216/1175, G2-102/1038 ter testnega bazena 3.

Figure 49: Thickness of pavement structure layers R2-428/1250, R1-216/1175, G2-102/1038 and test pool 3.

V okviru tehničnih poročil za ceste so opredeljeni tudi hodniki za pešce. Hodnik za pešce lokalne ceste LC 396201 Pešnica–Podgrad (AC 8 surf B 70/100 A5 = 5 cm in TD 32 = 20 cm); regionalne ceste R1-216/1175 Krka–Žužemberk (AC 11 surf B 50/70 A5 = 4 cm, TD 32 = 30 cm); in glavne ceste G2-102/1038 Bača–Dolenja Trebuša (AC 8 surf B 70/100 A3 = 4 cm in TD 32 = 20 cm), ki so bile projektirane v zadnjih petih letih, za obrabnonosilno plast navajajo bitumizirani beton in nevezano nosilno plast tamponski drobljenec TD 32 (LC 396201, 2015; R1-216, 2015; G2-102, 2015). Slika 50 prikazuje debeline projektiranih plasti in materialov hodnikov za pešce in testnega bazena 1 (glej sliko 42).



Slika 50: Primerjava debelin plasti hodnikov za pešce LC 396201, R1-216/1175, G2-102/1038 ter testnega bazena 1.

Figure 50: Thickness of pedestrian pavement structure layers LC 396201, R1-216/1175, G2-102/1038 and testing pool 1.

Iz vsega navedenega lahko sklepamo, da smo pri dimenzioniranju, konstruiranju in gradnji vozišč v testnih bazenih uporabili primerne materiale in določili primerne debeline plasti voziščnih konstrukcij. Trdimo lahko, da smo se kar najbolj približali povprečnemu dejanskemu stanju v naravi.

3.5 Vgrajena gospodarska infrastruktura in njena globina

Gospodarsko infrastrukturo vgrajujemo v skladu z veljavno zakonodajo, pravilniki, tehničnimi določili in navodili. Globine vgradnje GI se danes v državah Evropske unije znatno ne razlikujejo. Skozi zgodovino je bila glavni kriterij načeloma globina zmrzali, od katere je odvisna globina vodovodne infrastrukture. Če za posamezen vod ali cev GI ni drugih tehničnih določil, morajo biti vgrajeni pod cestiščem ali hodnikom za pešce v cestno telo vsaj na priporočenih globinah. V preglednici 12 so opredeljeni primeri za Slovenijo (Juvanc in Rijavec, 2005), Veliko Britanijo (NJUG, 2013) in Hong Kong (Cheng et al., 2013). Vodovod ne sme biti vgrajen pod višinski nivo fekalne ali mešane kanalizacije (Juvanc in Rijavec, 2005; NJUG, 2013). Informacije o predvidenih globinah, materialih in pogojih vgradnje in križanja GI so ključne pri zaznavanju in prepoznavanju vrste infrastrukture z georadarsko metodo.

Preglednica 12: Min. globina vgrajene GI (Cheng et al., 2013; Juvanc in Rijavec, 2005; NJUG, 2013)
Table 12: Min. depth of installed utilities (Cheng et al., 2013; Juvanc in Rijavec, 2005; NJUG, 2013).

Vrsta voda ali cevi	Vrsta napeljave	Minimalna globina tmena cevi			
		Slovenija (cestišče/hod. za pešce)	Velika Britanija (cestišče)	Velika Britanija (hodnik za pešce)	Hong Kong (cestišče/hod. za pešce)
Kanalizacija	GK – glavni odvodniki	1,50 m	različno/pod	različno/pod	1,5–5 m
	FK – kanal odpa. vode	0,90 m	ostalimi	ostalimi	1,5–5 m
	MK – kanal mete. vode	0,60 m	0,60–0,75 m	0,60–0,75 m	1,5–5 m
Vodovod	GV – glavni vodi	1,20 m	0,75 m	0,75 m	1–2 m
	V – razdelilno omrežje	0,90–1,50 m	0,75 m	0,75 m	1–2 m
Energetika	TN – toplovod	1,00 m	ni navodila	ni navodila	/
	PV – plinovod	1,00 m	0,60–0,75 m	0,60–0,75 m	1–2 m
	PD – produktovod	1,40 m	0,90 m	0,90 m	/
Elektrovodi	VS – visoka napetost	0,60–1,20 m	0,45–1,20 m	0,75–1,20 m	0,45–0,90 m
	NN – nizka napetost	0,60–1,20 m	0,45 m	0,60 m	1–2 m
Elektronske komunikacije	EK – elektronske komunikacije	0,60–1,00 m	0,25–0,35 m	0,45–0,60 m	0,5 m

3.5.1 Vgrajene plinovodne cevi

V praksi se pogosto srečujemo z glavnimi in priključnimi plinovodi, ki jih mora sistemski operater, zadolžen za distribucijo plina, izvesti skladno s Pravilnikom o tehničnih pogojih za graditev, obratovanje in vzdrževanje plinovodov z največjim delovnim tlakom do vključno 16 bar (Uradni list RS, št. 54/2002). Glavni plinovod je plinovod v omrežju, na katerega so vezani priključni plinovodi, ti pa predstavljajo del od glavnega plinovoda do izkopnega mesta. Zgornji pravilnik investitorja in izvajalca zavezuje, da se, kjer je to mogoče, v urbanih naseljih glavni plinovodi položijo v javna zemljišča, in sicer v hodnike za pešce ali čim bližje robovom cestišča.

Glavni in priključni plinovodi za tlak do 10 bar so najpogosteje iz polietilenskih (PE) cevi iz materiala PE 100 in morajo ustrezati standardom SIS EN 12007-2. Cevi iz PE 100 morajo imeti za najvišji delovni tlak plina oznake SDR 17 za tlak do vključno 4 bar in SDR 11 za tlak nad 4 bar do 10 bar. V praksi se izjemoma lahko uporabijo jeklene cevi, ki morajo ustrezati standardom EN 10208-1 in ENV 10220. Globina polaganja plinovodov je odvisna od vrste dejavnikov, predvsem od: podnebnih

pogojev, možnosti vpliva tretje osebe, razmer na zemljišču, lokacije drugih podzemnih vodov, lokacije drugih podzemnih ovir, prometnih omejitev, tehnike polaganja ter najvišjega delovnega tlaka.

Pri plinovodih z najvišjim delovnim tlakom do vključno 5 bar mora biti globina polaganja plinovodov tolikšna, da bo kritje nad temenom glavnih plinovodov najmanj 0,6 m, v primeru priključnih plinovodov je kritje nad temenom plinovoda najmanj 0,5 m. Pri plinovodih z najvišjim delovnim tlakom nad 5 bar do vključno 16 bar mora biti globina polaganja plinovodov tolikšna, da bo kritje nad temenom glavnih in priključnih plinovodov najmanj 0,8 m. Globina polaganja plinovodov v cestiščih mora upoštevati vse predvidene obremenitve in biti določena glede na material plinovoda, debelino stene cevi ter zaščito plinovoda in ne sme biti manjša od 1 m (do 5 bar) in 1,2 m (od 5 do 16 bar). Pri določanju globine polaganja plinovoda se mora upoštevati vse predvidene obremenitve. V izjemnih primerih se s posebnimi varnostnimi ukrepi varnostni odmiki in globina polaganja plinovodov lahko zmanjšajo. Pri križanjih in vzporednem odkliku komunalnih vodov s plinovodi je treba upoštevati osnovne zahteve glede kota križanja in varnostnih odklikov med komunalnimi vodi za zagotovitev obratovalne varnosti.

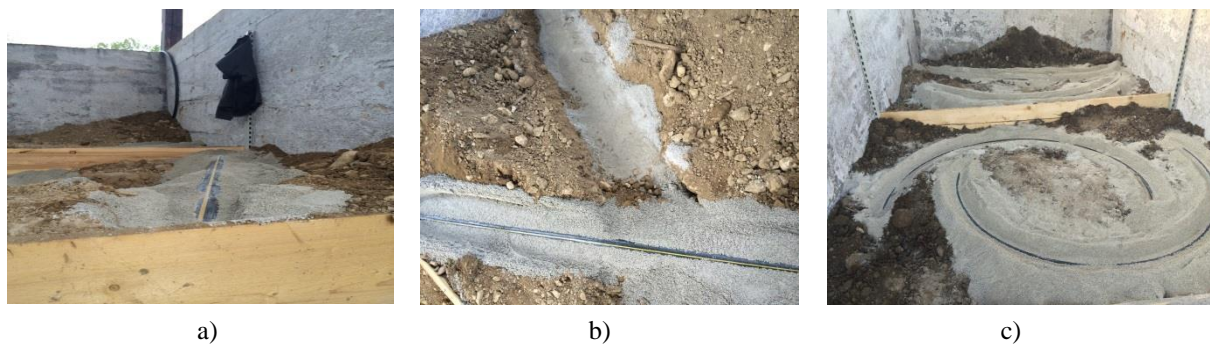
Dno jarka, v katerega se polaga plinovod, mora biti brez ostrih predmetov, ki bi lahko poškodovali cev ali oblogo cevi. V nasprotnem primeru mora biti plinovod položen na peščeno posteljico ali zavarovan s posebno mehansko zaščito.

Pri polaganju plinovoda smo upoštevali pravila za uporabo materiala plinovoda, izvedbo posteljice in predpisane globine. Zaradi prostorske stiske smo v bazenih kršili pravilo križanja in odklikov preostale GI s plinovodom, kar pa naj ne bi vplivalo na prostorsko ločljivost oziroma končne rezultate. Izdelavo peščene posteljice, obsipa in zasipa cevovoda določi projektant. Pri izdelavi posteljice smo z dna jarka odstranili kamne in predmete, ki bi lahko poškodovali plinovodno cev. Pri vseh plinovodnih ceveh smo pripravili peščeno posteljico debeline približno 10 cm iz peska drobljenca zrnivosti 0–4 mm. Cevi so obsute in prekrte z enakim materialom v debelini približno 15–20 cm nad temenom, kot prikazuje slika 51. Lastnosti, globine in dolžine vgrajenih plinskih cevi so predstavljene v preglednici 13.

Preglednica 13: Vgrajene plinske cevi v testnih bazenih.

Table 13: Gas pipes installed into testing pools.

Proizvajalec	DRINPLAST	KONTI HIDROPLAST MACEDONIA	TOTRA PLASTIK
URL	drnisplast.hr	konti-hidroplast.com.mk/	totraplastika.si/
Oznaka cevi	DVGW DG11 BN 3868 G	DVGW DG8106BN0453 G	STS-07/009 PLIN
Tip plinovoda/ (št. možnih priključkov)	glavni/100	glavni/30	priključek
Material (SDR 11)	PE 100 PN 8	PE 100 PN 10	PE 100 PN 10
Nazivni premer (mm)	DN/OD 100	DN/OD 63	DN/OD 32
Dolžina cevi (cm)	200,1	206,1	307,3
Globina cevi (cm)	120	110	80
Št. testnega bazena	2	3	2
Zap. št. infra.	1	2	3



Slika 51: a) Vgrajena cev DVGW DG11 BN 3868 G v bazen 2; b) Vgrajena cev DVGW DG8106BN0453 G v bazen 3; c) Vgrajena plinska cev STS-07/009 v bazen 2.

Figure 51: a) Pipe DVGW DG11 BN 3868 G installed in the pool 2; b) Pipe DVGW DG8106BN0453 G installed in the pool 3; c) Gas pipe STS-07/009 installed in the pool 2.

3.5.2 Vgrajene vodovodne cevi

Vodovodno omrežje je del sistema za oskrbo s pitno vodo. Je sistem cevovodov, ki ga delimo na magistralno, primarno in sekundarno omrežje, vodovodne priključke malega in velikega porabnika, hidrantni vod. Transportni vodovod je del magistralnega omrežja, na katerem ni priključkov neposrednih uporabnikov in je namenjen za transport vode na večje razdalje od vodnih virov do primarnega vodovoda. Sekundarno omrežje in naprave se uporabljajo za neposredno priključevanje uporabnikov na posameznem stanovanjskem ali drugem območju. Priključek stavbe ali gradbenega inženirskega objekta na javni vodovod je cevod od javnega vodovoda do odjemnega mesta.

Pravilniki o tehnični izvedbi in uporabi vodovodnih objektov in naprav urejajo tehnično izvedbo in uporabo javnih vodovodov v lokalni skupnosti in se morajo obvezno upoštevati pri projektiranju, gradnji in uporabi vodovodnih naprav. Pravilniki predpisujejo tehnična pravila o izvedbi in uporabi vodovodnih objektov in naprav, podrobnejša navodila in tehnične normative za projektiranje, gradnjo, priključitev, uporabo in vzdrževanje javnega vodovoda z namenom poenotenja izvedbe.

V danem primeru se za vse cevodove javnega vodovoda, vključno s priključki, lahko uporabljajo cevi za nazivni tlak (NP) 1,0, 1,25, 1,6, 2,5 in 4,0 MPa (10, 12,5, 16, 25 in 40 bar). Nazivni tlak cevododa mora biti v skladu s projektnimi in dejanskimi razmerami.

Nazivne mere cevodov in priključkov so izražene z nazivnim premerom DN, in sicer:

- DN/ID v mm, nazivni premer glede na notranji premer,
- DN/OD v mm, nazivni premer glede na zunanji premer.

V urbanem območju je treba od premera cevi DN/OD 80 prednostno uporabljati cevodove, izdelane iz nodularne litine (NL) z natezno trdnostjo, ki ni manjša od 400 N/m². Nodularne cevi morajo biti izdelane v skladu s SIST EN 545:2010. PVC tlačne cevi se lahko uporabljajo za transportne cevodove, kjer zahtevnost terena omogoča vgradnjo. Danes se za vodovodne priključke in sekundarne vode uporabljajo cevi iz oplaščenega polietilena (PE 100 ali PE 80) oziroma polietilena, premera do vključno DN/OD 110 z minimalno zahtevano trdnostjo PN 12,5 bara.

Minimalne globine vodovodnega cevododa od nivoja urejenega terena do temena cevi znašajo:

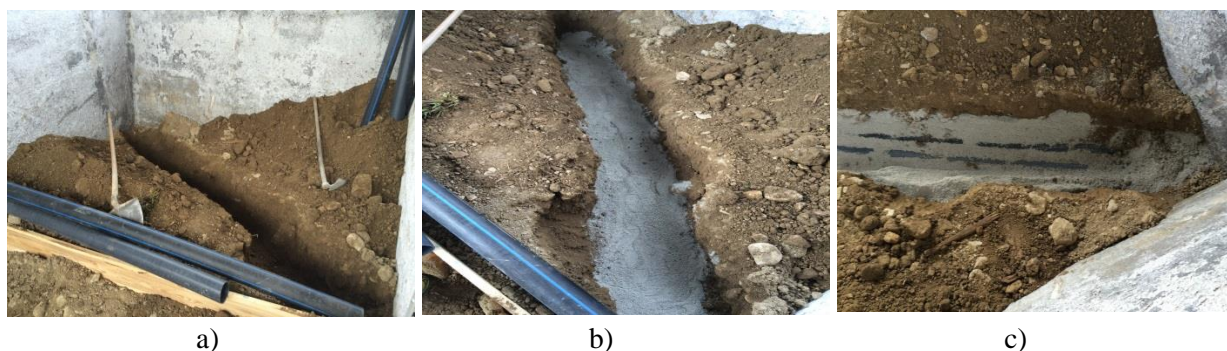
- v vozniških površinah min. 1,2 m, maks. 2,0 m,
- v nevozniških površinah min. 1,0 m, maks. 2,0 m,
- vodovodni priključki 0,8 m, na izpostavljenih legah 1,0 m.

Predpisani so tudi križanja in odmiki. Priporočeni vertikalni odmik vodovodnih cevi od druge GI je 0,5 m. Horizontalni odmiki od oboda vodovodne cevi v odvisnosti od preostale GI mora znašati od 3 do 1 m. Pri polaganju vodovodnih cevi smo upoštevali pravila za uporabo materiala cevi, izvedbo posteljice in predpisane globine. Zaradi prostorske stiske smo v bazenih kršili pravilo križanja in odmikov ostale GI z vodovodom, kar naj ne bi ključno vplivalo na vertikalno ločljivost oziroma končne rezultate. Pri vseh vodovodnih ceveh smo pripravili peščeno posteljico debeline približno 10 cm iz peska zrnivosti 0–4 mm ter cevi obsuli in prekrili z enakim materialom v debelini približno 10–15 cm nad temenom, kot prikazuje slika 52. Lastnosti, globine in dolžine vgrajenih vodovodnih cevi prikazuje preglednica 14.

Preglednica 14: Vgrajene vodovodne cevi v testnih bazenih.

Table 14: Water pipes installed into testing pools.

Proizvajalec	TOTRA PLASTIKA	TOTRA PLASTIKA	DERIPLAST	TUBI PVC	TUBI PVC	SVOODNY SOKOL
URL	totraplastika.si	totraplastika.si	deriplast.it	tubipvc.it	tubipv.it	svsokol.lipetsk.ru
Tip vodovoda	transportni	transportni	priključek	transportni	transportni	transportni
Material (SDR 11)	PE80 PN 12,5	PE80 PN 12,5	PE80 PN 12,5	PVC-U-110	PVC-U-110	Duktilna litina
Nazivni premer (mm)	DN/OD 90 × 8,2	DN/OD 110 × 10,2	DN/OD 32 × 8,2	DN/OD 110 × 4,2	DN/OD 110 × 4,2	DN/OD 110
Dolžina cevi (cm)	158,3	263,7	303,0	192,5	223,3	268,7
Globina cevi (cm)	130	150	80	150	160	180
Št. testnega bazena	2	3	2	3	1	1
Zap. št. infra.	4	5	6	7	8	9



Slika 52: a) Izkop jaška za vgradnjo; b) Priprava posteljice; c) Vgrajena vodovodna cev Totraplastika PE 80 DN/OD 110 × 10,2 in TUBI PVC PVC-U-110 DN/OD 110 × 4,2 v bazen 3.

Figure 52: a) Excavation of the trench for installation; b) Preparing the sub-base for water pipe; c) Water pipe of Totraplastika PE 80 DN/OD 110 × 10,2 and TUBES PVC PVC-U-110 DN/OD 110 × 4,2 installation in the pool 3.

3.5.3 Vgrajene kanalizacijske cevi

S Pravilnikom o tehnični izvedbi in uporabi javnih objektov in naprav za odvajanje in čiščenje odpadnih komunalnih ter padavinskih voda se v lokalni skupnosti podrobneje ureja tehnična izvedba in uporaba javnega kanalizacijskega omrežja ter kanalizacijskih objektov in naprav v upravljanju komunalnega podjetja. Pri načrtovanju kanalizacije smo upoštevali določila pravilnika in smernice, ki jih opredeljujejo izvajalci javne službe, državni standardi SIST in evropski standardi EN.

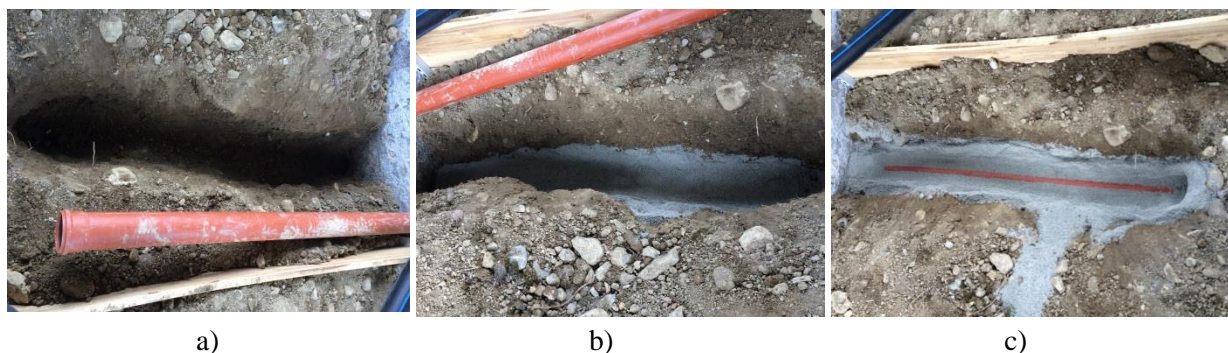
Vgrajeni materiali oziroma cevi morajo zagotavljati vodotesnost in odpornost proti mehanskim, kemijskim in drugim vplivom. Glede fizikalnih, kemijskih ali mikrobioloških lastnosti ne smejo spreminjati kakovosti vode. Material, iz katerega so izdelani jaški in cevi, se izbere glede na namen, obtežbo, hidravlične zahteve, kemično odpornost, abrazijo in pričakovano življenjsko dobo kanala, ki naj znaša minimalno 50 let. Za gradnjo kanalov kanalizacije se lahko uporabljajo naslednji materiali: polivinilklorid, polietilen, armirani poliester, armirani beton, duktilna litina, keramika in jeklo. Vse vgrajene kanalizacijske cevi morajo imeti teste za predpisano temensko trdnost, ki je določena glede na vrsto prometne obremenitve. Najmanjši dovoljeni notranji premer gravitacijskega kanala javne kanalizacije je DN/IN 200, najmanjši dovoljeni notranji premer spojnega kanala je DN/IN 150 in najmanjši dovoljeni notranji premer tlačnega kanala kanalizacije je DN/IN 80. Kanalizacijske cevi je treba ob upoštevanju navodil proizvajalca zasipati z nevezanim materialom v taki debelini, da je kanal zaščiten pred mehanskimi poškodbami in zmrzovanjem. Če cevi ne bi prenesle temenske obremenitve, jih je treba zaščititi z betonsko oblogo v debelini, ki se določi na podlagi statičnega izračuna.

Kanalizacijske cevi se mora polagati na peščeno posteljico, ki ne sme biti tanjša od 10 cm, ko gre za skalna ali trda tla – 15 cm. Najmanjša globina zanje je 1,2 m, priporočeno pa vsaj 2 m. Cevi za padavinsko vodo lahko polagamo na minimalni globini 1 m (Slokan, 2003). Pri polaganju kanalizacijske cevi smo upoštevali pravila za uporabo materiala cevi, izvedbo posteljice in predpisane globine. Zaradi prostorske stiske smo v bazenih kršili pravilo križanja in odmikov vodov s kanalizacijo, kar naj ne bi vplivalo na vertikalno ločljivost oziroma rezultate. Pripravili smo peščeno posteljico debeline približno 10 cm iz peska zrnivosti 0–4 mm in cev obsuli ter prekrili z enakim materialom v debelini približno 10–15 cm nad temenom, kot prikazuje slika 53. Lastnosti, globina in dolžina vgrajene kanalizacijske cevi so predstavljene v preglednici 15.

Preglednica 15: Vgrajena kanalizacijska cev v testni bazen.

Table 15: Sewage pipes installed into testing pools.

Proizvajalec	OSTENDORF KUNSTSTOFFE
URL	ostendorf-kunststoffe.com
Tip kanalizacije	gravitacijski
Material (SDR 11)	PE200
Nazivni premer (mm)	DN/OD 125 × 3,2
Dolžina cevi (cm)	205,3
Globina cevi (cm)	170
Št. testnega bazena	2
Zap. št. infra.	10



Slika 53: a) Izkop jaška za vgradnjo, b) Priprava posteljice, c) Vgrajena kanalizacijska cev Ostendorf Kunststoffe PE 200 DN/OD 125 × 3,2 v bazen 2.

Figure 53: a) Excavation of the trench for installation; b) Preparing the sub-base for pipes; c) Sewage pipe installation, Ostendorf Kunststoffe PE 200 DN/OD 125 × 3,2 into pool 2.

3.5.4 Vgrajeni električni vodi

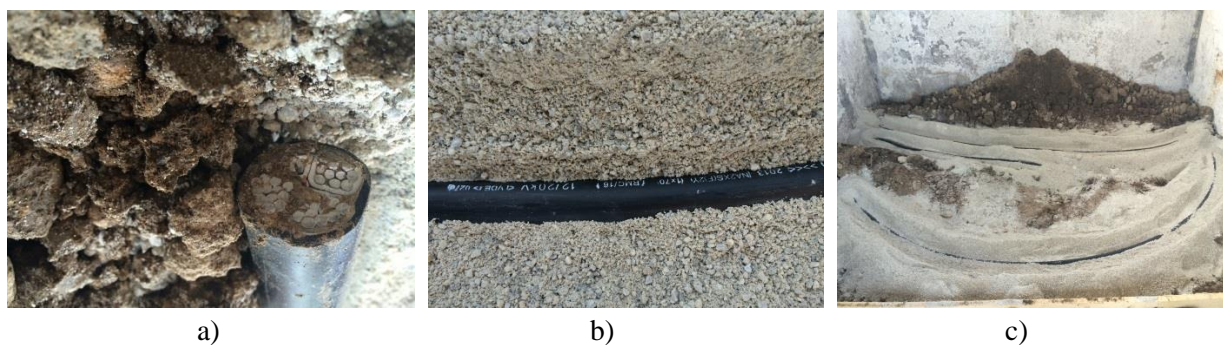
Osnovni kriterij pri izbiri načina polaganja električnega voda (neposredno v zemljo ali kabelsko kanalizacijo) je, da z najmanjšimi stroški zagotovimo energijo uporabnikom in izpolnimo vse tehnične zahteve. Pri odločanju moramo upoštevati, da je investicijska vrednost elektrokabelske kanalizacije (EKK) v povprečju od 4- do 5-krat višja kot neposredno polaganje kablov. Tehnično-ekonomsko je najbolj optimalno polaganje kablov neposredno v zemljo (GIZ TS-8, 2014).

Upoštevali smo smernice, da se na površinah, kot so pločniki in trgi, kabli polagajo kombinirano, torej neposredno in z zaščito. Za mestna območja se navadno uporablja kabelska kanalizacija, poskuša se tudi z neposrednim polaganjem. V preteklosti so kable nizke in srednje napetosti polagali neposredno v zemljo, zaščito kablov s cevmi so uporabljali samo pri križanjih komunalnih vodov in druge GI. Glede na starost omrežja v Sloveniji in tujini ocenjujemo, da je obseg neposredne vgradnje v zemljo večji od 50 % obstoječe vgrajene električne GI. V skladu s smernicami ter osnovnimi zakonitostmi za projektiranje in izvedbo, tipizacijo omrežnih priključkov, tipskih presekov in minimalnih globin vodnikov za nizko- (nazivno napetostjo 0,4 kV) in sredjenapetostno omrežje (nazivno napetostjo 1 kV, 10 kV, 20 kV in 35 kV) (GIZ TS-01, 2005) smo v bazene vgradili 12/20 kV enožilni kabel 1 × 70 z aluminijastim vodnikom srednje napetosti in 0,6–1 kV kabel 4 × 70 z aluminijastimi vodniki in dodatno bakreno žilo preseka 1,5 mm² nizke napetosti na globini 0,80 m, kot prikazuje slika 54. Lastnosti, globine in dolžine vgrajenih električnih vodov so predstavljene v preglednici 16.

Preglednica 16: Vgrajeni električni vodi v testnih bazenih.

Table 16: Electricity lines installed into testing pools.

Proizvajalec	ELKA	SKW
URL	elka.hr	skw.at
Oznaka voda	N2XS(F)2Y, NA2XS(F)2Y	E-AY2Y-J 4X70 SM+1,5RE B(N)
Tip voda	SN – srednja napetost	NN – nizka napetost
Nazivna napetost	12/20 kV	0,6–1 kV
Premer voda (mm)	31,0	31,2
Dolžina cevi (cm)	294,3	252,1
Globina cevi (cm)	80	80
Št. testnega bazena	3	3
Zap. št. infra.	11	12



Slika 54: a) Električni vod SKW 4 × 70 (NN); b) Električni vod ELKA 1 × 70 (SN); c) Vgrajena voda SKW 4 × 70 (NN) in ELKA 1 × 70 (SN) v bazen 3.

Figure 54: a) SKW power line 4x70 (NN); ELKA power line 1 × 70 (SN); c) Installation of SKW 4 × 70 (NN) and ELKA 1 × 70 (SN) into pool 3.

3.5.5 Vgrajena kabelska kanalizacija in vodi elektronskih komunikacij

Za polaganje elektronskih komunikacij v voziščne konstrukcije se uporabljajo ožlebljene cevi izbranega premera. Cevi so sestavni del kabelske kanalizacije in mehansko ščitijo uvlečene kable pred poškodbami. Danes se v večini primerov gradnje ne samo hrbtničnega, ampak tudi dostopovnega omrežja uporabljajo optični kabli. 3. člen Zakona o elektronskih komunikacijah – ZEKom (Uradni list RS, št. 109/2012) opredeljuje kabelsko kanalizacijo kot horizontalni gradbenoinženirski objekt, sestavljen iz kanalov, cevi in podobnega, ki omogoča postavitve in vzdrževanje telekomunikacijskih vodov. Navodila za graditev kabelske kanalizacije iz PE-cevi s profilirano zunanostjo in gladko notranjo površino podajajo pravila postavitve in graditve kabelske kanalizacije v podjetju Telekom Slovenije, d. d. (TS, 2000).

PE-cevi za kabelsko kanalizacijo so cevi krožnega premera, izdelane iz polietilena ustreznih mehanskih in drugih lastnosti. Zunanje stene cevi so ožlebljene in profilirane, notranost je gladka. Obodna togost cevi je 4 KN/m², v posebnih pogojih se uporabljajo PE-cevi z obodno togostjo 8 KN/m². Glede na premer se priporoča uporaba cevi v naslednje namene:

- DN/OD 125 za glavno kabelsko kanalizacijo, manj pogosto DN/OD 200 in DN/OD 160,
- DN/OD 110 za prekope in odcepe večjih kapacitet kablov iz jaškov,
- DN/OD 90 in DN/OD 75 za zaščitne cevi in izvode iz jaškov v krajevnem kabelskem omrežju, razvodnem naročniškem omrežju in kabelskorazdelilnem sistemu,
- DN/OD 63 za zaščitne cevi v razvodnem naročniškem omrežju in kabelskorazdelilnem sistemu in
- DN/OD 50 in DN/OD 40 za priključke v smislu zaščitne cevi v razvodnem naročniškem omrežju in kabelskorazdelilnem sistemu kot uvodne cevi do vzdanih omaric v fasadah in do pomožnega jaška.

Navadno mora globina od temena cevi do površinske plasti znašati za cevi, položene v pločniku, 0,5 m, in za cevi, položene v vozišču, 0,80 m. Pri določitvi globine je treba upoštevati tudi debeline plasti voziščne konstrukcije, število vrst cevi in medsebojno razdaljo med različnimi vrstami (TS, 2000).

Pri polaganju kabelskokanalizacijskih cevi elektronskih komunikacij smo upoštevali pravila za graditev kabelske kanalizacije iz PE-cevi s profilirano zunanostjo in gladko notranjo površino,

izvedbo posteljice in predpisane globine. Izjemo smo naredili pri vgrajenih priključkih, ki smo jih postavili na globino 0,4 m. V praksi se pogosto srečujemo s precej bolj plitko vgrajenimi priključki od predpisanih 0,5 m. Zaradi prostorske stiske smo v bazenih kršili pravilo križanja in odmikov vodov, kar naj ne bi vplivalo na vertikalno ločljivost oziroma končne rezultate. Pripravili smo peščeno posteljico debeline približno 8–10 cm iz peska zrnivosti 0–4 mm in cev obsuli ter prekrili z enakim materialom v debelini približno 10–12 cm nad temenom. Lastnosti, globine in dolžine vgrajenih kabelskih kanalizacij so predstavljene v preglednici 17.

V cevi velikih nazivnih premerov se pogosto uvleče cevi manjših premerov, ki dodatno ščitijo pred mehanskimi poškodbami, kot prikazuje slika 55. V cev velikega premera PE DN/OD 125 proizvajalca Minerva smo uvlekli cev PE DN/OD 40 proizvajalca Rumaplast. V cev malega premera smo nato uvlekli več optičnih kablov. Te smo uvlekli tudi v cev PE DN/OD 40 proizvajalca Minerva za priključitev končnega uporabnika. Lastnosti in tipi uvlečenih optičnih kablov so predstavljeni v preglednici 18.

Preglednica 17: Vgrajene kabelske kanalizacije v testnih bazenih.

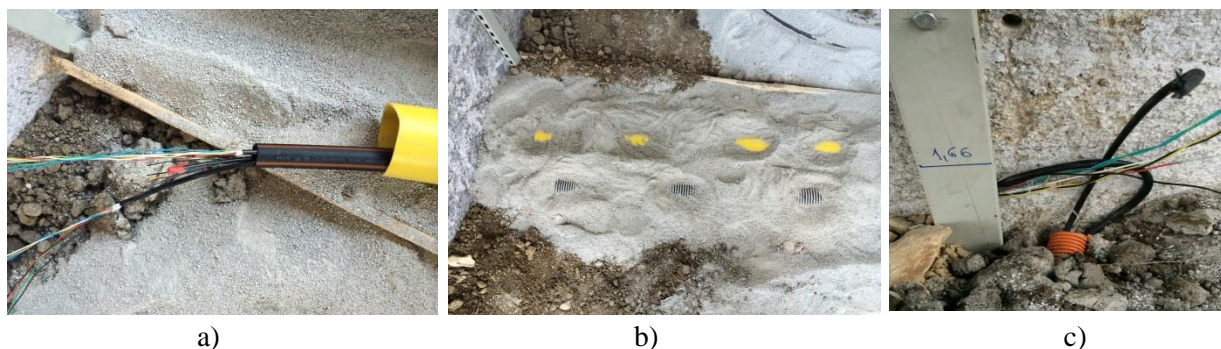
Table 17: Cable ducts installed into testing pools.

Proizvajalec	MINERVA	RUMAPLAST	RUMAPLAST	MINERVA	MINERVA	MINERVA
URL	minerva.si	rumaplast.com	rumaplast.com	.minerva.si	minerva.si	minerva.si
Tip kanalizacije	glavna/ primarna	priključek	glavna/ sekundarna	priključek	priključek	glavna/ primarna
Material	PE80	PE80	PE80	PE80	PE80	PE80
Nazivni premer DN/OD (mm)	125	40	2 × 50	40	50	110
Dolžina cevi (cm)	207,6	204,5	255,6	279,5	273,0	229,5
Globina cevi (cm)	80	80	80	40	40	80
Št. testnega bazena	1	(uvlečena v DN/OD 125)	1	1–2	2–3	1
Zap. št. infra.	13	/	14	15	16	17

Preglednica 18: Uvlečeni optični kabli.

Table 18: Optical fibre cables.

Proizvajalec	ACE – TKE	ACE – TKE	ACE – TKE	ACE – TKE
URL	nexans.com	.nexans.com	nexans.com	nexans.com
Tip optičnega kabla	LTC RP 72 × SM G.657.A1 (6 × 12)	LTC RP 24 × SM G.657.A1 (4 × 6)	LTC RP 48 × SM G.657.A1 (4 × 14)	LTC RP 4 × SM G.657.A1
Št. vlaken	72	24	48	4
Nazivni premer (mm)	9	10,5	9	6,8
Nosilna cev	MINERVA PE DN/OD 40	MINERVA PE DN/OD 125	MINERVA PE DN/OD 125	MINERVA PE DN/OD 40
Globina cevi (cm)	40	80	80	40
Št. testnega bazena	1–2	1	1	1–2



Slika 55: a) Kabelskokanalizacijska cev velikega premera Minerva PE DN/OD 125 / Rumplast PE DN/OD 40 / ACE – TKE RP 24 in ACE – TKE RP 24 RP 48 optična kabla; b) Vgrajeni cevi Minerva PE DN/OD 125 in Minerva PE DN/OD 110; c) Vgrajena cev priključka Minerva PE DN/OD 40.

Figure 55: a) Cable ducting of large diameter Minerva PE DN/OD 125 / Rumplast PE DN/OD 40 / ACE – TKE RP 24 and ACE – TKE RP 24 RP 48 of optical fibre cable; b) Installation of Minerva PE DN/OD 125 and Minerva PE DN/OD 110 tubes; c) Installation of Minerva PE DN/OD 40 connection.

V praksi se pogosto srečujemo z vodi elektronskih komunikacij oziroma s kabelskorazdelilnimi sistemi, ki jih predstavljajo koaksialni kabli. Ti so bili v preteklosti namenjeni prenosu RTV-signala, danes pa omogočajo prenos dodatnih multimedijskih vsebin, kot so internet, telefon in televizija. Koaksialni kabel je namenjen prenosu visokofrekvenčnih signalov. Sestavljen je iz električnega vodnika v notranjosti, ki ga obdaja izolacija, sledi pleteni oklep iz električnega prevodnika in na koncu še plast iz odporne plastike za zaščito. Pri gradnji kabelskorazdelilnih sistemov so v preteklosti veliko koaksialnih kablov vgrajevali brez zaščitnih cevi in neposredno v zemljo. Enega od takšnih primarnih vodov smo vgradili v testni bazen številka 3, ki je predstavljen v preglednici 19.

Preglednica 19: Vgrajeni koaksialni kabel.

Table 19: Coaxial cable installed into testing pools.

Proizvajalec	COMMSCOPE
URL	commscope.com
Tip kabla	5514902 / QR 860 JCASS SM MT
Material	PE80
Nazivni premer (mm)	24,38
Dolžina cevi (cm)	139,9
Globina cevi (cm)	80
Št. testnega bazena	3
Zap. št. infra.	18

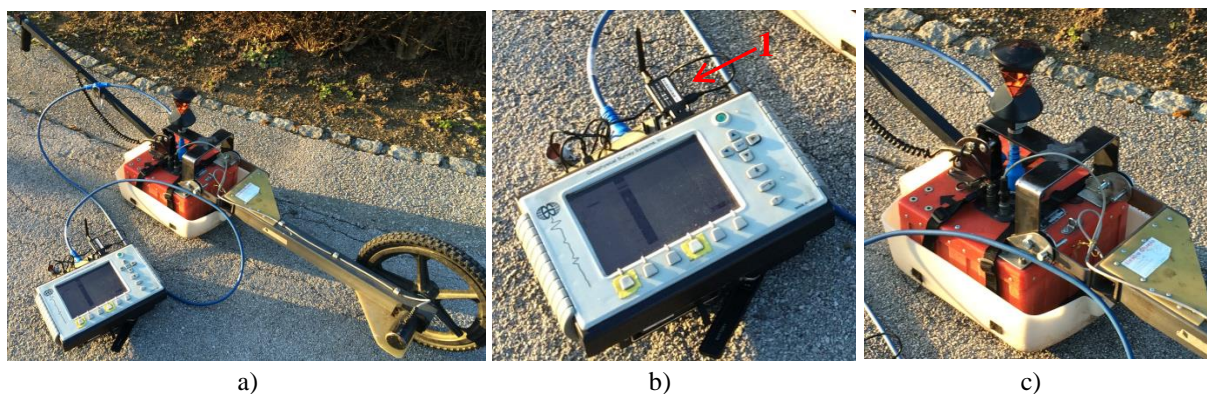
»Ta stran je namenoma prazna«

4 IZVAJANJE GEORADARSKIH RAZISKAV

4.1 Pregled uporabljenih instrumentov in programske opreme pri razvoju modela

Pri georadarskih meritvah je uporabljen georadarski sestav ameriškega proizvajalca SIR (GSSI) – 3000 (angl. Geophysical Survey System). Kot večino današnjih georadarskih sistemov ga sestavljajo kontrolna enota DC-3000 s tipkovnico, 8.4-palični TFT-barvni zaslon ločljivosti 800×600 in priključki (USB, RS 232, reža pomnilniške kartice, UTP) ter vtičnik za povezavo z anteno. Kontrolna enota omogoča pregledovanje podatkov v realnem času ali poznejše pregledovanje. Vgrajeni 32-bitni Intel StrongArm – RISC 206 MHz procesor generira, sledi in nadzoruje anteno, kontrolne signale in interval vzorčenja ter shranjuje povratne signale. Napaja se prek 10,8 V baterijskih vložkov. Uporabljene so bile zaščitene monostatične 270, 400 in 900 MHz antene. Pod dodatno opremo georadarskega sistema prištevamo voziček in merilno kolo za merjenje razdalje. Merilno kolo služi za proženje signalov v odvisnosti od opravljene razdalje in kot groba kontrola izmerjenih razdalj posameznih profilov. Pred izmero je treba umeriti merilno kolo na znani razdalji. Proizvajalec navaja natančnost umerjenega merilnega kolesa ob izpolnjenih pogojih dobrega oprijema in gladke površine $\pm 2 \%$ merjene dolžine (GSSI, 2015). Kadar merimo v časovni domeni brez merilnega kolesa, se signali prožijo v časovnem intervalu, podanem pred meritvijo. Za merjenje v časovni domeni je priporočljiva enakomerna hitrost gibanja. Vsi izmerjeni podatki se zapišejo v GSSI 8- ali 16-bitno datoteko DZT.

Za potrebe te doktorske disertacije je bil celoten sistem nadgrajen z nosilcem ter nastavkom za reflektor, nameščenim točno nad središčno točko georadarske antene. Tako nadgrajen sistem je omogočal izvedbo terestričnih kinematičnih opazovanj. Vzpostavitev brezžične (angl. bluetooth) povezave med uporabljenim elektronskim tahimetrom in georadarskim sistemom v realnem času je omogočala nadgradnja sestava še z vmesnikom (bluetooth-serijska vrata RS 232) z zunanjo dipolno anteno (BT-232B-E). Slika 56 prikazuje nadgrajen georadarski sistem SIR 3000.



Slika 56: a) Predelan georadarski sistem SIR 3000 z vlečno palico in merilnim kolesom; b) Kontrolna enota in BT-232B-E vmesnik: (1) z zunanjo dipolno anteno; c) Reflektorski nastavek nad 400 MHz anteno in 360° reflektor Leica GRZ4.

Figure 56: a) GPR system SIR 3000 redesigned for the needs of thesis with the drag rod and measuring wheel; b) Control unit and bluetooth RS 232 adapter (BT-232B-E): (1) external dipole antenna; c) Reflector adapter with a mast over 400 MHz antenna and Leica GRZ4 all-round reflector.

Za merjenje horizontalnih kotov, zenitnih razdalj in poševnih dolžin v terestrični metodi je uporabljen elektronski tahimeter Leica TCRP 1201+ (angl. Terrestrial Positioning System – TPS), ki poleg

sistema za avtomatsko viziranje tarče (AVT) (angl. Automatic Target Recognition – ATR) in sistema za avtomatsko iskanje tarče (AIT) omogoča avtomatsko sledenje tarče (AST) in samodejno izvajanje meritev. Funkcionalnost ATR bistveno zmanjša pogoške operaterja, je pa po drugi strani podvržena grobim pogoškem pri viziranju reflektorjev v isti smeri. Podrobnejši opis lahko najdemo v literaturi Valh et al. (2008, 2009). Deklarirani standardni odklon izmerjenih kotov v načinu ATR po standardu ISO 17123-3 je $\sigma_{\alpha} = 1''$, standardni odklon merjenih dolžin s standardnim reflektorjem je $\sigma_d \leq (1 \text{ mm}; 1,5 \text{ ppm})$ (Leica TPS1200+, 2008). Pri vseh meritvah je bil uporabljen stativ Leica GST20, podnožje Leica GDF 112-1 ter reflektorja Leica GPR121 in Leica mini GMP 101. Pri terestričnih kinematičnih opazovanjih je bil uporabljen 360° reflektor Leica GRZ4, prav tako proizvajalca Leica Geosystems. Za 360° reflektor Leica GRZ4 proizvajalec navaja standardni odklon od prave vrednosti višine 2,4 mm in položaja 0,5 in 1,5 mm po posameznih oseh ob identičnih pogojih kot za reflektor Leica GPR1 (glej razdelek 2.7). Pri RTK-metodi izmere GNSS je uporabljen dvofrekvenčni GNSS-sprejemnik Topcon HiPer Pro.

Izravnava višinske mreže, podrobno opisana v razdelku 4.2.2.1, je izvedena z računalniškim programom VimWin ver. 5.1, razvitem na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Podrobnejši opis je v literaturi Ambrožič in Turk (2007). Izravnava položajne mreže, ki je podrobno opisana v razdelku 4.2.2.2, je izvedena z računalniškim programom GemWin ver. 4.0 (Ambrožič et al., 2007).

Vsi postopki vrednotenja in povezovanja datotek po času so bili izvedeni v nizu naših programskih rešitev, razvitih v sklopu raziskave te disertacije. Programska orodja za združevanje položajnih in georadarskih podatkov so zasnovana v skriptnih jezikih Python, PHP in Bash. Programe smo poimenovali DST_converter, Parse in Run. Podrobnejši opisi izvedenih nalog so opisani v razdelku 4.3. Uporaba skriptov se pogosto veže na avtomatizacijo opravil, ki bi za njihovo izvajanje lahko vzela veliko časa. Eden od razlogov je enostavno vpisovanje zaporedja ukazov v tekstovno datoteko, ki jo tolmač prebere in izvede. Posledično je izvajanje programov počasnejše.

Program DST_converter je napisan v objektno orientiranem odprtokodnem jeziku Python, ki združuje funkcijski in ukazni pristop. Prevajanje iz programskega v strojni jezik temelji na tolmačenju (angl. interpreter) v kombinaciji s prevajalnikom. Prednost programskega jezika je v preprosti sintaksi in veliki knjižnici (Rossum, 1995). Program Parse je napisan v odprtokodnem skriptnem programskem jeziku PHP (angl. Hypertext Preprocessor), medtem ko je program Run napisan v skriptnem programskem jeziku Bash. Vsi razviti skriptni programi za namene te disertacije so poganjani v operacijskem sistemu Linux na osebem računalniku, ki ga poganja 2,6 GHz procesor s sistemskim pomnilnikom DDR3, kapacitete 4 GB.

Za izračun ujemanja in poravnave radargramov ter vrednotenje rezultatov in uspešnost slikovnega ujemanja je bila razvita naša lastna programska rešitev, ki smo ji nadeli ime Poravnava. Program je napisan v programskem jeziku C++. Delovanje in funkcionalnosti so opisani v razdelku 4.5.

Poznamo več ozko specializiranih programskih orodij za obdelavo georadarskih podatkov. Pri obdelavi podatkov in njihovi interpretaciji je uporabljeno programsko orodje ReflexW 7.5 proizvajalca Sandmaier Softwares. Posamezne funkcije omenjene programske opreme so uporabljene tudi za končno 3D-interpretacijo in vizualizacijo. Ker nam ponujene možnosti prikazov izbranih rezultatov niso zadostovale, je uporabljen AutoCAD Civil 3D, v katerem so rezultati vizualizirani v 3D-prostoru. V osnovi je AutoCAD Civil 3D-program za načrtovanje nizkogradenj, vodnih gradenj in komunalne infrastrukture, nudi pa tudi velik nabor uporabnih ukazov pri vizualizaciji.

Pri določevanju volumenskega deleža vsebnosti vode z gravimetrično metodo v posameznih plasteh testnih bazenov je uporabljen sušilnik tipa WTB Binder, Tuttlingen LB8115800002020, pri tehtanju posušenih vzorcev pa tehtnica Sartorius ED 224S. Podrobnejši opis metode je podan v razdelku 4.6. Ocena relativne dielektričnosti z impedančno spektroskopijo je s pomočjo Kemijskega inštituta Ljubljana izvedena na merilnem instrumentu Bio-logic SP-200, s katerim smo izmerili impedančni odziv. Dobljeni rezultati so analizirani v programskem paketu ZView 2 (Scribner). Podrobnejši opis metode je podan v razdelku 4.7.1.

Statistična računalniška obdelava podatkov ter njihova grafična predstavitev je izvedena v prosto dostopnem odprtokodnem programskem okolju R-project.

Pri izdelavi digitalnega ortofota je uporabljen večrotorni mali brezpilotni letalnik (BPL), prikazan na sliki 57, ki ga poganja šest avtonomnih elektromotorjev z dvokrakimi elisami, t. i. šest-kopter (angl. hexacopter). Kot vsa sodobna zračna plovila, ki se uporabljajo v geodeziji, ima tudi ta pritrjeno stabilizirano nosilno platformo s senzorjem – fotografska kamera SONY α 7R za zajem fotografij. Osnovno georeferenciranje zajetih fotografij in vodenje letalnika omogočajo vgrajen GNSS-sprejemnik, elektronski barometer, žiroskop, kompas in komandna plošča, prek katere operater upravlja plovilo. Stik plovila s tlemi omogočajo tri pristajalne noge. Za programiranje letov BPL je uporabljena brezplačna programska oprema MikroKopter-Tools, delujoča nad platformo Google Earth. Podatki snemanja so obdelani s programskim modulom Imagine UAV v Erdas Imagine 2015 okolju.



a)



b)

Slika 57: a) BPL-šest-kopter; b) Komandna plošča.

Figure 57: a) Unmanned aerial vehicle – hexacopter; b) Remote control.

4.2 Vzpostavitev geodetske mreže za določevanje položaja infrastrukture in georadarja

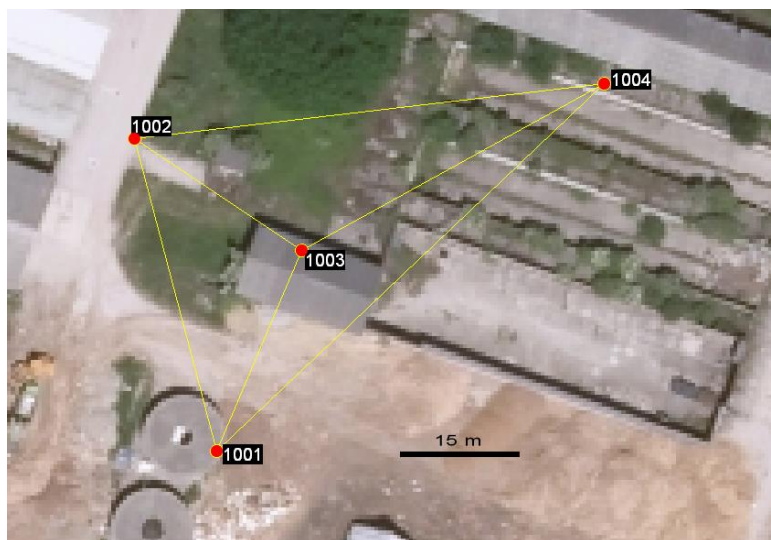
Trajno stabilizirane in označene točke v okolici testnih bazenov smo z meritvami povezali v geodetsko mrežo, ki pomeni geodetsko osnovo za določevanje položaja. Referenčne točke definirajo geodetski datum mreže, in tiste, ki tvorijo geodetsko mrežo, so podlaga za povezovanje meritev (določevanje položaja infrastrukture in georadarja) z referenčnim sestavom. Pri vzpostavitvi geodetske mreže pogosto uporabljamo kombinacijo metod GNSS in precizne klasične terestrične izmere. Namen kombinacij obeh izmer je realizacija stabilnega referenčnega sestava za nadaljnja terestrična opazovanja. Pri vzpostavitvi geodetske mreže sta uporabljeni obe metodi: metoda GNSS (RTK-VRS) za vzpostavitev mreže in pridobitev približnih položajev ter višin točk, in klasična terestrična metoda, s katero nadzorujemo ter izboljšamo položaje in višine točk. Glavni cilj položajne in višinske

izravnave klasičnih terestričnih geodetskih opazovanj je določiti najverjetnejše položaje in višine točk geodetske mreže s pripadajočo natančnostjo.

Vse rezultate v tej doktorski disertaciji podajamo v državnem koordinatnem sistemu, ki je razdeljen na dve komponenti: horizontalno in višinsko. Horizontalno komponento državnega koordinatnega sistema predstavlja realizacija ETRS89/TM koordinatnega sistema v Sloveniji. Ograde sistema predstavljajo koordinate točk v ETRS89/TM koordinatnem sistemu, določene v okviru izmer EUREF (angl. EUropean REference Frame). Referenčno ploskev sistema predstavlja rotacijski referenčni elipsoid GRS 80 z veliko polosjo $a = 6.378.137,00$ m in prvo sploščenostjo $f = 1/298,257222101$. Višinsko komponento predstavlja temeljna geodetska višinska mreža Republike Slovenije, podana z višinami reperjev v normalnem ortometričnem sistemu višin. Običajno višinam točk določimo t. i. nadmorske oziroma fizikalne višine (normalne ortometrične višine), ki so vezane na težnostno polje Zemlje. Za prehod iz elipsoidnih višin, določenih s sodobnimi geodetskimi merskimi tehnikami (GNSS) v nadmorske višine, pa je nujno poznavanje kakovostnega modela geoida. Povezavo med elipsoidnimi in normalnimi ortometričnimi oziroma nadmorskimi višinami predstavlja geoidna višina (N), ki pomeni oddaljenost elipsoida od geoida. Trenutno je v veljavi geoid, ki ga je leta 2000 v svoji doktorski disertaciji določil B. Pribičević (Koler et al., 2007 in 2011). Vse podane višine se nanašajo na nadmorske višine, preračunane iz elipsoidnih višin.

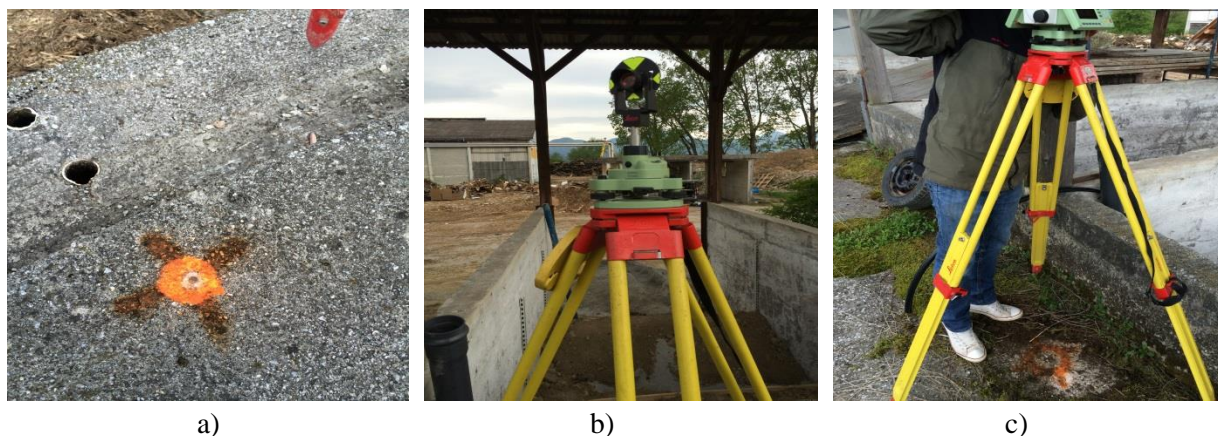
4.2.1 Izbira položaja, stabilizacija in signalizacija referenčnih točk geodetske mreže

Ključnega pomena pri definiranju položaja referenčnih točk, ki določajo geodetski datum naše mreže, je struktura reliefa in postavljenih ovir na predmetnem območju. Izbrani položaj mora omogočiti stabilnost v daljšem časovnem obdobju ter dovoljevati ustrezno stabilizacijo. Prav naravne danosti niso omogočale najbolj primerne oblike mreže, le-ta je prikazana na sliki 58. Izbran položaj referenčnih točk 1001, 1002 in 1003 omogoča vidnost testnih bazenov optimalno, medtem ko položaj točke 1004 tega zaradi visokega rastja in grajenih elementov ne omogoča. Položaj je določen zunaj območja pričakovanih gradbenih posegov pri vzpostavitvi voziščnih konstrukcij v bazenih, hkrati pa čim bližje testnim bazenom. Fizično stabilnost mreže smo dosegli s stabilizacijo točk na predvidoma stabilnih tleh, z navadnim kovinskim čepom z luknjico v bitumenski beton utrjenih površin.



Slika 58: Geodetska mreža – razvita na območju testnih bazenov.
Figure 58: Geodetic network developed in the area of testing pools.

Točke je pomembno signalizirati z reflektorji z znanimi adicijskimi konstantami. Uporabljena sta reflektorja Leica GPR121 (± 0 mm) in Leica mini GMP101 (+17,5 mm). Upoštevane so adicijske konstante, kot jih navaja proizvajalec. Centriranje in horizontiranje stativov Leica GST20 oziroma podnožij Leica GDF 112-1 nad točko je opravljeno z laserskim grezilom elektronskega tahimetra, ki se jih v nadaljevanju ni več premikalo, da bi se izognili pogreškom centriranja. Slika 59 prikazuje stabilizacijo in signalizacijo točk v geodetski mreži ter centriranje in horizontiranje nad njimi.



Slika 59: a) Stabilizacija referenčnih točk (1001) v geodetski mreži; b) Signalizacija stojišča (1003) z mini reflektorjem LEICA Mini GMP101; c) Centriranje in horizontiranje (1003) stativa oziroma podnožja.

Figure 59: a) Stabilization of reference points (1001) in geodetic network; b) Signalization of reference and orientation points (1003) with LEICA Mini GMP101 reflector; c) Centering and levelling (1003) a tripod.

4.2.2 Določevanje položaja referenčnih točk geodetske mreže

Pri določevanju najverjetnejšega položaja referenčnih točk geodetske mreže je uporabljena klasična terestrična izmera, h kateri štejemo triangulacijo, trilateracijo, trigonometrično višinomertvo in geometrični nivelman. Referenčne točke so v geodetsko mrežo povezane z merjenjem horizontalnih kotov, poševnih dolžin in zenitnih razdalj z uporabo elektronskega tahimetra. Višinske razlike med točkami v mreži so izračunane s pomočjo trigonometričnega višinomertva. Določevanje višinskih razlik med mrežnimi točkami sloni na osnovi natančno merjene zenitne razdalje in poševne dolžine z elektronskim tahimetrom. Natančnost metode je na kratkih dolžinah primerljiva z natančnostjo geometričnega nivelmana. Za merjenje horizontalnih kotov, zenitnih razdalj in poševnih dolžin je uporabljen elektronski tahimeter Leica TCRP 1201+, podrobneje je opisan v razdelku 4.1.

Namen obdelave klasičnih terestričnih meritev je pridobitev vhodnih parametrov za končno oceno najverjetnejšega položaja točk v mreži. Klasične terestrične meritve so z namenom eliminacije instrumentalnih pogreškov (kolimacijski pogrešek, pogrešek horizontalnosti osi Y in indeksni pogrešek) in povečanja natančnosti opravljene v desetih girusih, iz katerih so izračunane srednje vrednosti posameznih meritev. Minimalno število sedmih ponovitev ob uporabi sistema ATR predlagajo Koler et al. (2010). Zenitne razdalje in poševne dolžine so bile merjene sočasno s horizontalnimi koti v obeh krožnih legah.

Sledila je redukcija izmerjenih dolžin za meteorološke, geometrijske in projekcijske popravke. V postopku meteorološke redukcije je upoštevan samo prvi popravek hitrosti, drugi je zaradi neznatnega

vpliva – njegova vrednost pri razdalji 70 m (več od najdaljše izmerjene razdalje v mreži) znaša približno 10^{-8} mm, zanemarljiv. Ustrezna meteorološka redukcija merjenih dolžin je opravljena na podlagi ugotovljene optične gostote atmosfere, odvisne predvsem od izmerjene temperature (T) ter zračnega tlaka (p) na začetku in koncu vsakega girusa. Meritve so izvedene samo ob elektronskem tahimetru, povprečne temperature so znašale $11\text{ }^{\circ}\text{C}$, medtem ko je povprečni zračni tlak znašal $1018,2\text{ hPa}$. Zaradi izredno kratkih dolžin med točkami je vpliv vlažnosti oziroma delni tlak vodne pare v meteorološki redukciji dolžin zanemarljiv. Vpliv delnega tlaka vodne pare, ki ga določamo s pomočjo psihometrov ali higrometrov, bi pri povprečno izmerjeni temperaturi našega delovišča ($T = 11\text{ }^{\circ}\text{C}$) povzročil relativni pogrešek dolžine le $5,9 \cdot 10^{-7}$. Izmerjene dolžine temeljijo na referenčnem lomnem količniku n_0 . Referenčni podatki uporabljenega instrumenta Leica TCRP 1201+ so $\lambda_{Neff} = 0,658\text{ }\mu\text{m}$, $T_0 = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_0 = 1013,25\text{ hPa}$, $n_0 = 1,0002863$, prav tako sta prevzeti adicijska in multiplikacijska konstanta, ki sta zapisani v Poročilu o preizkusu instrumenta. Redukcije normalnih atmosferskih pogojev v dejanske so izvedene z interpolacijo po enačbi Barrell-Sears, ki jo je preuredil Kohlrausch (Kohlrausch, 1985).

Redukcija dolžin je bila izvedena na nivo terena oziroma točk geodetske mreže. Predhodni pogoj oziroma vhodni podatek v redukcijo je redukcija dolžine na nivo višine elektronskega tahimetra, ki je izračunana na podlagi izmerjenih zenitnih razdalj ter višin instrumenta in reflektorja. Pri geometričnih popravkih je izpuščen popravek zaradi ukrivljenosti merskega žarka, njegova vrednost pri razdalji 70 m znaša 10^{-9} mm.

Projekcijski popravki so bili upoštevani v smislu redukcije dolžine na ničelno nivojsko ploskev, ki jo predstavlja referenčni elipsoid, in v zadnjem koraku v ravnino modulirane transverzalne Mercatorjeve projekcije. Podrobnejši opis lahko najdemo v literaturi Kogoj (2005).

Neobhodni podatek v redukcijo dolžin na referenčni elipsoid so višine točk v geodetski mreži, izračunane na podlagi višinskih razlik med točkami.

4.2.2.1 Izravnava višinske mreže

Višinske razlike so bile določene z metodo trigonometričnega višinomerstva. Metoda je omejena z instrumentalnimi pogreški, predvsem pa z vertikalno refrakcijo, ki je posledica spreminjajočih se optičnih lastnosti zraka. Pogrešek višinske razlike trigonometričnega višinomerstva s sodobnim elektronskim tahimetrom in uporabo znanih metod meritev narašča linearno z dolžino po enačbi (Kogoj, 2005):

$$\sigma_{\Delta h} \approx a \cdot 10^{-6} D \quad (80)$$

kjer je vrednost a med 5 in 7. Njegova vrednost pri razdalji 70 m (več od najdaljše izmerjene razdalje) znaša okoli $0,42\text{ mm}$.

Na osnovi nadštevilnih meritev, ki so pogoj za izravnavo, pridobimo najverjetnejše neznanke in pripadajoče parametre natančnosti. Izračunane višinske razlike so izravnane po metodi najmanjših kvadratov s posredno metodo. Za višinsko izravnavo je uporabljena programska oprema, navedena je v razdelku 4.1. Kot vhodne podatke smo uporabili približne višine točk, pridobljene z metodo GNSS (RTK-VRS). Točka 1001 je bila izbrana za referenčno. Tako so pridobljene najverjetnejše višinske razlike med točkami v mreži, najverjetnejše višine točk in njim pripadajoči parametri natančnosti.

Globalno mero natančnosti podaja a posteriori standardni odklon enote uteži (srednji pogrešek utežne enote).

Standardni odklon enote uteži po izravnavi izračunamo po enačbi (Macarol, 1977):

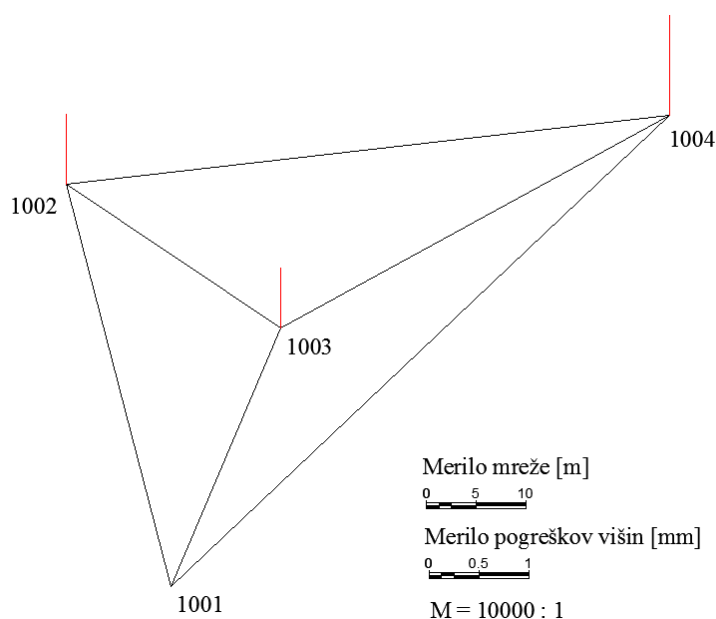
$$\hat{\sigma}_0 = m_0 = \sqrt{\frac{[pvv]}{n-u}} \quad (81)$$

kjer je $r = n - u$ število nadštevilnih opazovanj, p utež in v popravek merjene višinske razlike po izravnavi. Srednji odklon utežne enote znaša 0,03888.

V preglednici 20 so zbrani rezultati izravnave višinske mreže in ocena natančnosti določitve višin točk v mreži. Natančnost določitve višin točk v geodetski mreži je grafično predstavljena na sliki 60. Ugotovimo lahko, da so glede na uporabljen instrumentarij in metodo izmere izračunane natančnosti določitve novih točk v pričakovanih mejah.

Preglednica 20: Definitivne višine točk v geodetski mreži in njihove ocene natančnosti.
 Table 20: Definitive heights of points in geodetic networks and accuracy estimation.

Točka	Približna višina (m)	Popravek višine (m)	Definitivna višina H (m)	σ_H (m)
1001	257,2550	/	/	/
1002	255,1900	-0,0013	255,1887	0,0007
1003	255,2600	-0,0008	255,2592	0,0006
1004	255,7320	-0,0015	255,7305	0,0010



Slika 60: Natančnost določitve višin točk v mreži.
 Figure 60: Accuracy of measured height differences.

4.2.2.2 Izravnava položajne mreže

V postopku izravnave položajne mreže so bile uporabljene približne koordinate točk geodetske mreže, določene z metodo GNSS (RTK-VRS), ki je storitev omrežja SIGNAL (Slovenija-Geodezija-NAvigacija-Lokacija), in horizontalne smeri, izračunane na osnovi aritmetične sredine desetih izmerjenih girusov na vsakem od štirih stojišč mreže, kot kotne meritve in reducirane dolžine. Izravnava je izvedena po metodi najmanjših kvadratov, s posredno metodo. Mreža je izravnana kot prosto. Tako so pridobljeni najverjetnejši položaji točk v mreži in njim pripadajoči parametri natančnosti. Za položajno izravnavo smo uporabili programsko opremo, navedeno v razdelku 4.1.

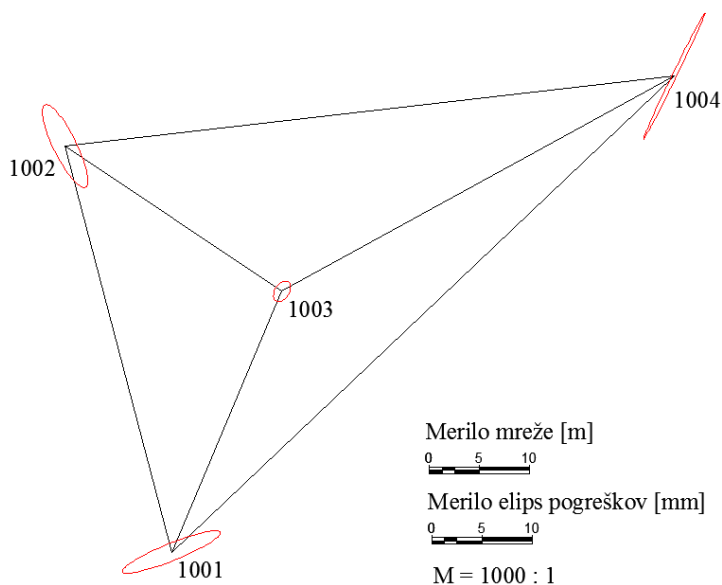
V preglednici 21 so zbrani rezultati izravnave položajne mreže in ocena natančnosti določitev položajev točk v mreži. Slika 61 prikazuje standardne elipse pogreškov določitve položajnih koordinat točk v geodetski mreži.

Preglednica 21: Definitivne horizontalne koord. točk geodetske mreže in njihove ocene natančnosti.

Table 21: Definitive horizontal coordinates of points in geodetic networks and accuracy estimation.

Točka	E (m)	N (m)	σ_E (m)	σ_N (m)
1001	516169,766	124608,480	0,0008	0,0001
1002	516159,189	124648,820	0,0006	0,0002
1003	516180,775	124634,400	0,0002	0,0001
1004	516219,807	124655,800	0,0010	0,0000

Nizke vrednosti cenilk kakovosti horizontalne mreže (standardni odklon enote uteži = 1,26624, standardni odklon smeri = 1,2662", standardni odklon dolžin = 4,0 mm, srednji standardni odklon določitve položaja točke = 0,001 m) kažejo na kakovostno izvedbo meritev, odsotnost grobih pogreškov in zanesljive vrednosti koordinat točk.



Slika 61: Standardne elipse pogreškov določitve položajnih koordinat točk.

Figure 61: Standard error ellipses of positioning coordinates of points.

4.2.3 Določevanje položaja in višine vgrajene infrastrukture v testnih bazenih

Za potrebe določevanja položajev in višin GI v testnih bazenih je izvedena polarna metoda detajlne izmere, s katero neposredno določamo relativne koordinate detajlnih točk glede na dane točke geodetske mreže. Višinske razlike med referenčno točko v mreži in infrastrukturo so izračunane s pomočjo trigonometričnega višinomerstva. Horizontalni položaj in višina objekta sta se evidentirala s temensko točko voda ali cevi na vsakih 15–20 cm, ki hkrati predstavlja tudi središčno točko meritve. Za stojišče smo uporabili definitivne izravnane koordinate točke 1001, orientacijo smo izvedli na dve točki položajne mreže, in sicer na 1002 in 1003. Za izračun koordinat detajlnih točk E_i in N_i smo zato uporabili srednji orientacijski kot. Koordinate detajlne točke vgrajene infrastrukture T_i izračunamo po enačbah (Macarol, 1977; Uren in Price, 2006):

$$E_i = E_{1001} + d_{1001}^i \cdot \sin z_{1001}^i \cdot \sin \left(\frac{v_{1001}^{1002} + v_{1001}^{1003}}{2} - \frac{\alpha_{1001}^{1002} + \alpha_{1001}^{1003}}{2} + \alpha_{1001}^i \right) \quad (82)$$

$$N_i = N_{1001} + d_{1001}^i \cdot \sin z_{1001}^i \cdot \cos \left(\frac{v_{1001}^{1002} + v_{1001}^{1003}}{2} - \frac{\alpha_{1001}^{1002} + \alpha_{1001}^{1003}}{2} + \alpha_{1001}^i \right) \quad (83)$$

$$H_i = H_{1001} + d_{1001}^i \cdot \cos z_{1001}^i + i - l \quad (84)$$

kjer sta v_{1001}^{1002} in v_{1001}^{1003} smerna kota proti točkama 1002 in 1003, α_{1001}^{1002} in α_{1001}^{1003} horizontalna kota proti točkama 1002 in 1003, α_{1001}^i horizontalni kot proti temenski točki i , z_{1001}^i zenitna razdalja proti temenski točki i , d_{1001}^i poševna dolžina proti temenski točki i , i in l višina instrumenta in signala.

Natančnost določitve položaja in višine vgrajene infrastrukture je določena s standardnim odklonom. Pri natančnosti določitve položajev in višin detajlnih točk je treba upoštevati tudi vpliv natančnosti določitve položaja in višine stojišča. Za izračun natančnosti določitve položaja je uporabljen zakon o prenosu varianc in kovarianc z upoštevanjem natančnosti določitve smeri in dolžin, ki jih zagotavlja uporabljen instrument.

$$\begin{aligned} \sigma_{E_i}^2 &= \sigma_{E_{1001}}^2 + \left(\sin z_{1001}^i \cdot \sin \left(\frac{v_{1001}^{1002} + v_{1001}^{1003}}{2} - \frac{\alpha_{1001}^{1002} + \alpha_{1001}^{1003}}{2} + \alpha_{1001}^i \right) \right)^2 \cdot \sigma_{d_{1001}^i}^2 + \\ &+ \left(d_{1001}^i \cdot \cos z_{1001}^i \cdot \sin \left(\frac{v_{1001}^{1002} + v_{1001}^{1003}}{2} - \frac{\alpha_{1001}^{1002} + \alpha_{1001}^{1003}}{2} + \alpha_{1001}^i \right) \right)^2 \cdot \sigma_{z_{1001}^i}^2 + \\ &+ \left(\frac{1}{2} d_{1001}^i \cdot \sin z_{1001}^i \cdot \cos \left(\frac{v_{1001}^{1002} + v_{1001}^{1003}}{2} - \frac{\alpha_{1001}^{1002} + \alpha_{1001}^{1003}}{2} + \alpha_{1001}^i \right) \right)^2 \cdot (\sigma_{\alpha_{1001}^{1002}}^2 + \sigma_{\alpha_{1001}^{1003}}^2) + \\ &+ \left(d_{1001}^i \cdot \sin z_{1001}^i \cdot \cos \left(\frac{v_{1001}^{1002} + v_{1001}^{1003}}{2} - \frac{\alpha_{1001}^{1002} + \alpha_{1001}^{1003}}{2} + \alpha_{1001}^i \right) \right)^2 \cdot \sigma_{\alpha_{1001}^i}^2 \end{aligned} \quad (85)$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{N_i}^2 = & \sigma_{N_{1001}}^2 + \left(\sin z_{1001}^i \cdot \cos \left(\frac{v_{1001}^{1002} + v_{1001}^{1003}}{2} - \frac{\alpha_{1001}^{1002} + \alpha_{1001}^{1003}}{2} + \alpha_{1001}^i \right) \right)^2 \cdot \sigma_{d_{1001}^i}^2 + \\
& + \left(d_{1001}^i \cdot \cos z_{1001}^i \cdot \cos \left(\frac{v_{1001}^{1002} + v_{1001}^{1003}}{2} - \frac{\alpha_{1001}^{1002} + \alpha_{1001}^{1003}}{2} + \alpha_{1001}^i \right) \right)^2 \cdot \sigma_{z_{1001}^i}^2 + \\
& + \left(\frac{1}{2} d_{1001}^i \cdot \sin z_{1001}^i \cdot \sin \left(\frac{v_{1001}^{1002} + v_{1001}^{1003}}{2} - \frac{\alpha_{1001}^{1002} + \alpha_{1001}^{1003}}{2} + \alpha_{1001}^i \right) \right)^2 \cdot (\sigma_{\alpha_{1001}^{1002}}^2 + \sigma_{\alpha_{1001}^{1003}}^2) + \\
& + \left(d_{1001}^i \cdot \sin z_{1001}^i \cdot \sin \left(\frac{v_{1001}^{1002} + v_{1001}^{1003}}{2} - \frac{\alpha_{1001}^{1002} + \alpha_{1001}^{1003}}{2} + \alpha_{1001}^i \right) \right)^2 \cdot \sigma_{\alpha_{1001}^i}^2
\end{aligned} \tag{86}$$

Z upoštevanjem pogreška centriranja instrumenta nad točko 1001 σ_c in signaliziranja detajlne točke σ_{cs} dobimo:

$$\sigma_{(E_i, N_i)}^2 = \sigma_{(N_i)}^2 + \sigma_{(E_i)}^2 + \sigma_{(c)}^2 + \sigma_{(cs)}^2 \tag{87}$$

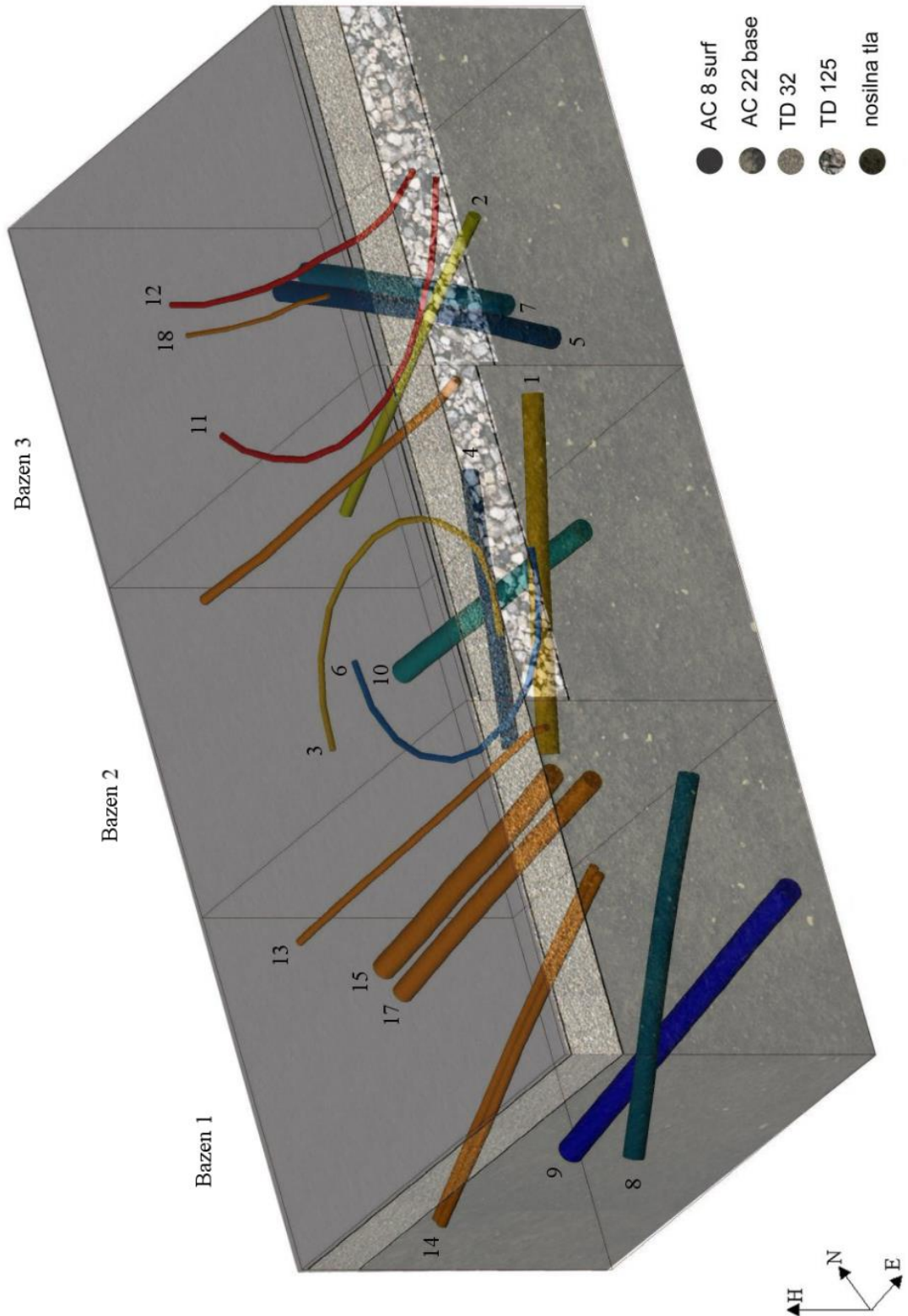
Izračunana je tudi višinska natančnost detajlnih točk po enačbi (Uren in Price, 2006):

$$\sigma_{H_i}^2 = \sigma_{H_{1001}}^2 + \cos^2 \cdot \sigma_d^2 + d_{1001}^i \sin^2 \cdot \sigma_z^2 + \sigma_{(i)}^2 + \sigma_{(l)}^2 \tag{88}$$

kjer je $\sigma_{(E_i, N_i)}^2$ varianca položaja detajlne temenske točke i , $\sigma_{N_i}^2$ varianca detajlne temenske točke i po N , $\sigma_{E_i}^2$ varianca detajlne temenske točke i po E , $\sigma_{N_i}^2$ varianca detajlne temenske točke višini, $\sigma_{N_{1001}}^2$ varianca stojišča po N , $\sigma_{E_{1001}}^2$ varianca stojišča po E , $\sigma_{H_{1001}}^2$ varianca stojišča po višini, σ_α^2 je varianca horizontalne smeri, σ_d^2 varianca dolžine, σ_z^2 varianca zenitne razdalje, $\sigma_{(i)}^2$ in $\sigma_{(l)}^2$ varianci določitve višine instrumenta in signala.

Najslabše izračunane ocene natančnosti $\sigma_{(EmaxNmax)} = 2,1$ mm in $\sigma_{(Hmax)} = 4,3$ mm posameznih detajlnih točk so bile prevzete kot dejanska položajna in višinska natančnost izmerjenih vodov in cevi v testnih bazenih.

3D-prikaz izmerjenih vodov in cevi v testnih bazenih z označenimi vgrajenimi vodi in cevmi ter plastmi voziščnih konstrukcij, posteljic in nosilnih tal je viden na sliki 62. Izmerjeni vodi in cevi so vizualizirani na podlagi pripadajočih 197 temenskih detajlnih točk. Zasedenost prostora smo ponazorili s pomočjo znanega zunanega premera posameznega objekta. Za vizualizacijo smo uporabili programsko orodje, navedeno je v razdelku 4.1. Za podroben opis in lastnosti vgrajenih in izmerjenih vodov in cevi v testnih bazenih glej preglednice 13–19.

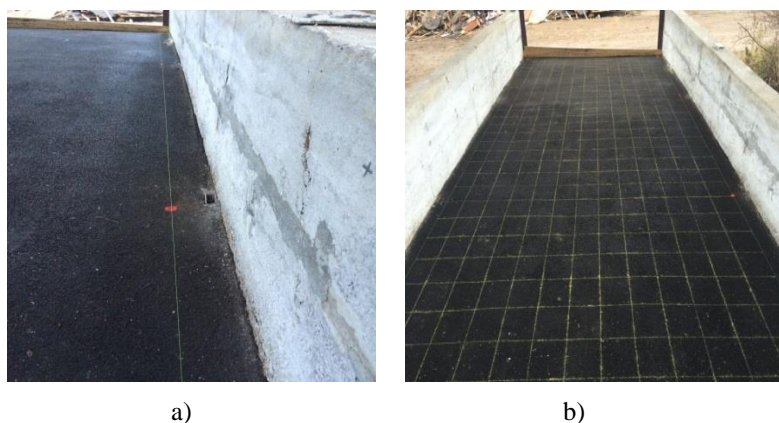


Slika 62: 3D-prikaz izmerjenih vodov in cevi, z zaporednimi številkami, v testnih bazenih.

Figure 62: 3D image with sequence numbers of measured lines and pipes in testing pools.

4.3 Določevanje georadarskih profilov in potek merjenja

Kot je opisano v poglavju 3, so za potrebe te doktorske disertacije zgrajeni trije bazeni, v katere so na podlagi pravilnikov in tehničnih specifikacij vgrajene posamezne vrste GI. Bazeni so preplasteni z asfaltno nosilno plastjo AC base in asfaltno obrabno in nosilnoobrabno plastjo AC surf. Zaradi lažjega spremljanja smeri merjenja in ohranjanja razdalj med georadarskimi profili je na bazenih vzpostavljena ortogonalna mreža georadarskih profilov. Ortogonalna mreža, prikazana na sliki 63, je omogočala tudi enostavnejše in natančnejše premikanje po površini testnih bazenov. Dimenzioniranje ortogonalne mreže je odvisno od lastnosti medija in velikosti iskanega ciljnega objekta (glej razdelek 2.7.1). Zaradi lažje izvedbe georadarskih opazovanj z različnimi centralnimi frekvencami uporabljenih anten je bila velikost celice ortogonalne mreže dimenzionirana na 20 cm × 20 cm. Položaj zunanjih oglišč ortogonalne mreže je bil določen iz vzpostavljene geodetske mreže (glej razdelek 4.2) z geodetsko polarno metodo izmere. Vsak profil znotraj mreže je označen s svojo zaporedno številko, kot prikazuje slika 66. Skupaj je posnetih 85 georadarskih profilov. Vzдолžni profili so potekali vzporedno s stenami testnih bazenov, krajši prečni profili pa vzporedno drug na drugega in pravokotno na vzporedne profile. Vsi profili so bili posneti v ravnih linijah na tleh z zelo majhnim naklonom. Vzдолžni profili so bili dolgi 580 cm, prečni 220 cm. Ob robovih je bila izvedba meritev omejena zaradi nehorizontalne naležne površine in širine uporabljenih anten.



Slika 63: a in b) Vzpostavitev ortogonalne mreže rastra 20 cm × 20 cm.

Figure 63: a and b) Establishment of orthogonal grid of 20 cm × 20 cm raster.

Georadarske meritve so izvedene v časovni domeni. Opisi uporabljenih nastavitvev merilnega sistema so podani v preglednici 22. Dolžino posamezne sledi in posledično njen doseg podajamo z vzorčenjem, medtem ko število vzorcev na sledi in njeno vertikalno ločljivost podajamo s frekvenco vzorčenja. Razmiki med sledmi so v časovnem načinu odvisni od hitrosti gibanja vzdolž profila in podajo gostoto oziroma horizontalno frekvenco vzorčenja nad površino.

Preglednica 22: Nastavitve merilnega sistema.

Table 22: The setup of measurement system.

Tip antene [MHz]	Vzorčenje [ns]	Število vzorcev na sled	Število bitov na vzorec	Frekvenca vzorčenja [MHz]	Razmik med sledmi [sled/sec.]	Število profilov
270	120	1024	16	53616,51	64	12 vzdolžnih: smer S–J

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 22

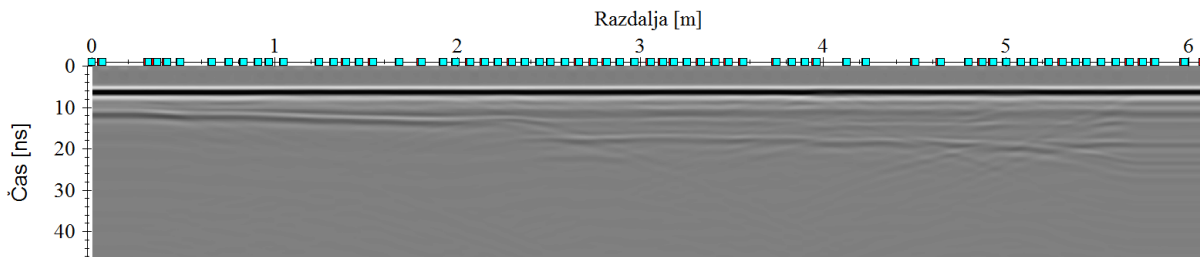
400	80	512	16	91914,02	64	12 vzdolžnih: smer J-S 12 vzdolžnih: smer S-J 31 prečnih: smer Z-V 4 prečni: smer V-Z 2 diagonalna
900	30	512	16	214466,02	64	12 vzdolžnih: smer S-J

Položaji prečnih in vzdolžnih georadarskih profilov v prostoru znotraj ortogonalne mreže so določeni s pomočjo geodetskih terestričnih kinematičnih opazovanj.

Georadarske meritve so izvedene s časovnim proženjem signala z intervalom 0,016 s. Začetek in konec mreže je na radargramih označen s proženjem markerja. Ohranjanje enakomerne hitrosti gibanja je v naravnih okoliščinah oteženo in posledično razdalje med sledmi na georadarju niso enake. Posledica gibanja je netočno proženje markerja, ki označuje znane točke na mreži bazena oziroma profilu in je v našem primeru zgolj orientacijske narave za lažje prepoznavanje in orientacijo radargramov v prostoru. V kontrolno enoto georadarja se v datoteko TMF (angl. time mark file) zapišejo le položaj, višina in čas začetne in končne sledi ter sledi in časi zajema posameznih markerjev na georadarskem profilu. Preostali izmerjeni položaji, višine in časi s terestrično kinematično metodo se zapisujejo v internem pomnilniku TPS.

Vsi postopki vrednotenja in povezovanja datotek po času so izvedeni z naknadno obdelavo v nizu naših programskih rešitev (glej razdelek 4.1). Obdelava enega delovišča je odvisna od dolžine in števila profilov. Pri testnih bazenih je za vse izmerjene profile obdelava povezovanja radarskih profilov in kinematičnih opazovanj trajala približno 20 minut v operacijskem sistemu in osebem računalniku, opisanem v razdelku 4.1. Program DST_converter bere binarni datoteki DST in TMF posameznega profila in zapiše po eno sled v vsako vrstico. Pogoj za delovanje je identično poimenovanje obeh datotek. Začetnim, končnim in markirnim sledem zapiše pripadajoči čas, popravljen za vrednost izračunane latence (glej razdelek 4.5) v formatu zapisa ASCII. Program Parse v prvem koraku v ASCII-datoteki posamezni sledi brez podatkov o času z linearno interpolacijo pripiše čas. V nadaljevanju po času upari ASCII-datoteko posameznega profila oziroma radargrama z ASCII-datoteko podatkov iz TPS. Posamezni radargramski sledi program z natančnostjo 10^{-3} s poišče in pripiše položaj in višino, če za predmetni čas podatek obstaja. Sledem zapiše položaj in višino v novo datoteko DST (angl. distance), prav tako v ASCII-formatu zapisa. Format in vsebino zapisa datoteke DST določa programska oprema za obdelovanje radargramov. Program Run v danem direktoriju poišče vse datoteke tipa DST in pokliče programa DST_converter in Parse z ustreznimi parametri, da se datoteke v celoti obdelajo.

S funkcijo dopolnitve glavnih podatkov o sledih (angl. update traceheaders) je v programskem paketu za obdelavo radargramov ReflexW 7.5 vsakemu profilu pripisana pripadajoča datoteka DST. Slika 64 prikazuje 61 posnetih točk (turkizno obarvani kvadrati) s terestrično kinematično metodo vzdolž šestega profila dolžine približno 6 m, ob frekvenci meritve 4–5 MHz in hitrosti gibanja reflektorja približno 0,5 m/s. Kjer skladnost časovne komponente ne ustreza pogojem oziroma v danem času ni znanega položaja in višine, se te sledi ne pripišejo. Takšne sledi imenujemo prazne sledi. Z linearno interpolacijo (angl. interpolation zero data) so praznim sledem določene vrednosti koordinat med dvema najbližjima sledema z znanim položajem in višino.



Slika 64: Povezava radargrama in terestričnih kinematičnih meritev z naknadno obdelavo in ob uporabi lastnih programskih rešitev DST_converter, Parse in Run.

Figure 64: The connection between radargram and terrestrial kinematic measurements with subsequent processing using own software solutions DZT_converter Parse in Run.

4.4 Pridobivanje položaja georadarja

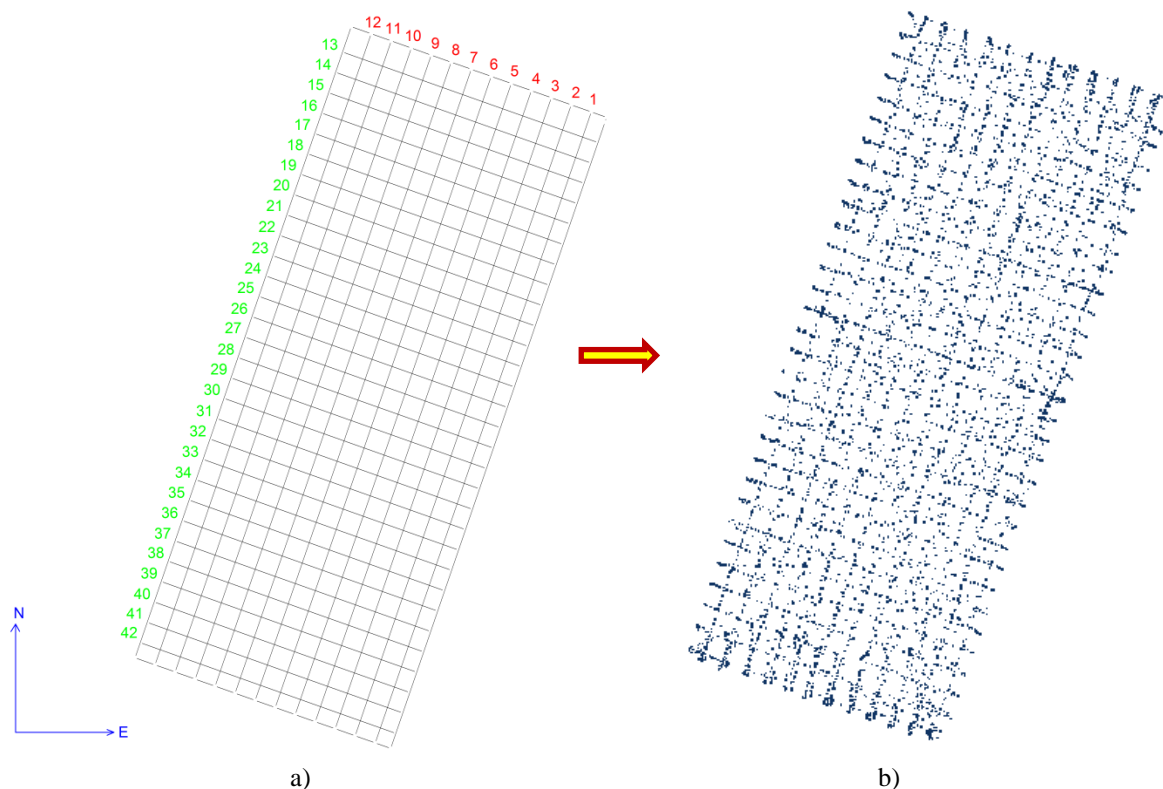
Za spremljanje gibanja georadarja vzdolž profilov je uporabljena terestrična kinematična metoda. Pri terestrični kinematični metodi se zanašamo le na a priori informacije o merskem sistemu, zato je treba za vsak kinematični proces skrbno določiti posamezne vrednosti in zahteve, kot so navedene v razdelku 2.7. Latenca med TPS in georadarskim sistemom je podrobno opisana v razdelku 4.5.

Oddaljenost elektronskega tahimetra od premikajočega se reflektorja je bila zaradi omejitev v kotni hitrosti premikanja instrumenta 30–40 m. Zagotovljena je bila nemotena vidnost, s čimer je bilo omogočeno samostojno iskanje premikajočega se reflektorja. Frekvenca terestrične kinematične meritve je znašala 4–5 Hz, hitrost premikajočega se reflektorja je bila približno 0,5 m/s. Da bi se izognili kabelskim povezavam in izboljšavi fleksibilnosti terenskega dela, je vzpostavljena brezžična (angl. bluetooth) povezava v realnem času, ki je omogočala izmenjavo podatkov med TPS in georadarskim sistemom. Uporabljen je frekvenčni pas 2400–2483,5 MHz. Med premikanjem georadarja po profilu je TPS avtomatsko sledil 360° reflektor, nameščen točno nad središčno točko georadarske antene, in pretakal podatke prek brezžičnega protokola, kot prikazuje slika 65. Fuzija podatkov med georadarskim sistemom in TPS je omogočena prek psevdo-NMEA GGA sporočila (Leica TPS1200+, 2008). V tej doktorski disertaciji so uporabljeni kinematični rezultati meritev brez odstranitve šuma oziroma Kalmanovega filtra.



Slika 65: Vzpostavljen sistem terestričnega spremljanja kinematičnega procesa v kombinaciji s TPS in georadarjem, opremljenim s 360° reflektorjem (Boniger in Tronicke, 2010).

Figure 65: Established terrestrial acquisition system of the kinematic process. TPS combined with a GPR equipped with a 360° reflector (Boniger in Tronicke, 2010).



Slika 66: a) Skica oštevilčevanja vzdolžnih in prečnih georadarskih profilov; b) Prikaz vseh 13.763 točk, določenih s terestrično kinematično metodo ob uporabi 400 MHz antene.

Figure 66: a) The diagram of numbering longitudinal and transverse GPR profiles; b) Presentation of all 13,763 points determined by terrestrial kinematic method using 400 MHz antenna.

4.5 Latenca

V našem sistemu terestričnega spremljanja kinematičnega procesa v kombinaciji s TPS in georadarjem, prikazanem na sliki 65, lahko časovni zamik pripišemo obdelavi podatkov v TPS in georadarju ter prenosu podatkov z uporabo brezžičnega vmesnika in kablov. Na podlagi navedenih povzročiteljev časovnega zamika (glej razdelek 2.7.3) lahko izpeljemo skupno latenco, ki predstavlja vsoto vseh posameznih latenc strojne opreme, predstavljeno z enačbo:

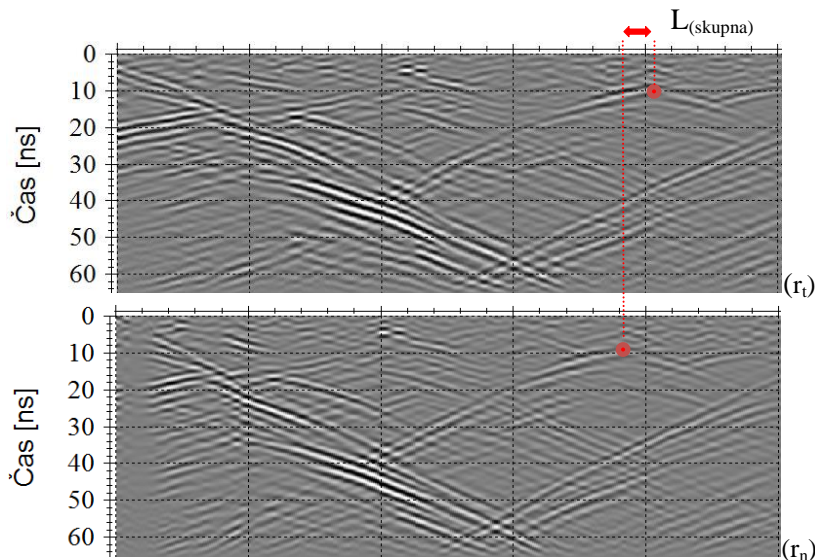
$$L_{(\text{skupna})} = L_{\text{TPS}} + L_{(\text{Bluetooth})} + L_{(\text{GPR})} \quad (89)$$

kjer je L_{TPS} latenca sistema elektronskega tahimetra, $L_{(\text{Bluetooth})}$ latenca brezžičnega vmesnika in $L_{(\text{GPR})}$ latenca georadarskega sistema.

Povezovanje položaja izmerjenega s podatki TPS in georadarjem s pomočjo časa je nepravilno za časovni zamik, ki ga predstavlja skupna latenca. Posamezni sledi v georadarskih podatkih se pripiše položaj v času meritve (t_m), kar je nepravilno, ker je to zaradi časovne zakasnitve položaj ene od predhodno izmerjenih sledi. Sledi bi se moral zapisati položaj ob pravilnem času (t_p). Pravilni čas (t_p) in posledično pravilni položaj sledi lahko izračunamo ob poznavanju skupne latence, predstavljene z $L_{(\text{skupna})} = t_m - t_p$.

Za oceno skupne latence lahko uporabimo georadarske radargrame istih profilov oziroma radargrame v obeh smereh, imenovane radargram tja (r_t) in radargram nazaj (r_n), ob predpostavki enake hitrosti

gibanja georadarja. Posledica latence so lateralno zamaknjeni radargrami istih profilov za vrednost latence, kot prikazuje slika 67.



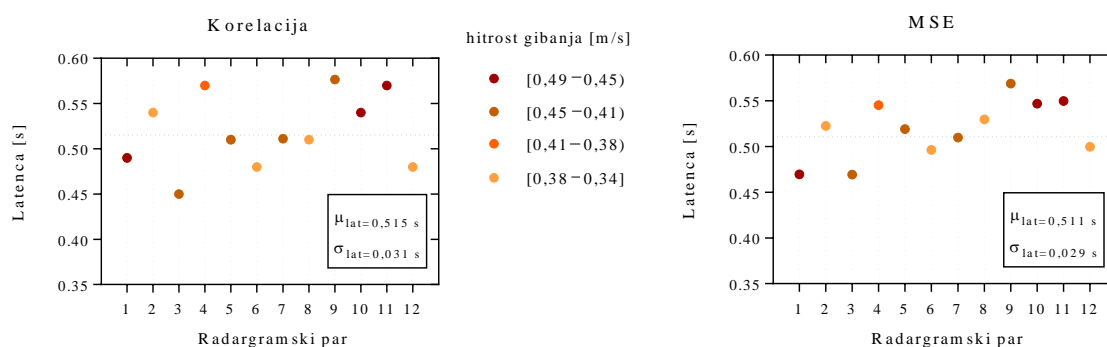
Slika 67: Prikaz vpliva skupne latence $L_{(skupna)}$ s pomočjo refleksije identičnega ciljnega objekta. Lateralni zamik med radargramoma 8. profila (r_i) in 17. profila (r_n) predstavlja vpliv dvojne skupne latence.

Figure 67: Presentation of total latency $L_{(total)}$ influence with the help of reflection of identical target object. Lateral shift between 8 profile/radargram (r_i) and 17 profile/radargram (r_n) representing the influence of dual total latency.

V našem primeru je cilj postopkov ujemanja po površini, z ustreznimi matematičnimi in statističnimi metodami, izbrani refleksiji ciljnega objekta v obliki hiperbole na radargramu (r_i), avtomatsko poiskati najverjetnejšo homologno refleksijo na sosednjem radargramu (r_n) in poravnati radargrama oziroma izračunati njun zamik. Zanimal nas je predvsem lateralni zamik privzetega radargrama oziroma njegovega izseka (r_i) glede na pripadajoči sosednji radargram (r_n). Pred uporabo metod poravnave in ujemanja po površini so bili radargrami obdelani z delom niza postopkov obdelave faze 3, kot to prikazuje slika 106.

Pri tem je treba poudariti, da sta predstavljena postopka v razdelku 2.7.3 uporabna le, če sta sliki enakih ločljivosti. V ta namen je pred poravnavo slik izvedeno podvzorčenje slike z višjo prostorsko ločljivostjo na prekrivnem območju obeh slik. Pri oceni latence je uporabljenih 12 bazenskih profilov, merjenih s 400 MHz anteno v obeh smereh. Ob predpostavki enakih hitrosti v obeh smereh bi moral biti položaj refleksije vgrajenega bazenskega ciljnega objekta enak oziroma v mejah natančnosti uporabljene terestrične kinematične metode.

Slika 68 prikazuje oceno latence 12 bazenskih profilov pri hitrostih gibanja od 0,49 m/s do 0,34 m/s. Zaradi narave hoje nastaja neenakomerno gibanje v smeri tja in nazaj. Izbor refleksije ciljnega objekta za izračun ocene latence je bil odvisen od najmanjšega odstopanja hitrosti gibanja tja in nazaj, in sicer na razdalji 0,5 m znotraj posameznega para profilov. Pri izračunu latence sta povprečeni obe hitrosti. Obe metodi ujemanja kažeta statistično skoraj identične rezultate ocenjene latence, in sicer 0,515 s pri korelacijskem koeficientu in 0,511 s pri MSE, s standardnima odklonoma $\pm 0,031$ s in $\pm 0,029$ s. Barvna lestvica prikazuje interval, znotraj katerega je centralna tendenca hitrosti gibanja posameznega para profilov.

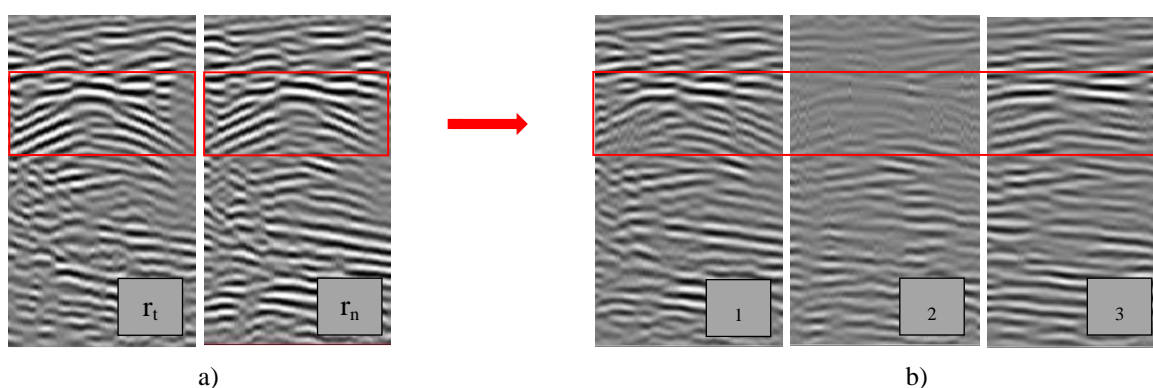


Slika 68: Prikaz ocene latence znotraj 12 parov profilov po dveh metodah pri uporabi 400 MHz antene. Podani so še težišča $\mu_{(lat)}$ in standardna odklona $\sigma_{(lat)}$ obeh metod.

Figure 68: Presentation of latency determining inside 12 pair of profiles with two methods using 400 MHz antenna. The mean latency $\mu_{(lat)}$ and std. deviation $\sigma_{(lat)}$ of both methods are presented.

Zaradi manjše razpršenosti je pri izračunu popravkov položajev, izmerjenih s TPS, prevzeto težišče latence, izračunane po metodi MSE. Sledil je postopek vnovičnega povezovanja datotek po času z naknadno obdelavo v nizu lastnih programskih rešitev (glej razdelek 4.3). Kot primer navajamo 10. profil, kjer je vpliv ocenjene latence 0,511 s, pri povprečni hitrosti gibanja 0,475 m/s, velikostnega ranga 0,24 m, s standardnim odklonom 0,014 m.

Vrednotenje rezultatov in uspešnosti slikovnega ujemanja smo ocenili z odštevanjem izsekov radargramov. Posamezne izseke oziroma dele parov radargramov odštevamo z odštevanjem vrednosti sivih nivojev posameznih slikovnih elementov radargrama tja $f_{r(i,j)}$ in radargrama nazaj $g_m(i,j)$, kjer razliko tvorimo kot $s(i,j) = f_{r(i,j)} - g_m(i,j)$. Razliko radargramov oziroma njegovih izsekov predstavlja slika 69, kjer so slike odšteti izseki brez ocenjenega latenčnega popravka, z latenčnim popravkom in dvakratnim latenčnim popravkom. Najboljše ujemanje, kjer se refleksiji ciljnega objekta odštejeta, podaja srednja slika 69b, pridobljena z odštevanjem izsekov, popravljenih za ocenjeno latenco.



Slika 69: Prikaz vpliva latenčnega popravka na izseku para radargramov: a) $r_t - 6$ profil in $r_n - 19$ profil; b) Odšteta radargramska izseka: 1 – brez latenčnega popravka, 2 – z izračunanim latenčnim popravkom in 3 – dvakratnim latenčnim popravkom.

Figure 69: Influence of latency correction on the section profile pair. a) $r_t - 6$ and $r_n - 19$ pair; b) Deducted selected GPR profile sections: 1) Latency undercorrected; 2) With calculated optimum latency; 3) With latency overcorrected by two.

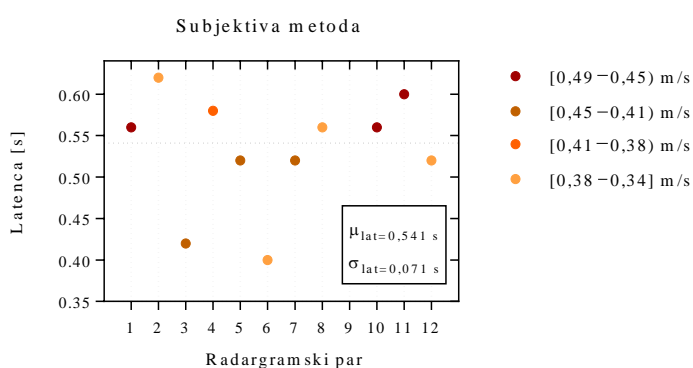
Postopek izračuna ujemanja in poravnave radargramov ter vrednotenje rezultatov in uspešnost slikovnega ujemanja s programom Poravnava je sestavljen iz več korakov. V prvem primerjamo sliki tako, da eno premikamo proti drugi za en slikovni element po obeh oseh. Ob premikanju se izračunavata korelacijski koeficient in MSE. Postopek ponavljamo tako dolgo, dokler ne izračunamo vseh kombinacij. V drugem koraku izračunamo zamik dveh slik, podan s številom slikovnih elementov v lateralni smeri. Ob poznavanju položaja (E , N) in časa zajema vsakega slikovnega elementa izračunamo zamik in srednjo vrednost hitrosti gibanja v obeh smereh, iz katerih pridobimo ocenjeno latenco. V tretjem koraku primerjamo oziroma odštejemo sliki ob upoštevanju ocenjene latence.

Ocena latence je opravljena tudi z »ročno« metodo, ki pomeni subjektivno oceno latence, temeljeno na dožemanju in zaznavanju radargramskih refleksij. Ocena zajema: vrednotenje, primerjavo in oceno lateralnega zamika ter njegov izračun na podlagi položajnih in časovnih razlik.

Subjektivna ocena zajema:

- pripravo testnih parov radargramov,
- izbiro primernih refleksij ciljnega objekta,
- izvedbo in potek določevanja temen refleksij,
- obdelavo oziroma izračun časovnih razlik.

Pri izvedbi določevanja položaja temen refleksij v obliki hiperbol so nam bila v pomoč že razvita orodja za izbiranje objektov (angl. picking object) znotraj programskega paketa Reflexw v. 7.5 (glej razdelek 4.22). Določevanje vrha refleksije je podvrženo subjektivni oceni, odvisno predvsem od znanja in izkušenosti izvajalca. Vrh refleksije pripada sledi, za katero poznamo položaj v prostoru (glej razdelek 4.4). Dodatno sta shranjeni še točki 20 cm pred in za vsako refleksijo ciljnega objekta, ki sta podlagi za izračunan hitrosti gibanja na obravnavanem območju. Koordinate položajev in časov refleksij parov slik so shranjene v obliki ASCII-datoteke, iz katerih je izračunan zamik. Iz navedenih podatkov je izračunana ocenjena latenca 12 parov profilov, prikazanih na sliki 70.



Slika 70: Prikaz ocene latence znotraj 12 parov profilov po subjektivni metodi pri uporabi 400 MHz antene. Barvna lestvica prikazuje interval, znotraj katerega je centralna tendenca hitrosti gibanja posameznega para profilov. Podani sta srednja vrednost $\mu_{(lat)}$ in standardni odklon $\sigma_{(lat)}$.

Figure 70: Presentation of latency estimation inside 12 profile pairs by subjective method using 400 MHz antenna. The colour chart indicates the mean walking speed interval of the corresponding profile pairs. The mean latency $\mu_{(lat)}$ and standard deviation $\sigma_{(lat)}$ are shown.

4.6 Določevanje deleža vsebnosti vode v bazenih

Ključnega pomena pri določevanju globine ciljnih objektov je izračun hitrosti potovanja EMV v mediju. Ob nepoznavanju globine vsaj enega objekta pod površjem je izračun hitrosti prek dvojnega časa potovanja EMV (glej razdelek 2.5.3) onemogočen. Pri uporabi georadarske metode in določanju globin ciljnih objektov je vsebnost vode v mediju ključna (glej poglavji 2.4.1 in 2.5).

Različno prileganje trdih delcev medija povzroča talne pore, ki se lahko zapolnijo z vodo in/ali zrakom. Volumen, ki sta ga voda in zrak sposobna napolniti, nam podaja poroznost. Delež vode nam pove, kakšen je volumen vode glede na skupni volumen medija ali posamezne plasti v mediju. Posledično je relativna dielektričnost medija oziroma njenih posameznih plasti določena s frakcijskim volumnom prisotne vode. Večji kot je odstotek vode v (plasteh), višja je njihova vlažnost in posledično višja relativna dielektričnost (Hillel, 1998; Driksen, 1999). Temperatura vode navadno nima značajnega vpliva pri georadarskih meritvah v frekvenčnem območju od 1 do 1000 MHz, se pa v trdnem agregatnem stanju relativna dielektričnost zmanjša z 80 na 3 (Topp et al., 1980).

Potreba po določitvi deleža vode v tleh je ključnega pomena pri določevanju relativne dielektričnosti plasti, kar vodi k mogočemu določevanju in interpretaciji globin ciljnih objektov. Poznamo posredne in neposredne metode merjenja deleža vode v mediju. Med neposredne in destruktivne uvrščamo gravimetrično metodo, ker zahteva odvzem vzorca. Temelji na odstranitvi vode oziroma ločitvi vode iz medija (plasti), pri čemer neposredno izmerimo delež odstranjene vode, in je hkrati najnatančnejša. Med posredne uvrščamo nedestruktivne metode, npr. TDR in merjenje frekvence FD (angl. Frequency Domain). Pri TDR-metodi merimo čas širjenja EMV vzdolž elektrode oziroma sonde, vstavljene v medij (Dirksen, 1999). Zaradi ekstremne občutljivosti na makropore in zračne mehurčke, povzročene pri vstavljanju sond v medij, je lahko TDR-metoda neučinkovita, kadar merimo male volumenske deleže vode v mediju ali posamezni plasti (Huisman et al., 2003).



Slika 71: Kopeckijev cilindar za odvzemanje neporušnih vzorcev.

Figure 71: Kopecky's cylinder for taking non-destructive samples.

Pri določevanju volumenskega deleža vsebnosti vode v mediju oziroma posameznih plasti v bazenih je kot temeljna uporabljena gravimetrična metoda. Vsi trije bazeni so vzorčeni vzdolž 5. in 8. profila (glej razdelek 4.4) na globinah spodnje nevezane nosilne plasti 20–30 cm (glej razdelek 3.3.1), posteljice 50–60 cm (glej razdelek 3.2) in nosilnih tal v globini 110–120 cm. S Kopeckijevim cilindrom, prikazanim na sliki 71, smo skušali odvzeti neporušne vzorce posameznih plasti. Težave so se pojavile pri nevezani nosilni plasti in posteljici, kjer je prevelika granulacija ovirala odvzem vzorca. V ta namen so konstruirani odjemni moduli, ki so jih predstavljale cevi DN/IN 104 in dolžine 217,7 mm, s katerimi se vsaj delno pridobi neporušne vzorce. Kopeckijev cilindar in odjemne module smo

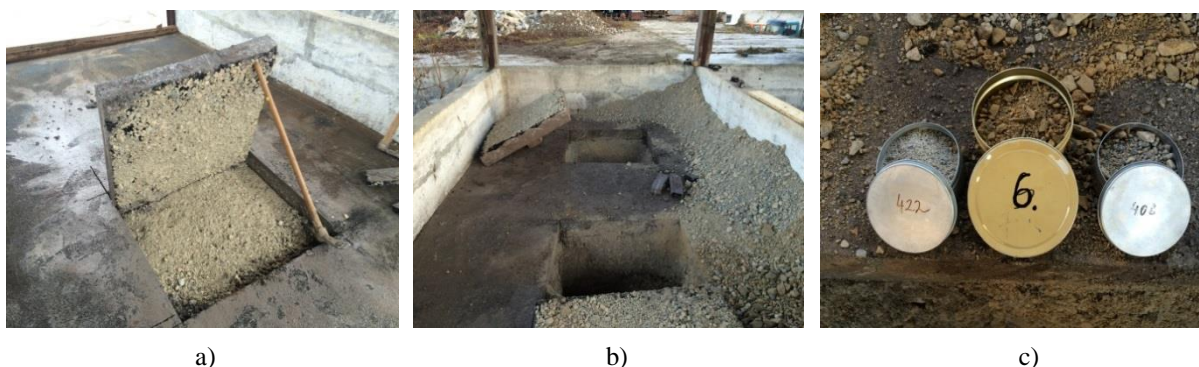
na posameznih globinah lateralno zabili v posamezne plasti. V vsakem bazenu je narejena po ena ponovitev na vsaki globini. Skupaj je odvzetih 6 vzorcev nosilnih tal s Kopecijevimi cilindri in 10 vzorcev nevezane nosilne plasti in posteljice z odjemnim modulom. Za kontrolo masnega deleža vode je v posebnih lončkih odvzetih dodatnih 36 porušnih vzorcev, prikazanih na sliki 72c, s katerimi so pridobljeni nadštevilni podatki masnega deleža vode za kontrolo. Slika 73 prikazuje položaj in globino vzorčenja bazenov vzdolž 5. profila. Cilindri, odjemni moduli in lončki so takoj po napolnitvi oviti v plastično vrečko, s čimer je preprečeno izhlapevanje vode na poti v laboratorij. Meritve smo opravili v laboratoriju Inštituta za hmeljarstvo in pivovarstvo Slovenije, kamor smo jih prepeljali v 45 minutah od vzorčenja. Vzorci so v sušilniku (glej razdelek 4.1) sušeni naslednjih 24 ur, in sicer na temperaturi 105 °C. Tehtanje vzorcev je izvedeno s tehtnico (glej razdelek 4.1) z natančnostjo določitve teže $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ g. Količina odstranjene vode je določena s spremembo mase po segrevanju (Topp in Ferré, 2002). Volumenski delež vode je izračunan po enačbi, ki upošteva masni delež vode in gostoto tal:

$$\theta_m = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 \% \quad (90)$$

$$\theta_w = \frac{m_w}{\rho_w V_b} = \theta_m \cdot \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (91)$$

kjer je m_w masa vode (razlika v masi mokrega in suhega vzorca), m_s masa suhega vzorca [g], ρ_w gostota vode [g/cm^3], V_b volumen vzorca tal [cm^3] in ρ_b gostota tal (kvocient mase suhega vzorca in volumna vzorca tal) [g/cm^3].

Splošni pomisleki o natančnosti gravimetrične metode se pojavljajo zaradi oksidacije organskih materialov in neizhlapevanja celotne vode pri sušenju ter posledično morebitnem podcenjenem rezultatu v glinenih vzorcih (Ward & Robinson, 2000).



Slika 72: a) Razrez bazenskih asfaltnih površin; b) Izkop posameznih plasti za vzorčenje; c) Porušni vzorci plasti voziščne konstrukcije.

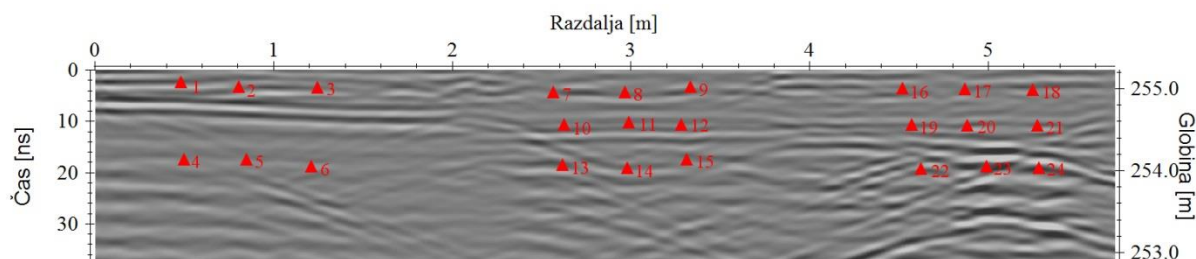
Figure 72: a) Cutting asphalt surfaces in pools; b) Excavation of individual layers for sampling; c) Destructive samples of pavement structure layers.

Kot standardna mera centralne tendence masnega deleža, volumenskega deleža vode ter gostote materiala in višine odvzema posameznega bazena je bilo uporabljeno njihovo težišče. Iz dejstva, da je prvi testni bazen na južni strani podvržen sevanju sončne energije, rezultati pravilno nakazujejo manjši delež vode. Masni in volumenski deleži vode na podlagi vzorčenja so predstavljeni v preglednici 23.

Preglednica 23: Masni in volumenski delež vode ter gostota materiala po posameznih bazenskih plasteh na podlagi vzorčenja (TD 32 – nevezana nosilna plast, TD 125 – posteljica, ZEM – zemljina).

Table 23: Volumetric and weight water content and the density of material by individual layers of pool based on sampling (TD 32 – base course, TD 125 – sub-base course, ZEM – soil).

Bazen	Plast	Profil 5	Profil 8	Masni delež vode μ [%]	Volumenska specifična teža μ [g/cm ³]	Volumenski delež vode μ [%]
		μ_h	μ_h			
1	TD 32	254,91	254,88	1,3	1,952	2,5
1	ZEM	254,01	254,04	17,1	1,429	24,4
2	TD 32	254,95	254,89	1,6	1,894	2,8
2	TD 125	254,68	254,67	1,5	1,910	3,1
2	ZEM	254,04	253,98	20,1	1,447	29,4
3	TD 32	254,94	254,90	1,7	1,874	3,2
3	TD 125	254,71	254,61	1,7	1,976	3,4
3	ZEM	254,08	254,01	20,2	1,438	29,0



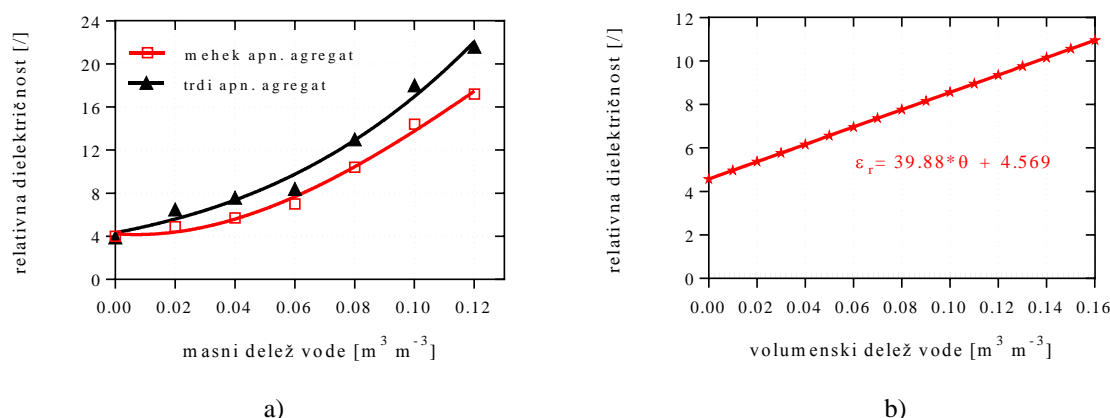
Slika 73: Položaj in globina vzorčenja bazenov vzdolž 5. profila (podlaga: delno obdelan radargram 400 MHz antene).

Figure 73: The position and depth of sampling of the pools along the 5th profile (the base: partially processed radargram of 400 MHz antenna).

4.7 Ocena relativne dielektričnosti

Relativne dielektričnosti posameznih bazenskih plasti voziščne konstrukcije smo skušali oceniti laboratorijsko. V praksi takšnega najzanesljivejšega načina določevanja ne uporabljamo zaradi zamudnosti in destruktivne narave vzorčenja, v smislu števila vzorcev in izkopa na območju georadarskih opazovanj. Večina avtorjev pri laboratorijskem določevanju relativne dielektričnosti omenja zračno suhe vzorce kamnin (Olatinsu et al., 2013; Saarenketo, 2006; Singh et al., 1980). Olatinsu et al. (2013) so analize izvajali v frekvenčnih območjih od 10 kHz do 110 MHz z natančnim impedančnim analizatorjem Agilent 4294 (angl. precision impedance analyzer), Sakaki in Rajaram (2006) od 20 kHz do 1,5 GHz s TDR-metodo, Singh et al. (1980) od 10 kHz do 10 MHz z LCR- in Q-metrom (Radart type 1202A) in Saarenketo (2006) ob frekvencah od 30 MHz do 3 GHz s površinskim mrežnim analizatorjem (angl. surface network analyser).

Saarenketo in Scullion (1995) podajata relativno dielektričnost za mehki apnenčev agregat voziščne konstrukcije gostote 3,11 g/cm³ in trde gostote 2,66 g/cm³, v razponu 3–4 za suh vzorec in 5–9 za vlažen vzorec. Avtorja podajata korelacijo med relativno dielektričnostjo in masnim deležem vode, kot ga prikazuje slika 74a. Leng in Al-Qadi (2010) navajata relativno dielektričnost apnenčevega agregata velikosti 0–63 mm, ob povečevanju volumenskega deleža vode od 0 do 15 %, v razponu 4,2 do 10,5. Navajata linearno regresijo z determinacijskim koeficientom 0,9802, kot prikazuje slika 74b.



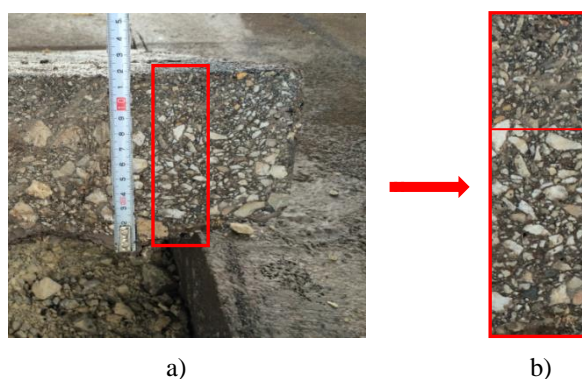
Slika 74: a) Odvisnost relativne dielektričnosti mehkega in trdega apnenčevega agregata od masnega deleža vode (Saarenketo in Scullion, 1995); b) Odvisnost relativne dielektričnosti apnenčevega agregata velikosti 0–63 mm od volumenskega deleža vode (Leng in Al-Qadi, 2010).

Figure 74: a) The relationship between the dielectric constant of soft and hard limestone in relation to moisture content by volume (Saarenketo in Scullion, 1995); b) The relationship between the relative dielectric permittivity and moisture contents of limestone aggr. of 0-63 mm (Leng in Al-Qadi, 2010).

V literaturi zasledimo različne relativne dielektričnosti asfaltnih zmesi, odvisne od volumenskega deleža materialov v sestavi zmesi in deleža vlage (Eaves et al., 2007). Enačbo dielektričnosti asfaltne zmesi na podlagi kompleksnega refrakcijskega indeksa podamo s tremi volumenskimi komponentami osnovnih sestavin (Pellinen et al., 2015):

$$\sqrt{\epsilon_{zmesi}} = V_z \sqrt{\epsilon_z} + V_{kz} \sqrt{\epsilon_{kz}} + V_b \sqrt{\epsilon_b} \quad (92)$$

kjer so V_z , V_{kz} in V_b volumenski deleži zraka, kamnitih zrn in bitumna ter ϵ_z , ϵ_{kz} in ϵ_b pripadajoče relativne dielektričnosti zraka, kamnitih zrn in bitumna v asfaltnem vzorcu. Testirali smo vzorce asfaltnih zmesi kamnitega drobljenca AC 22 base zrnavosti 22, s 3 % deležem bitumna in od 3 do 6 % vsebnostjo prostih votlin (glej preglednico 37) ter AC 8 surf zrnavosti 8, s 4,8 % deležem bitumna in od 3 do 6 % vsebnostjo prostih votlin (glej preglednico 40), prikazanih na sliki 75.



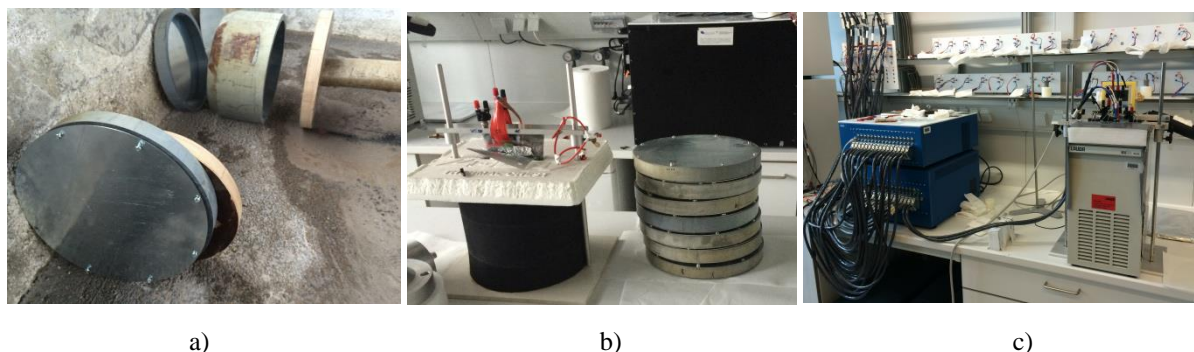
Slika 75: a) Prikaz debeline asfaltne zmesi AC 8 surf in AC 22 base v tretjem testnem bazenu; b) Prikaz razlik v zrnavosti in posamezne debeline AC 8 surf (4 cm) in AC 22 base (8 cm).

Figure 75: a) Presentation of asphalt mixture thickness in AC 8 surf and AC 22 base in the third testing pool; b) Presentation of differences in grading and individual thickness of AC 8 surf (4 cm) and AC 22 base (8 cm).

Pretežni delež relativne dielektričnosti asfaltne zmesi zaradi velikega volumenskega deleža so kamnita zrna različnih zrnivosti iz kamnin sedimentnega ali eruptivnega izvora. Jaselskis et al. (2003) navajajo relativno dielektričnost asfaltne zmesi kamnitega drobljenca med 6,5–6,7 in 5,7–6,3 ob 4 in 8,5 % volumenskem deležu bitumna. Shang et al. (1999) navajajo vrednosti $6,0 \pm 0,15$ za suhe vzorce in $6,52 \pm 0,99$ za vzorec ob deležu vode 0,25–1,25 % tipičnih asfaltnih zmesi, pri čemer ne navajajo posameznih volumenskih deležev osnovnih komponent.

4.7.1 Ocena relativne dielektričnosti s pomočjo impedančne spektroskopije

Za določevanje relativne dielektričnosti bazenskih plasti voziščne konstrukcije smo skušali odvzeti neporušne vzorce posameznih plasti na podobnih globinah in vzdolž istih profilov kot pri vzorčenju za potrebe določitve volumenskega deleža vode (glej razdelek 4.6). Odvzem vzorcev asfaltne zgornje vezane nosilne plasti (glej razdelek 3.3.2.1) in asfaltne obrabne plasti (glej razdelek 3.3.2.2) je potekal brez težav. Te so nastopile pri poskusu odvzema neporušnih vzorcev nevezanih nosilnih plasti in posteljice, kjer je prevelika granulacija znova ovirala odvzem vzorca. Zaradi konstrukcijskih pogojev embalaže pri določitvi relativne dielektričnosti s pomočjo impedančne spektroskopije so bili konstruirani odjemni moduli, ki so prikazani na sliki 76a. Opišemo jih lahko kot simetrične celice Al-Al, kjer smo morali medij zapreti med vzporedni okrogli aluminijasti plošči. Kot distančnik med ploščama in hkrati kot ohišje, ki smo ga zabili v medij, smo uporabili PVC-cev DN/IN 250 in dolžino 30 mm. V vsakem bazenu je zaradi zahtevnosti odvzema narejeno po eno vzorčenje posamezne plasti. Skupaj je odvzetih 8 vzorcev. Za potrebe te doktorske disertacije smo se zadovoljili z odvzetimi vzorci, čeprav ne moremo trditi, da smo zagotovili popolnoma neporušne vzorce.



Slika 76: a) Odjemni modul (v ozadju) in celica Al-Al z ohišjem (v ospredju); b) Vzorci plasti voziščnih konstrukcij v laboratoriju; c) Merilni instrument Bio-logic SP-200.

Figure 76: a) Deliverable module (at the back) and Al-Al cell with the casing (at the front); b) Samples of layers of pavement structure in the laboratory of the National Institute of Chemistry; c) Bio-logic SP-200 measuring instrument.

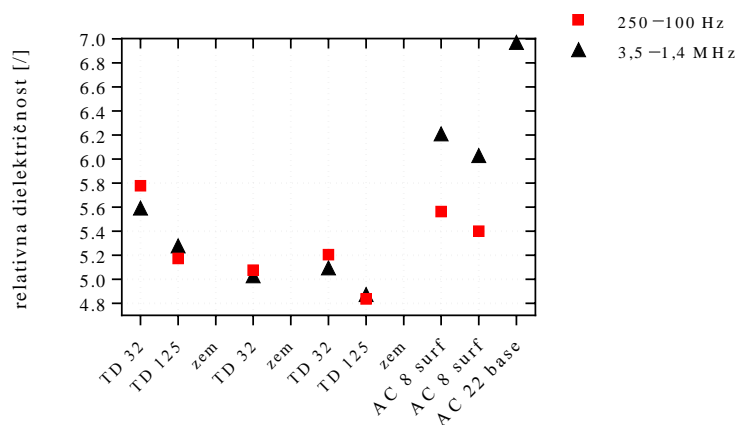
Slika 76a in 76b prikazujeta izvedbo meritev v laboratoriju Kemijskega inštituta. Vzorce, ki so bili zaprti v simetrično celico Al-Al, so bili predhodno najprej 5 dni sušeni na zraku pri $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, s čimer se odstrani površinska vlaga, ki bi sicer onemogočala določitev relativne dielektričnosti s pomočjo impedančne spektroskopije. Površinska vlaga na delcih tvori precej dobro prevoden plašč, zaradi česar tok teče preferenčno po površini delcev. Po ohladitvi smo z merilnim instrumentom (Bio-logic SP-200) izmerili impedančni odziv v frekvenčnem območju od 7 MHz do 100 Hz, prav tako impedančni odziv prazne celice. Dobljene rezultate smo analizirali v programskem paketu ZView 2 (Scribner) in določili vrednost parametra C_{eff} nadomestnega elementa CPE (angl. constant phase element), ki predstavlja efektivno kapacitivnost vzorca. Analizo smo izvedli za dve frekvenčni območji: 3,5–1,4

MHz in 250–100 Hz. Relativno dielektričnost ϵ_r smo določili s pomočjo izraza (Olatinsu et al., 2013; Singh et al., 1980):

$$\epsilon_r = 1 + \left\{ \left[C_{eff}(\text{vzorec}) - C_{eff}(\text{prazna c.}) \right] \frac{d}{\epsilon_0 A} \right\} \quad (93)$$

kjer je A ($0,049 \text{ m}^2$) površina posameznega vzorca, d (30 mm) razdalja med aluminijastima ploščama, določena z dolžino PVC-cevi, ϵ_0 relativna dielektričnost ($8,85 \cdot 10^{-12} \text{ AsV}^{-1} \text{ m}^{-1}$), C_{eff} (vzorca) efektivna kapacitivnost vzorca in C_{eff} (prazna c.) efektivna kapacitivnost embalaže.

Dobljeni rezultati so prikazani na grafu slike 77. Sklepamo, da je pretežni delež razlik med vzorci posameznih apnenčevih agregatov vpliv metodologije odvzema vzorca, s katero ne moremo zagotoviti popolne neporušnosti in frekvenčnega območja določevanja relativne dielektričnosti. So pa rezultati zelo dober približek dejanskega stanja. Rezultatov ni bilo mogoče pridobiti za vzorce zemlje, ker se je volumen vzorcev zaradi velikega deleža vode ob segrevanju spremenil toliko, da zgornja aluminijasta plošča celice ni imela več stika z medijem. Vzorce asfaltnih zmesi v velikosti A ($0,00169 \text{ m}^2$) in debeline 12,7 mm smo izmerili brez težav.

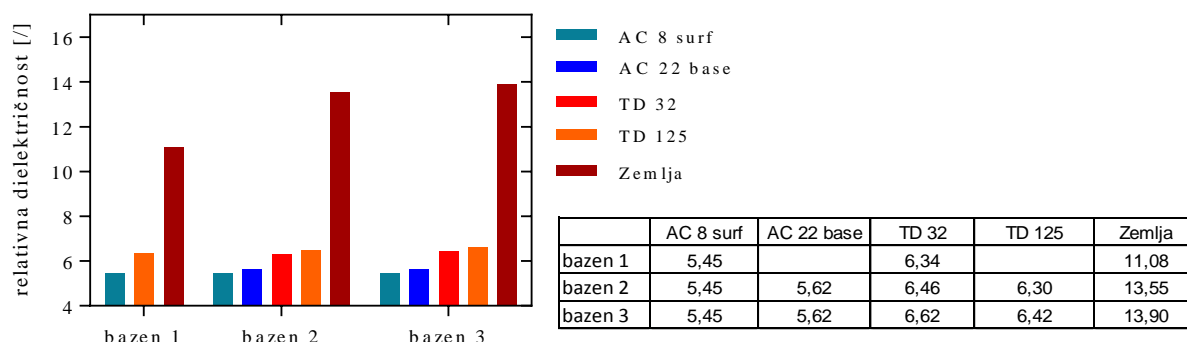


Slika 77: Relativna dielektričnost apnenčevih agregatov TD 32 in TD 125 suhih vzorcev ter asfaltnih zmesi AC 8 surf in AC 22 base, uporabljenih v testnih bazenih.

Figure 77: Dielectric constant of limestone aggregates TD 32, TD 125 dry samples and asphalt mixtures AC 8 surf and AC 22 base, used in testing pools.

V nadaljevanju smo prevzeli rezultate frekvenčnega območja 250–100 MHz. Kot standardna mera centralne tendence relativne dielektričnosti apnenčevih agregatov TD 32 in TD 125 suhih vzorcev in asfaltnih zmesi je bilo uporabljeno njihovo težišče. Za posplošeno oceno relativne dielektričnosti apnenčevih agregatov TD 32 in TD 125 v testnih bazenih ob upoštevanju volumenskega deleža vode smo prevzeli smerni koeficient premice po Leng in Al-Qadi (2010). Preoblikovali smo regresijsko premico z izhodiščem v težišču relativne dielektričnosti TD 32 ($\mu_\epsilon = 5,344$) in TD 125 ($\mu_\epsilon = 5,061$) pri ničelnem volumenskem deležu vode. Ob upoštevanju volumenskega deleža vode (glej razdelek 4.6) smo pridobili končne ocenjene vrednosti apnenčevih agregatov TD 32 in TD 125 v testnih bazenih, ki so precej skladne z vrednostmi v literaturi (glej razdelek 4.7). Prav tako smo ocenili relativne dielektričnosti zemljin z uporabo Topp et al. (1980) enačbe (glej razdelek 2.6.1).

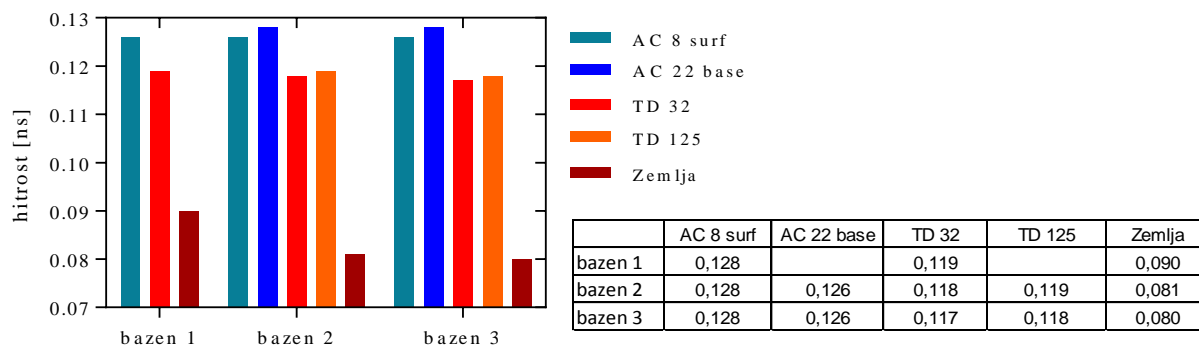
Slika 78 prikazuje relativno dielektričnost posameznih plasti v testnih bazenih.



Slika 78: Relativna dielektričnost posameznih plasti testnih bazenov.

Figure 78: Dielectric constant of individual layers of testing pools.

Slika 79 prikazuje hitrosti širjenja EMV v testnih bazenih, izračunanih na podlagi ocenjenih relativnih dielektričnosti (glej razdelek 2.5.2), ob predpostavki homogenosti in izotropnosti posameznih plasti.



Slika 79: Izračunane hitrosti širjenja [10^{-9} s] EMV v testnih bazenih.

Figure 79: Calculated velocity of [10^{-9} s] EMW propagation in testing pools.

Iz navedenega je razvidno, da ima vsaka plast, ki v večini primerov predstavlja horizontalno plast voziščne konstrukcije debeline d_i (glej razdelek 3.1), svojo enotno relativno dielektričnost ε_i z enotnim deležem vsebnosti vode. Čas, potreben, da EMV prepotuje posamezno plast, izpeljemo iz enačbe 32 (glej razdelek 2.5.3):

$$t_i = \frac{d_i}{c_0} \sqrt{\varepsilon_i} \quad (94)$$

in čas, potreben za prepotovanje vseh plasti:

$$t_m = \sum_i t_i = \frac{1}{c_0} \sum_i d_i \sqrt{\varepsilon_i} \quad (95)$$

kjer je ε_i relativna dielektričnost, d_i debelina in t_i čas potovanja EMV v posamezni plasti ter c_0 hitrost EMV v praznem prostoru.

Relativna dielektričnost mešanega materiala je podana z aritmetično sredino relativnih dielektričnosti materialov, ki ga sestavljajo (Birchak et al., 1974). Relativna dielektričnost posameznega bazena ϵ_{rb} je odvisna od debeline in relativne dielektričnosti posamezne plasti, zapišemo jo lahko kot:

$$\epsilon_{rb} = \left(\frac{c_0 t_m}{d_s} \right)^2 = \left(\frac{\sum_i d_i \sqrt{\epsilon_i}}{d_s} \right)^2 \quad (96)$$

$$\sqrt{\epsilon_{rb}} = \frac{d_1}{d_s} \sqrt{\epsilon_1} + \frac{d_2}{d_s} \sqrt{\epsilon_2} + \dots + \frac{d_i}{d_s} \sqrt{\epsilon_i} \quad (97)$$

kjer je d_s skupna globina bazena, $\frac{d_i}{d_s}$ utež kvadratnega korena in ϵ_i relativne dielektričnosti posamezne plasti v bazenu. Utež pomeni kvocient debeline plasti d_i in skupne debeline vseh plasti d_s , in sicer debelejša kot je plast, večjo utež ima, in obratno. Ob poznavanju debelin plasti (glej razdelek 3.1) izračunamo relativno dielektričnost 10,13 v bazenu 1, 11,04 v bazenu 2 in 10,81 v bazenu 3.

4.8 Optimizacija obdelave

Posamezni georadarski sestavi oziroma njihova programska oprema, nameščena na kontrolni enoti, omogočajo obdelavo podatkov že takoj po njihovem zajemu, kar imenujemo sistemska obdelava podatkov. Uporabljen georadarski sistem SIR (GSSI) 3000 oziroma njegova programska oprema TerraSIRch omogoča uporabo osnovnih časovnih in prostorskih filtrov ter ojačitev moči signala. Obdelave se ne izvajajo sistemske in niso vezane na celoten sklop opazovanj, ampak na posamezne radargrame, kar nam pri naknadni obdelavi in interpretaciji povzroča težave. Pred naknadno obdelavo v namenskem programskem orodju je smiselno odstraniti vse sistemske spremembe, ker s tem onemogočimo napačne interpretacije končnih rezultatov. Ciljno stanje podatkov pred obdelavo so surovi oziroma neobdelani podatki (angl. raw data), iz katerih želimo pridobiti čimveč koristnih informacij z naknadno obdelavo.

Eden od namenov uporabe različnih centralnih frekvenc anten je bil tudi test zmogljivosti in končne uporabnosti v urbanih okoljih. Pri sistemske obdelavi podatkov so se že v fazi zajema nakazovali slabši rezultati, pridobljeni z 270 MHz anteno, kot posledica daljših valovnih dolžin od preostalih dveh uporabljenih anten. Potrdile so se domneve o slabši uporabnosti oziroma neuporabnosti v testnih bazenih, kot posledica predpisanih globin (glej razdelek 3.5) vgradnje in majhnih dimenzij vgrajene GI. Antena je bila sicer vključena tudi v predlagani model v fazi obdelave (glej razdelek 5), vendar so se potrdile naše domneve o neuporabnosti rezultatov postavljene že ob sistemske obdelavi. Zaradi slabše prostorske ločljivosti in posledično pričakovanih precej slabših oziroma neuporabnih rezultatih je bila 270 MHz antena izključena iz nadaljnje obdelave in ocene točnosti. Po naših izkušnjah je 270 MHz anteno smiselno uporabiti v primeru odkrivanja in evidentiranja dimenzijsko večjih (> DN/OD 200) in zaradi večjega globinskega dosega globljih (> 2 m) objektov GI.

Prvi korak pri obdelavi radargramov je povezovanje datoteke georadarskih opazovanj in datoteke položaja georadarske antene. Pri zajemanju položaja antene in posredno radargrama georadarskega profila s terestrično kinematično metodo pridobimo datoteko položajev, višin in časa zajema v izbranem formatu. Povezavo oziroma časovno sinhronizacijo smo izvedli prek za to pripravljene binarne datoteke TMF (angl. time mark file format), v katero se zapišejo položaja, višini in čas začetne

in končne točke georadarskega profila. S tem je bilo omogočeno, da so nekatere sledi na radargramu georadarskega profila pridobile položaj in višino iz datoteke položajev in višin.

Za potrebe te doktorske disertacije so bili postopki naknadne obdelave razdeljeni v osnovne, dodatne osnovne in napredne postopke. Pred tem smo podatke uredili in organizirali v smiselno zaporedje. Ločnica med naknadno obdelavo in interpretacijo kot del procesa obdelave je pogosto zabrisana. Postopke slikovne in prepoznavne analize, modeliranja, spektralne analize in aritmetičnih funkcij smo zato uvrstili med postopke interpretacije rezultatov.

Pri optimizaciji obdelave radargramov obstaja veliko postopkov in algoritmov za obdelavo, katerih uspešnost je korelirana z nastavljenimi parametri in predhodnimi izkušnjami operaterja. V modelu smo preizkusili več postopkov, v nadaljevanju opisujemo samo tiste, ki smo jih vključili v predlagani model obdelave. Prikaz učinka in namena posameznih postopkov obdelave je zaradi podobnih rezultatov prikazan znotraj posameznega razdelka, v veliki večini samo za eno od uporabljenih anten.

4.9 Rezanje sledi

Sledi so osnovni gradniki 2D-radargrama. Število sledi je v časovnem načinu meritev odvisno od intervala časovnega proženja signala, hitrosti gibanja in dolžine profila. Iz radargrama lahko izvlečemo posamezno sled ali več sledi na izbranem intervalu (angl. trace extract). Da bi poenotili bazenske profile, smo določili interval, omejen s prvo in zadnjo sledjo. Mejne sledi, s katerimi definiramo interval, predstavljajo zabeleženi markerji na radargramu. Z markerji smo teoretično zagotovili orientacijski začetek in konec profila. Želen interval opredelimo s funkcijo določanja obsega sledi (angl. tracerange), kjer iz ASCII-datoteke (glej razdelek 4.3) preberemo začetno in končno sled markerjev. Zaradi neenakomernega gibanja in posledično netočnega proženja markerja je število sledi posameznega radargrama znotraj bazenske mreže lahko tudi različno.

4.10 Popravek zamika signala

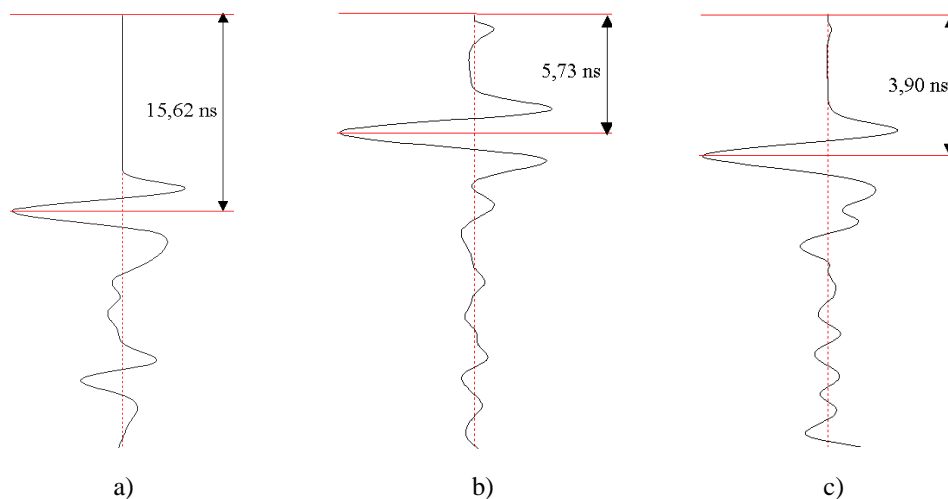
Na radargramih pogosto obstaja konstanten premik registriranih sledi glede na položaj ničelnega časa (angl. DC shift, DC bias ali DC offset). Popravek oziroma filter DC izhodišče časovne skale sledi premakne nazaj na mesto ničelnega časa (glej razdelek 2.8.2). DC zamik se izračuna in odstrani za vsako posamezno sled v radargramu (Sandmeier, 2014). Na radargramih smo smiselno označili časovni interval dvojnega časa potovanja signala na sledih, iz katerega se izračuna srednja vrednost, za katero se izvede premik. Časovne intervale je smiselno podajati ob koncu sledi, kjer so amplitude refleksij izredno majhne.

4.11 Popravek ničelnega časa

Popravek ničelnega časa je najlažje opredeliti na grafičnem prikazu posamezne refleksijske sledi, kjer zlahka ločimo maksimuma prvega negativnega in pozitivnega vrha. Tipična georadarska refleksijska sled vsebuje sledi notranjih antenskih refleksij (angl. feed-point reflection), refleksije neposrednih valov in refleksije posameznih plasti z različnimi relativnimi dielektričnostmi. Na posamezni refleksijski sledi naj bi maksimalni pozitivni vrh vedno zavzel desno stran. Opisano pravilo zapisane pozitivne refleksije velja, kjer ima spodnja plast višjo relativno dielektrično vrednost; in negativne refleksije, kjer ima spodnja plast nižjo relativno dielektrično vrednost kot zgornja plast (Jol, 2009). Programsko orodje Reflexw omogoča popravek ničelnega časa s postopkom zamika začetnega časa

(angl. move start-time), s čimer odstranimo refleksije pred ničelnim časom. Filter deluje nad vsako sledjo neodvisno in za ničelni čas lahko prevzame vrednost, določeno v časovnih specifikacijah naslovne datoteke (angl. fileheader). Uporabnik lahko nastavi tudi ročni zamik začetnega časa poljubno izbranih sledi (Sandmeier, 2014).

Slika 80 prikazuje določitve začetnega časa sledi uporabljenih 270, 400 in 900 MHz anten v testnem bazenu 3 (glej razdelek 3.1). Merilo posameznih ilustracij je zaradi boljše nazornosti različno. Na slikah georadarske sledi 400 in 900 MHz anten sta lepo vidni refleksiji neposrednih valov pred maksimalnim pozitivnim vrhom, kar nas lahko zavede pri določevanju prve površinske refleksije. Vzdlž signala je zato zahtevana precejšnja previdnost pri določevanju, kje nastopi prva površinska refleksija. Med štirimi načini določitve popravka začetnega časa (glej razdelek 2.8.3) smo se ob številnih testiranjih znotraj in med posameznimi radargrami odločili za prvi negativni vrh. Ta je pri vseh tipih anten odlično odražen in je vzdlž istih radargramov časovno stabilen. Časovni intervali, za katere prestavimo vse sledi posameznega radargrama na skupni ničelni čas, se razlikujejo od uporabljene centralne frekvence antene.



Slika 80: Časovni intervali prvih negativnih vrhov posameznih sledi radargrama v testnem bazenu 3:
a) 270 MHz antena; b) 400 MHz antena; c) 900 MHz antena.

Figure 80: Time intervals of the first negative peaks of individual traces of radargram in testing pool 3 with. a) 270 MHz antenna; b) 400 MHz antenna; c) 900 MHz antenna.

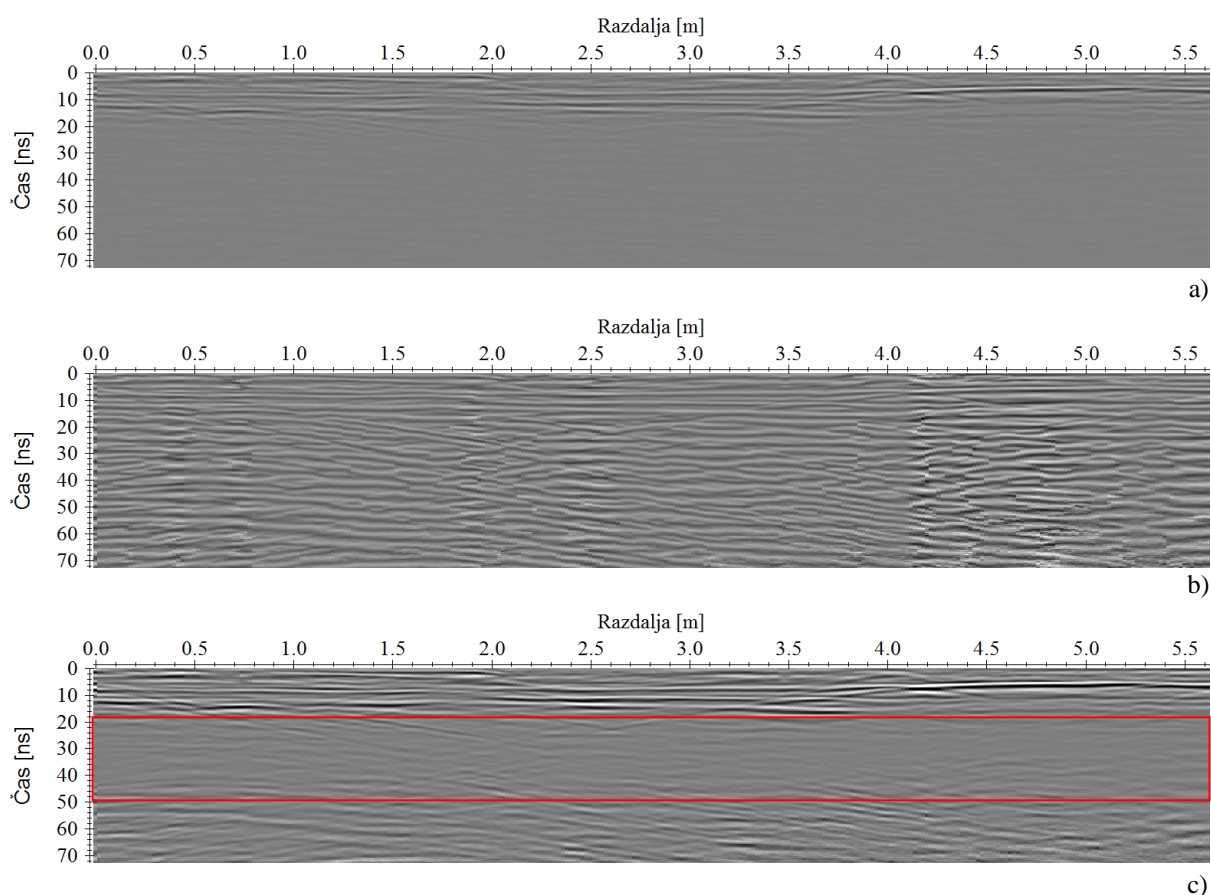
4.12 Časovna omejitev dvojnega časa potovanja signala

Ob poznavanju (približkov) relativne dielektričnosti preiskovanega medija ali hitrosti širjenja EMV v mediju oziroma njegovih plasteh lahko dvojni čas potovanja signala omejimo z globino, do katere je še smiselno iskati ciljne objekte. Filter rezanja sledi oziroma dvojnega časa potovanja signala (angl. time cut) deluje na vsako sled neodvisno. Časovna omejitev ponuja možnost, da omeji vsako sled za vnaprej določen najdaljši dvojni čas. Običajno to storimo za vse sledi v radargramu. Ne gre za stiskanje (angl. compression), ampak se časovno obdobje zmanjša na prednastavljeno/želeno območje. Smiselnost uporabe vidimo ob predpostavki, da je bil pri izvajanju georadarskih meritev časovni razpon zajemanja sledi prevelik in želimo prihraniti prostor na disku ter povečati hitrost naknadne obdelave podatkov. Ob predpostavki, da relativna dielektričnost preiskovanega medija ne presega vrednosti 20 in je največja globina ciljnega objekta manjša od 2 m, lahko radargrame testnih meritev časovno omejimo na 55 ns.

4.13 Ojačitev signala

Ojačitev moči signala je bila uporabljena v smislu povečanja vidnosti nizkoamplitudnih odbojev, s tem pa so bile uravnotežene amplitude vzdolž sledi. Za pridobitev najboljših rezultatov so bile preizkušene in ovrednotene tri ojačitvene funkcije signala, ki ojačajo amplitudo vzdolž sledi: funkcija upadanja energije (angl. energy decay), funkcija AGC in funkcija ročne ojačitve amplitude vzdolž dvojnega časa (angl. manual gain-y).

Funkcija AGC (glej razdelek 2.8.4) je precej ustaljena pri ojačenju globljih nizkoamplitudnih odbojev, ki pa poleg amplitud ojača tudi šum. Jol (2009) navaja posebnost funkcije v občutljivosti nad izbiro velikosti časovnega intervala. Pri zelo majhnem časovnem intervalu, manjšem od 3 % celotnega dvojnega časa sledi ali 25 % valovne dolžine EMV v mediju, se amplituda in šum ojačata enako, kar se odraža v precej »drobljenem/neurejenem« radargramu, kot to prikazuje slika 81b. Pri predolgem časovnem intervalu, daljšem od 10 % celotnega dvojnega časa sledi ali dvakratne valovne dolžine EMV v mediju, prevladujejo v izračunu faktorja ojačitve robovi visokih amplitud. Posledica so vidna območja senc reduciranih amplitud v ozadju refleksij, označena z rdečim okvirjem na sliki 81c, ki zakrivajo polovico celotnega območja vgrajene GI.

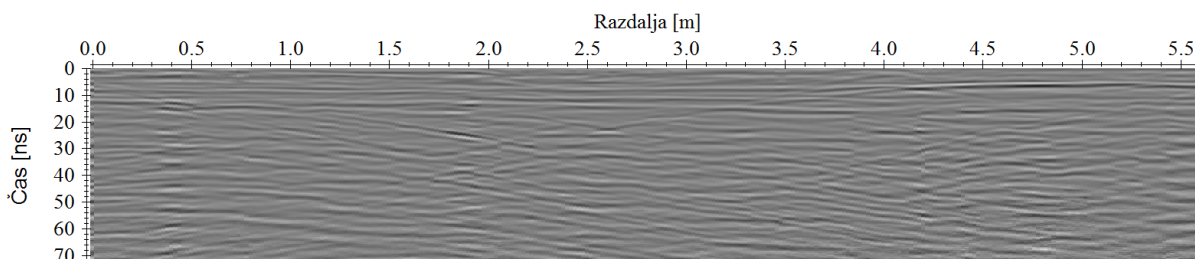


Slika 81: AGC-funkcija ojačitve signala 8. profila 400 MHz antene: a) Pred uporabo funkcije; b) Pri premajhnem časovnem intervalu; c) Pri prevelikem časovnem intervalu.

Figure 81: AGC gain of the signal of 8th profile of 400 MHz antenna. a) Before using the function; b) At too short a time interval; c) At too long a time interval.

Da bi se izognili senčnim območjem, je preudarno izbiranje časovnega intervala ključnega pomena. Pri uporabi funkcije AGC ojačenja je zaradi amplitud, ki presegajo največjo amplitudo vzdolž

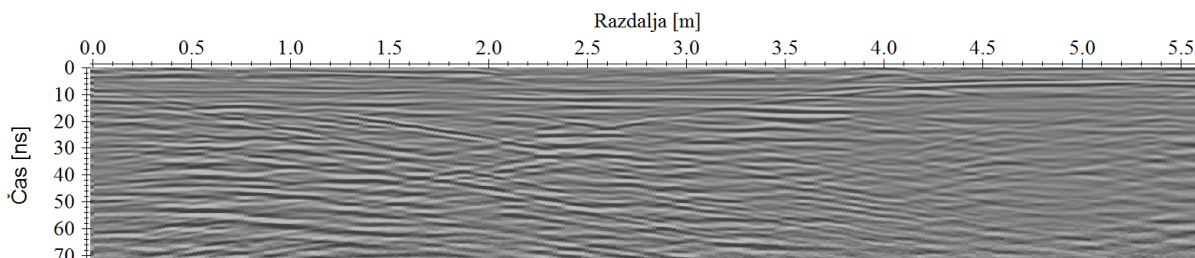
celotnega profila, smiselna uporaba normirnega faktorja, s katerim pomnožimo podatke. Vrednost normirnega faktorja naj bo manj kot ena (glej sliko 82).



Slika 82: AGC-funkcija ojačitve signala 8. profila 400 MHz antene pri pravilno izbranem časovnem intervalu in normirnem faktorju 0,72.

Figure 82: AGC gain of the 8th profile signal of 400 MHz antenna at correctly selected time intervals and 0.72 scaling factor.

V nadaljevanju je uporabljena sferično eksponentna ojačitev, ki je funkcija upadanja energije. S funkcijo upadanja energije avtomatsko popravljamo zmanjšane globinske amplitude signala kot posledico efekta geometričnega širjenja EMV v mediju (glej sliko 83). V naprednejših funkcijah izgube energije je dodan faktor izgube EMV zaradi dušenja, ki ga podajamo v dB/m. Ob poznavanju faktorja izgube je funkcija učinkovita. Žal pa se zaradi nepoznavanja faktorja, tako kot tudi v našem primeru, najpogosteje uporablja a priori vrednost. Naše izkušnje kažejo na občasno preagresivno in preveliko ojačenje, s katerim poudarimo tudi šum na dnu radargramov.

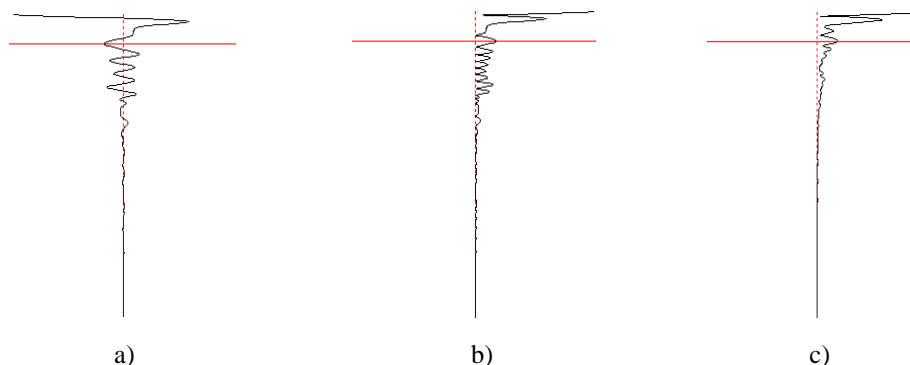


Slika 83: Funkcija »izgube energije« ojačitve signala 8. profila 400 MHz antene ob faktorju 12.

Figure 83: Signal gain using "energy decay" function of 400 MHz antenna 8th profile at the factor 12.

Pri funkciji ročne ojačitve v smeri dvojnega časa na radargramu vnesemo faktor ojačitve, izražen v dB. Predpogoj za ojačitev signala je poznavanje krivulje upadanja jakosti signala. Določili smo 9 enakomernih intervalov dvojnega časa in za posamezni interval izračunali povprečne absolutne vrednosti amplitud vseh refleksijskih sledi vzdolž radargrama (glej sliko 85). Pri 400 MHz anteni je posamezni interval znašal 6,01 ns dvojnega časa oziroma 77 vzorcev.

Slika 84 prikazuje povprečno absolutno vrednost amplitud vseh refleksijskih sledi 400 MHz antene. Te pogojujejo določevanje absolutnih vrednosti amplitud posameznih refleksijskih sledi (angl. absolute trace), ki so del aritmetičnih funkcij, in združevanje vseh absolutnih refleksijskih sledi (angl. stack traces).



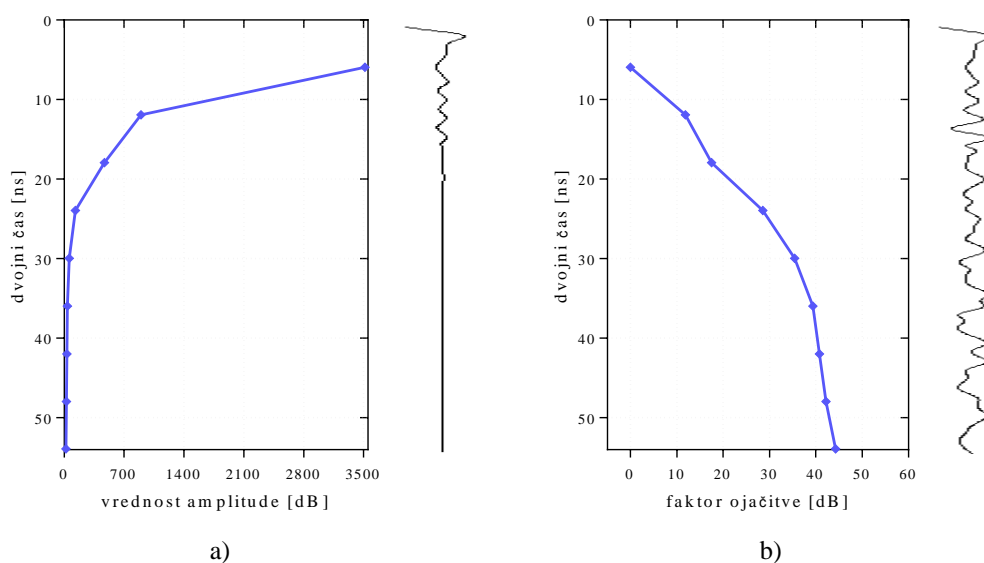
Slika 84: Vrednost amplitude prve refleksijske sledi 8. profila pri 400 MHz anteni: a) Pred določanjem absolutne vrednosti; b) Po določanju absolutne vrednosti; c) Povprečna vrednost amplitude vseh refleksijskih sledi po združitvi (rdeča črta označuje dvojni čas 5,10688 ns).

Figure 84: The value of the amplitude of the first reflection trace of 8th profile at 400 MHz antenna. a) Before determining absolute value; b) After determining absolute value; c) Average amplitude of all reflection traces after stack (red line marks two-way travel time 5.10688 ns).

Na podlagi krivulje upadanja jakosti signala smo z logaritmično funkcijo izračunali faktor ojačitve posameznega intervala vzdolž refleksijskih sledi oziroma celotno krivuljo ojačitve, kot prikazuje slika 85. Faktor podajamo z decibeli, ki izražajo razmerje med spremenljivo količino A_t in fiksno referenčno količino A_k (Gosar in Ravnik, 2007):

$$\text{faktor ojačitve [dB]} = 20 \times \log_{10} \left(\frac{A_k}{A_t} \right) \quad (98)$$

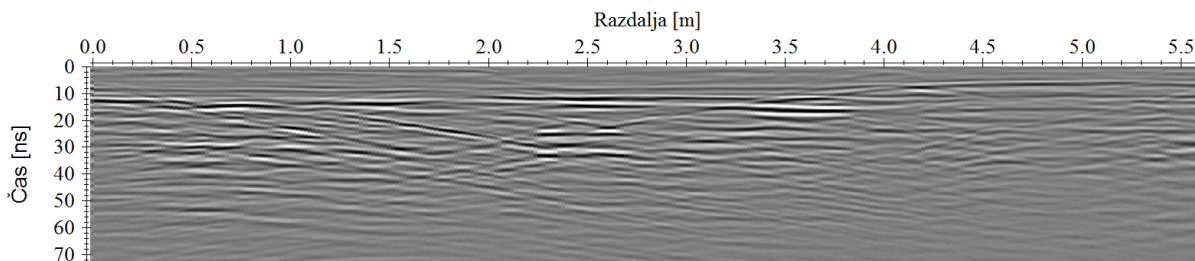
kjer je A_t povprečna vrednost amplitude na obravnavanem časovnem intervalu in A_k zelena povprečna vrednost amplitude vzdolž radargrama oziroma izbranega območja.



Slika 85: a) Upadanje jakosti signala 400 MHz antene z dvojnimi časom in vrednost amplitude prve refleksijske sledi 8. profila; b) Faktor ojačitve jakosti signala in ojačena prva refleksijska sled 8. profila.

Figure 85: a) Signal decay at 400MHz antenna with two-way travel time and amplitude value of the first trace reflection of 8th profile; b) Signal gain factor and first reflection trace gain of 8th profile.

Pri poznavanju približnega položaja ciljnega objekta lahko ročno ojačitev usmerimo na zeleno območje znotraj radargrama. Slika 86 prikazuje primer ročne ojačitve signala, kjer smo poudarili točkovne refleksije ciljnih objektov, preostalega signala vzdolž refleksijskih sledi nismo ojačili. Takšna ročna ojačitev je najzamudnejša, a hkrati najuporabnejša, ker daje najjasnejše rezultate za nadaljnjo interpretacijo.



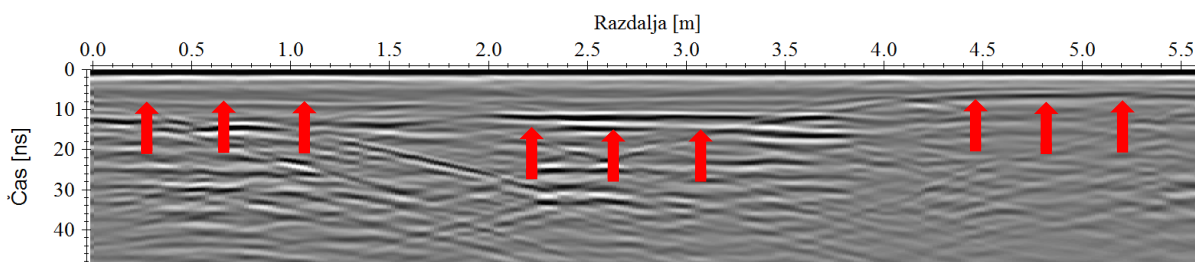
Slika 86: Ciljno usmerjena ročna ojačitev signala 8. profila 400 MHz antene.

Figure 86: Target oriented manual gain function of 400 MHz antenna 8th profile.

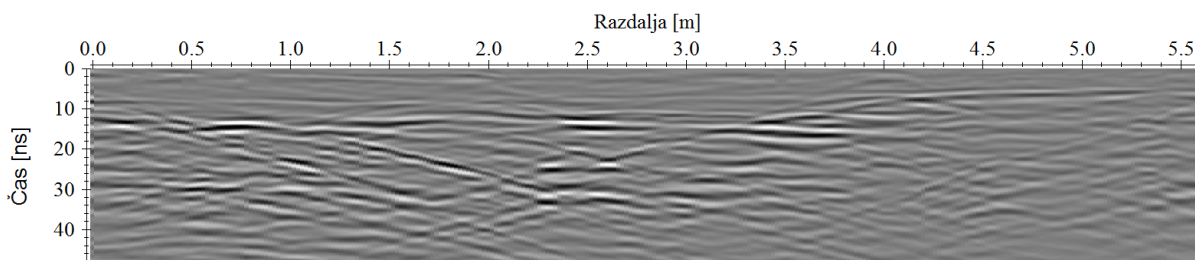
4.14 Odstranitev povprečja signala

Filter odstranitve povprečja signala (angl. subtracting average) deluje nad izbranimi sledmi v času in prostoru in ga uvrščamo med 2D-filte glajenja (glej razdelek 2.8.5). Delovanje filtra smo omejili na posamezni del radargrama. Omejitve postavljamo z intervalom dvojnega časa, nad katerim deluje filter, medtem ko bo ostali del ostal nefiltriran. Filter je iz izbranega okna, omejenega z intervalom števila sledi in dvojnega časa, izračunal srednjo vrednost nad izbranimi podatki in jo odštel od srednjega elementa v vzorcu. Na voljo so nam tri različne srednje vrednosti, od katerih sta najuporabnejši mediana in aritmetična sredina. Filter je učinkovitejši pri manjšem številu sledi v izbranem oknu.

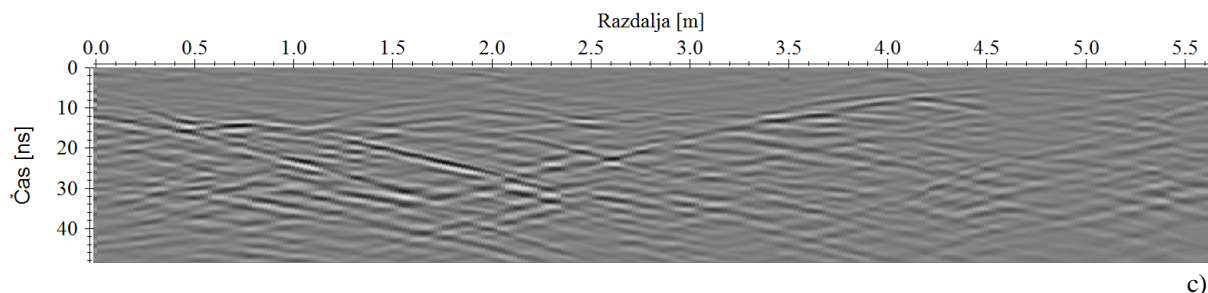
V sklopu te doktorske disertacije, v kateri nas zanimajo predvsem točkovni reflektorji, se je filter pokazal kot odlično orodje za reduciranje učinka horizontalnih reflektorjev. Učinek filtra je viden na sliki 87, kjer smo uporabili okni 100 in 25 sledi. Slabost, ki jo vidimo, je, da lahko s filtrom odstranimo tudi interferenčne refleksije hiperbol, ki so vidne kot horizontalni reflektorji.



a)



b)

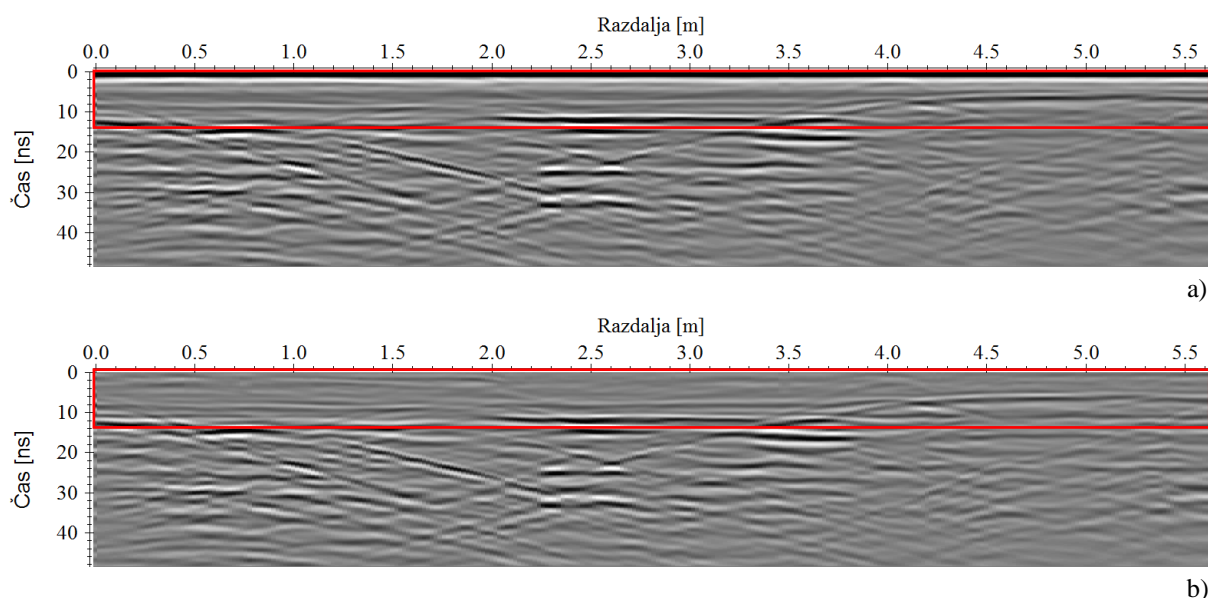


Slika 87: Statično obdelan in ojačen 8. profil 400 MHz antene, kjer rdeče puščice označujejo horizontalne reflektorje: a) Pred uporabo filtra odstranitve povprečja signala; b) Po uporabi filtra odstranitve povprečja signala (100 sledi); c) Po uporabi filtra odstranitve povprečja signala (25 sledi).

Figure 87: Statically processed and gained 8th profile of 400 MHz antenna, where red arrows mark the horizontal reflectors. a) Before using subtracting average filter; b) After using subtracting average filter (100 traces); c) After using subtracting average filter (25 traces).

4.15 Filter odstranitve ozadja in pasovnoprepustno filtriranje

Filter odstranitve ozadja je uporabljen na radargramih, kjer so zaznani zvezni šumi, ki se kažejo v horizontalnih pasovih plitvih struktur kot posledica zvonjenja antene (glej razdelek 2.8.5). Je horizontalni visokofrekvenčni filter z delovanjem nad izbranimi sledmi (Sandmeier, 2014). Njegova prednost je v prostorskem delovanju in omogočanju izbiranja posameznega dela radargrama, nad katerim deluje. Odlično se obnese pri odkrivanju točkovnih reflektorjev, prekritih s horizontalnimi pasovi (glej sliko 88).



Slika 88: Radargram 400 MHz antene, kjer se v plitvih označenih strukturah kaže smiselnost uporabe filtra odstranitve ozadja: a) Pred uporabo filtra; b) Po uporabi filtra.

Figure 88: Radargram of 400 MHz antenna, where significance of using background removal filter is shown in shallow marked structures. a) Before the use of filter; b) After the use of filter.

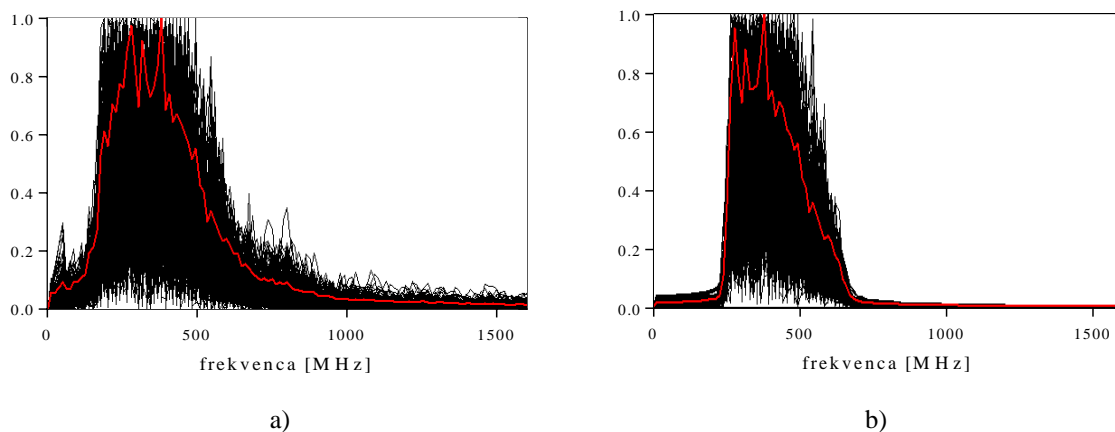
Pasovnoprepustne filtre uporabljamo za odstranjevanje шумov znotraj izbranih frekvenčnih območij, pri čemer slabimo ali odstranimo zelo nizke in zelo visoke frekvence, ki odstopajo od izbrane pasovne

širine uporabljene antene. S tem skušamo izboljšati razmerje med signalom in šumom na radargramih (glej razdelek 2.8.5).

Na radargramih je mogoče zaznati širok spekter frekvenc odbitih valov. Pasovnoprepustni filtri izostrijo (slabnje nizkofrekvenčnih šumov), hkrati pa zgladijo, odstranijo šum v obliki sneženja (slabnje visokofrekvenčnih šumov) iz radargramov. Na njih smo preizkusili dva pasovnoprepustna filtra: frekvenčni pasovnoprepustni filter (angl. Bandpass frequency), ki deluje v frekvenčni domeni (glej razdelek 2.8.5), kjer smo uporabili tip koničasto kosinusno okno (angl. tapered cosine window), v strokovni literaturi imenovano Tukeyjevo okno, in filter angleškega fizika Stephena Butterwortha, imenovan filter Butterworth (angl. bandpass Butterworth), ki deluje v časovni domeni. Filtra delujeta nad vsako sledjo neodvisno.

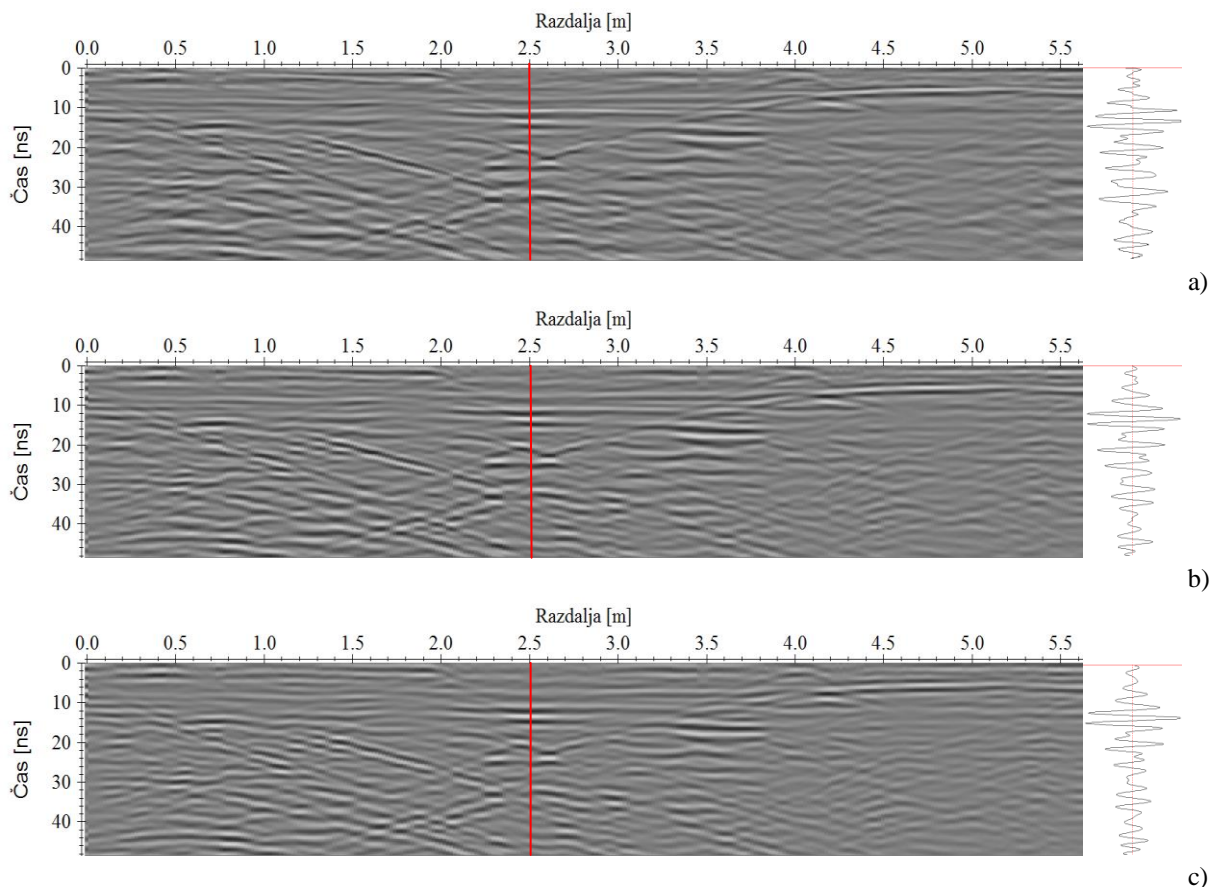
Frekvenčno območje delovanja filtra koničastega kosinusnega okna podajamo s štirimi frekvenčnimi vrednostmi. Koničasto kosinusno okno je predstavljeno s spodnjo (angl. low cut) vrednostjo frekvence in spodnjo (angl. lower plateau) vrednostjo platoja ter zgornjo (angl. high cut) vrednostjo frekvence in zgornjo (angl. upper plateau) vrednostjo platoja. Koničasto kosinusno okno se uporablja za preprečevanje neželene posledice delovanja filtra. Nad zgornjo in pod spodnjo mejo frekvence odstranimo zelo nizke in zelo visoke frekvence, ki se jim dodeli ničelne amplitude. Frekvenčno območje delovanja filtra Butterworth podajamo samo z zgornjo in spodnjo mejo frekvence (Sandmeier, 2014).

Pri uporabi 400 MHz antene predvidevamo, da so vse refleksije ciljnih objektov znotraj izbranega frekvenčnega območja oziroma pasovne širine 1,6-kratnika centralne frekvence. Interval pasovnoprepustnega filtriranja je od 250 do 640 MHz (glej sliko 89). Jasno so vidne odstranjene frekvence. Kot najboljšo se je izkazalo frekvenčno pasovnoprepustno filtriranje z uporabo koničastega kosinusnega okna. Ocena temelji na spremljanju izboljšanja ločljivosti in odstranitvi šuma v globljih predelih, kjer je doseg antene enak ali slabši njegovi zmogljivosti (glej sliko 90).



Slika 89: Frekvenčni spekter vseh sledi radargrama (rdeča črta prikazuje srednjo vrednost), zajetega z anteno s centralno frekvenco 400 MHz: a) Spekter pred pasovnoprepustnim filtriranjem; b) Spekter po pasovnoprepustnem filtriranju.

Figure 89: Frequency spectrum of all radargram traces (red line indicates mean value), covered with antenna with central frequency of 400 MHz: a) Before band-pass filtering; b) After band-pass filtering.



Slika 90: Radargram 400 MHz antene in prikaz vpliva na amplitudo 125 sledi (rdeča črta): a) Radargram pred pasovnoprepustnim filtriranjem; b) Radargram po uporabi filtra Butterworth (230/650); c) Radargram po uporabi frekvenčnega pasovnoprepustnega filtra in koničastega kosinusnega okna (230/320/520/650).

Figure 90: Radargram using 400 MHz antenna and the influence on the amplitude of 125 traces (red line). a) Before band-pass filtering; b) After using band-pass Butterworth filter (230/650); c) After using frequency band-pass filtering and tapered cosine window (230/320/520/650).

4.16 Filtriranje f-k

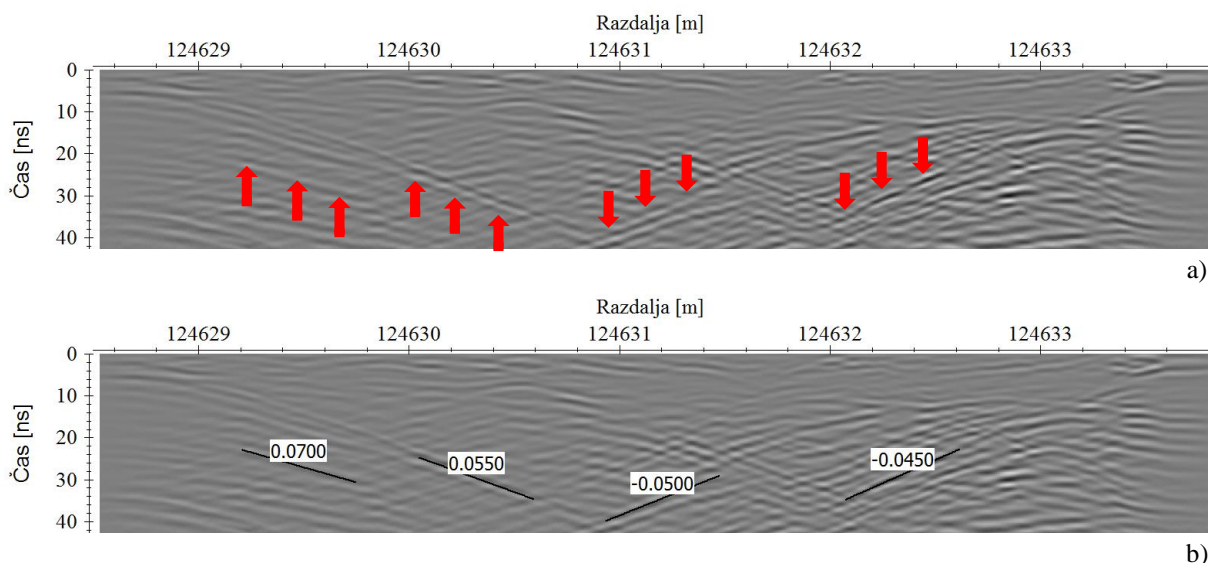
Namen uporabe 2D f-k-filtra je bilo odpravljanje neželenih linearnih refleksij z določenim naklonom. Na radargramih v testnih bazenih se pojavljajo linearne refleksije z določenim naklonom kot posledica odbojev EMV od pregradnih sten med bazeni in zračnih odbojev. F-k-filter ali Fourierjeva transformacijska tehnika je zasnovana in se uporablja v domeni frekvence (f) in valovnega števila (k) (Yilmaz, 1987). 2D-Fourierjeva transformacija je integralska transformacija, ki transformiranko prestavi iz časovno-prostorske domene ($t-x$) v domeno frekvence in valovnega števila, imenovano f-k-domena (Sandmeier, 2014).

Hitrostni oziroma f-k-filter deluje nad izbranimi podatki in se definira na spektru moči v f-k-domeni. Pri pretvorbi v spekter moči v f-k-domeni časovna os radargrama predstavlja os frekvence v izbrani frekvenčni razsežnosti [MHz] in prostorska os, pretvorjena v KX-os, valovna števila, pozitivna za levo smer vpada in negativna za desno smer [$1/m$]. Spekter moči v f-k-domeni prikazuje slika 92a. Linearne refleksije s padajočim naklonom so preslikane na desnem delu f-k-spektra, medtem ko so

refleksije z naraščajočim naklonom preslikane na levi strani. Horizontalne refleksije predstavljajo male vrednosti valovnega števila k na sredini f-k-spektra.

Na f-k-spektru smo označili eno ali več območij, znotraj katerih smo zadržali signal horizontalnih reflektorjev. Iz 2D-spektra smo izbrali območje filtra. To območje je najpogosteje pahljačaste oblike, omejeno z dvema premicama, ki poteka skozi izhodišče in se lahko opredeli ročno ali z opredeljitvijo hitrostnega območja [m/ns] (Gosar, 2000; Sandmeier, 2014). Uporabljamo lahko razpone filtra za samo negativne ali pozitivne vrednosti valovnega števila na KX-osi. Območje delovanja filtra lahko definiramo z vnosom mejne hitrosti, od katere se vse hitrosti na spektru obdržijo ali brišejo. V našem primeru je priročnejša rešitev vnosa hitrostnega območja. Območje pahljačaste oblike omejujeta dve hitrosti, ki se ob vnosu samodejno pretvorita v premici, prikazani na f-k-spektru. Pahljači smo definirali za negativno in pozitivno stran f-k-spektra. Refleksije, ki ustrezajo podanim naklonom, se iz f-k-spektra odstranijo. S pomočjo inverzne 2D-Fourierjeve transformacije filtriran profil f-k-spektra spremenimo nazaj v t-x-domeno.

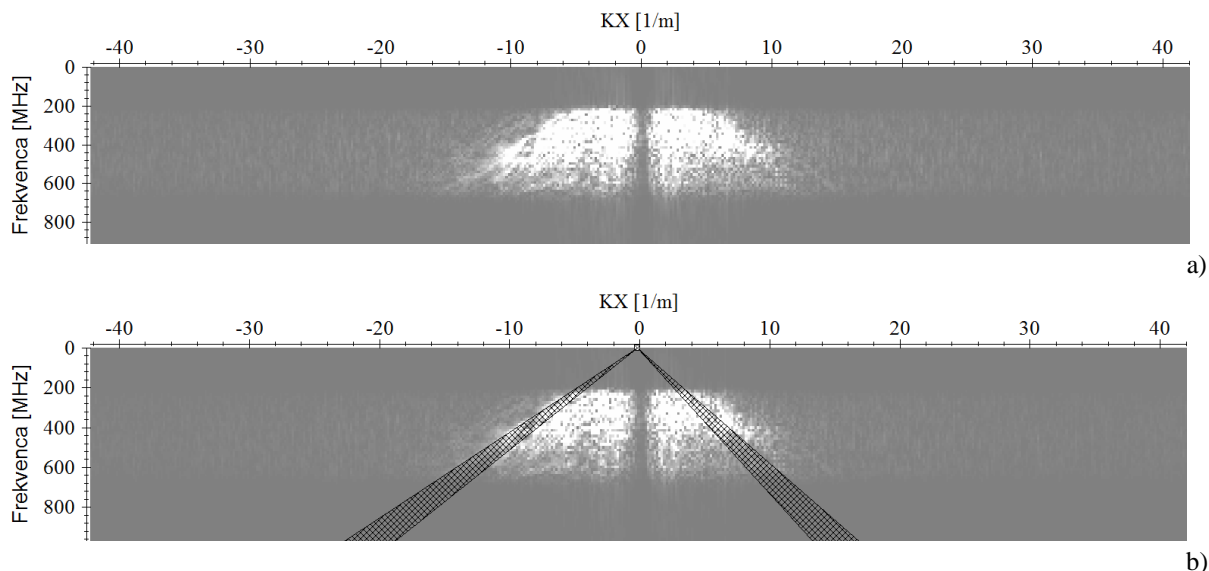
Rezultate f-k-filtriranja smo prikazali za prvi profil 400 MHz antene. Nakloni linearnih refleksij se spreminjajo in jih je zaradi tega razloga smiselno preveriti za vsak profil. Določamo jih s prilagoditvijo navidezne daljice hitrosti (angl. velocity adaptation – linear features) v m/ns. Slika 91b prikazuje interval naklonov izrazitih stenskih refleksij, ki znašajo od +0,070 do +0,055 za pozitivno in od -0,045 do -0,050 m/ns za negativno smer.



Slika 91: Prvi profil 400 MHz antene: a) Linearne refleksije različnih naklonov kot posledica stenskih refleksij EMV v bazenu; b) Določeni nakloni linearnih refleksij z navidezno daljico hitrosti za pozitivno in negativno smer.

Figure 91: The first profile using 400 MHz antenna. a) Linear reflection of different inclinations as the consequence of wall reflection of EMW in the pool; b) Inclinations of linear reflections with virtual positive and negative velocity range segments.

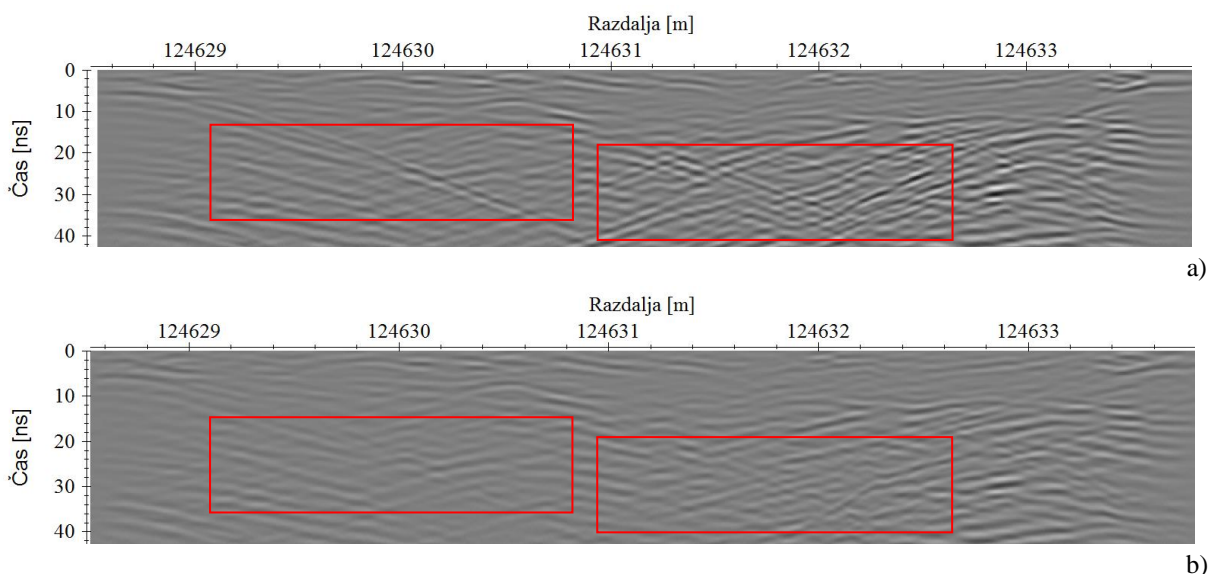
Slika 92a prikazuje pretvorjeni radargram z 2D-Fourierjevo transformacijo v spekter moči v f-k-domeni. Spekter je smiselno omejen z izbrano frekvenčno razsežnostjo uporabljene 400 MHz antene. Na f-k-spektru območje pahljačaste oblike negativno [0,043–0,052] in pozitivno [0,072–0,057] stran omejujeta prej določena intervala hitrosti, vidna na sliki 92b. Uporabili smo opcijo odstranitve signala znotraj pahljače.



Slika 92: F-k-filtriranje prvega profila 400 MHz antene: a) Spekter moči v f-k-domeni; b) Območje delovanja filtra pahljačaste oblike, opredeljeno za negativno in pozitivno stran.

Figure 92: F-k filtering of the first profile using 400 MHz antenna. a) Power spectrum in the f-k domain; b) Operating range of fan shaped filter with the positive and negative side definitions.

Očiščen profil f-k-spektra prek inverzne 2D-Fourierjeve transformacije spremenimo nazaj v t-x-domeno, iz slike 93b je razvidno, da so nekatere neizrazite in po naklonu različne linearne refleksije ostale. F-k-filtriranje je smiselno ponoviti, če menimo, da preostale linearne refleksije zakrivajo refleksijske hiperbole iskanih ciljnih objektov. Smiselno je tudi izbrati omejena območja radargrama, nad katerimi želimo, da f-k-filter deluje. Uporabnost f-k-filtriranja pri odstranjevanju linearnih stenskih in zračnih refleksij lahko ocenimo kot dobro, vendar zahteva takšno filtriranje izkušenega uporabnika. S postopkom moramo toliko odstraniti linearne refleksije, da pri interpretaciji niso več moteče. Hkrati obstaja bojazen, da lahko s filtrom odstranimo tudi del refleksijskih hiperbol, ki imajo enak naklon, in nam je s tem otežena ali celo onemogočena interpretacija.

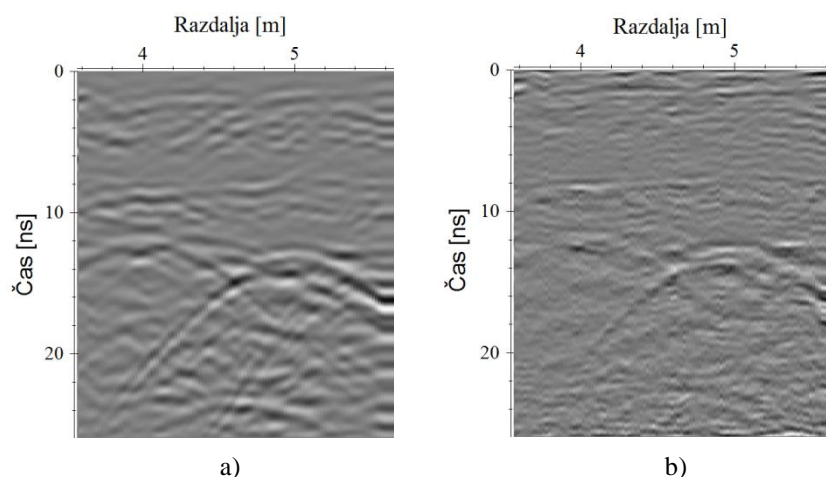


Slika 93: F-k-filtriranje prvega profila 400 MHz antene: a) Pred f-k-filtriranjem; b) Po f-k-filtriranju.
Figure 93: F-k filtering of the first profile of 400 MHz antenna. a) Before f-k filtering; b) After f-k filtering.

4.17 Dekonvolucija

Namen uporabe dekonvolucije (glej razdelek 2.8.6) je pri bazenskih radargramih georadarskih profilov v odstranjevanju ponavljajočih se refleksij in šumov. Uporabljena je dekonvolucija, zasnovana na Levinsonovem algoritmu, katerega osnovo predstavlja Winerjev filter. Nekatero vgrajeno GI sestavljajo kovinski elementi, ki posledično povzročajo močne ponavljajoče se refleksije. Postopek dekonvolucije deluje nad vsako vhodno sledjo radargrama, za katero se izračuna korelacija nad predhodno označenim številom vzorcev in se uporabi kot vhodni signal v Levinsonovem algoritmu, ki rekurzivno izračuna filtrirano dekonvolucijsko sled. Sledi konvolucija med vhodno in dekonvolucijsko sledjo (Sandmeier, 2014).

Na sliki 94 je prikazana uporaba dekonvolucije na omejenem območju radargrama 5. profila 900 MHz antene, kjer so infrastrukture, ki povzročajo vidne ponavljajoče se refleksije. Vhodne parametre smo po nekajkratnih iteracijah prilagodili glede na najboljše rezultate ter površinsko območje, nad katerim smo izvedli dekonvolucijo. Izbrali smo območje med 180. in 284. sledjo. Za začetni in končni dvojni čas, ki določata območje avtokorelacije, se ob zmanjševanju ponavljajočih se refleksij uporabljajo večje vrednosti. Interval smo zato omejili od 10 do 30 ns. Dolžino filtrirne sledi smo omejili na 10 ns, medtem ko smo delež odstranitve belega šuma nastavili na rang 40. Tako obdelam profil smo za boljšo vizualizacijo ojačali s funkcijo ročne ojačitve amplitude vzdolž dvojnega časa.



Slika 94: Območje dekonvolucije 5. profila 900 MHz antene (avtokorelacija: 10–30 ns, dolžina filtrirane sledi: 10 ns, delež odstranitve belega šuma: 50 %): a) Pred dekonvolucijo; b) Po dekonvoluciji.

Figure 94: Deconvolution range of profile 5 using 900 MHz antenna (autocorrelation: 10–30 ns, length of filtered trace 10 ns, amount of white noise removal: 50%): a) Before deconvolution; b) After deconvolution.

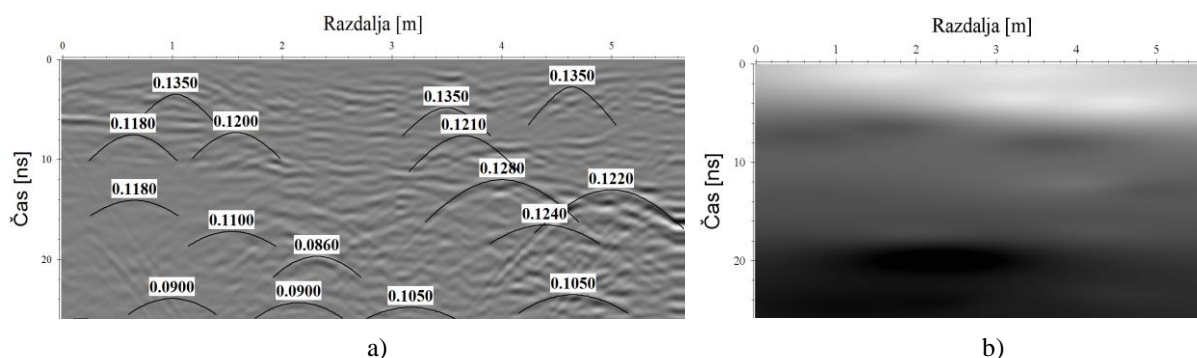
Kot navajajo številni avtorji (Maijala, 1992; Rees in Glover 1992; Neal, 2004), dekonvolucija tudi v našem primeru pri obdelavi georadarskih profilov ni dala pričakovanih rezultatov. Ti so se izkazali za nezadovoljive, v nekaterih primerih so se celo zgladile oziroma odstranile pomembne refleksije, zato je pri njeni uporabi potrebna velika pazljivost. Dekonvolucije zaradi vsega navedenega nismo vključili v model.

4.18 Določevanje globine (hitrosti)

Osnova določevanja globin ciljnih objektov je globinska migracija radargramov iz časovne (x,t) v globinsko (x,z) domeno, za kar moramo poznati hitrostne funkcije oziroma hitrost širjenja EMV v vsaki plasti voziščne konstrukcije (Gosar in Ravnik, 2007). Znanih je več metod določitve približka hitrosti EMV v mediju ali njegovih delih. Direktnih metod (glej razdelek 2.8.9) v tej disertaciji nismo uporabljali.

Hitrostni model sestavljajo: primerna metoda določitve ocene hitrosti širjenja EMV v podpovršju oziroma posameznih plasteh, primerna transformacija dvakratnega časa potovanja EMV v globino in na koncu še geometrična korekcija v obliki migracijskega postopka. Uporaba povprečne hitrosti v mediju (angl. constant mean velocity) je pri voziščnih konstrukcijah, pri katerih imamo opravka z več plastmi in GI-objekti v različnih globinah, precej groba, pogostokrat se izkaže za nenatančno. Težava nastopi pri večplastnih strukturiranih medijih, kjer dejansko potrebujemo hitrost širjenja EMV v plasti, skozi katerega prehaja. Smiselno je uporabljati 2D-hitrostne porazdelitve oziroma modele (angl. 2D velocity model). V 2D-hitrostnih modelih lahko uporabimo globinsko migracijo ali pa pretvorbo časov v globino (angl. timedepth conversion) in časovno migracijo. Hitrostno funkcijo običajno podajamo prek 2D-hitrostne datoteke (angl. 2D velocity file).

Uporabili smo dve različni metodi določitve ocene hitrosti širjenja EMV v bazenih. V prvem koraku smo uporabili metodo ujemanja oblike hiperbole, kjer je določevanje hitrostne funkcije na podlagi 2D-hitrostne porazdelitve zasnovano na interpolaciji med točkovno podanimi hitrostmi na posameznem profilu (glej sliko 95). Okvirno lahko približek hitrostne funkcije ocenimo s prilagajanjem oblike hiperbol, ki nastopijo pri odbojih od objektov s krivuljo izračunane hitrostne hiperbole (angl. hyperbolic velocity analysis), tako da ji spreminjamo hitrost, ki določa njeno obliko oziroma naklon (Sandmeier, 2014). Geometrija oziroma naklon hiperbol je funkcija hitrosti širjenja EMV v mediju in premera ciljnega objekta (glej razdelek 4.21) (Leckebusch, 2000). Pogoj za uporabo so čiste in dobro izražene hiperbole na radargramu profila (Jol, 2009). Metoda je omejena le na radargrame, kjer so hiperbole vidne, in njihovo razporeditev v prostoru, kar lahko pomeni težavo na radargramih, kjer je hiperbol malo ali nič, in se posledično srečamo s horizontalnimi ali prostorsko omejenimi območji (Jol, 2009).



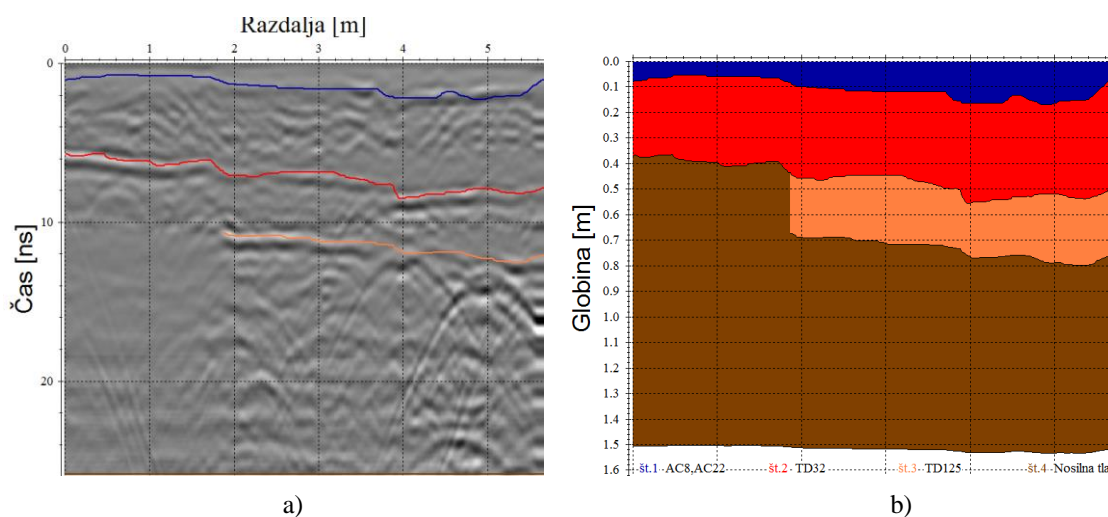
Slika 95: Ocena hitrosti širjenja EMV na 5. profilu 900 MHz antene pred migracijo: a) Metoda ujemanja hiperbol, s katero podamo oceno točkovnih hitrosti; b) Hitrostno polje, izračunano na podlagi točkovnih hitrosti (svetlejša barva pomeni večje, temnejša manjše hitrosti širjenja EMV).

Figure 95: Estimation of velocity of EMW propagation on profile 5 before migration using 900 MHz antenna: a) Hyperbola fitting method for estimating velocity; b) Velocity field, calculated on the basis of velocity point estimation (lighter colour represents higher whereas darker colour lower velocity of EMW propagation).

Vrednosti ocenjenih hitrosti 2D-hitrostne datoteke bazenskih profilov, po metodi ujemanja oblike hiperbole, so obremenjene s pogreškom nepoznavanja premera ciljnih objektov in so se gibale od 0,135 do 0,09 m/ns (glej sliko 95).

V našem primeru so na profilih vidne izrazite lateralne in hkrati manjše vertikalne strukturne spremembe, ki nakazujejo prehajanje EMV med posameznimi plastmi voziščnih konstrukcij (glej razdelek 3.3). Ob poznavanju približnih debelin voziščnih konstrukcij v testnih bazenih smo kot drugo za oceno globin uporabili metodo določitve hitrosti po plasteh (angl. layer velocity). Izvedli smo Kirchoffovo časovno migracijo z a priori ocenjeno povprečno približno hitrostjo širjenja EMV (0,13 m/ns), katere rezultat so odboji v izvornih točkah. Ob poznavanju približkov debeline med referenčnimi izvornimi točkami in časa potovanja lahko ocenimo srednjo vrednost približka hitrosti posamezne plasti. Pri oceni hitrosti v najnižji plasti, kjer niso nastopale lateralne refleksije, smo si pomagali s poznano globino referenčnega ciljnega objekta.

Slika 96 prikazuje označene refleksije (glej razdelek 4.22), za katere sklepamo, da predstavljajo meje med plastmi voziščne konstrukcije in hitrostno polje vrednosti ocenjenih hitrosti 2D-hitrostne datoteke bazenskih profilov, ki se gibljejo od 0,132 do 0,08 m/ns.



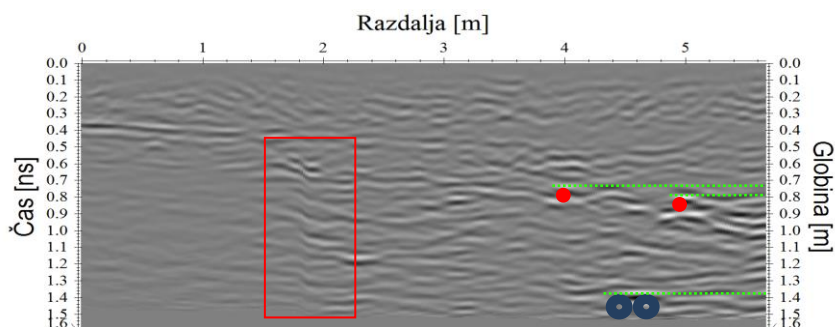
Slika 96: Ocena hitrosti širjenja EMV na 5. profilu 900 MHz antene: a) Označene refleksije meja med plastmi voziščne konstrukcije; b) Hitrostno polje z obarvanimi hitrostmi v posameznih plasteh (0,132 m/ns – modra, 0,121 m/ns – rdeča, 0,12 m/ns – oker, 0,080 m/ns – rjava).

Figure 96: Estimation EMW propagation velocity on 5th profile using 900 MHz antenna: a) Marked reflections of borders between pavement structure layers; b) Velocity field with coloured velocity values in individual layers (0,132 m/ns – blue, 0,121 m/ns – red, 0,12 m/ns – yellowish, 0,080 m/ns – brown).

Hitrostna polja profilov smo uporabili za pretvorbo časa v globino, pri čemer ne gre za globinsko migracijo, ampak za transformacijo časovne osi v globinsko os (Sandmeier, 2014). Vhodni parametri transformacije so 2D-hitrostne datoteke in razpon globinske osi. Pri pretvorbi smo uporabili hitrostna polja, ocenjena po obeh metodah hitrosti širjenja EMV v bazenih.

Slika 97 prikazuje pretvorbo časa v globino (angl. timedepth conversion) s hitrostnim poljem, pridobljenim po metodi določitve hitrosti po plasteh. V prvem delu profila (bazen 1) je jasno viden vertikalni zamik (rdeč kvadrat), ki nakazuje različne hitrosti širjenja EMV v posameznih bazenih.

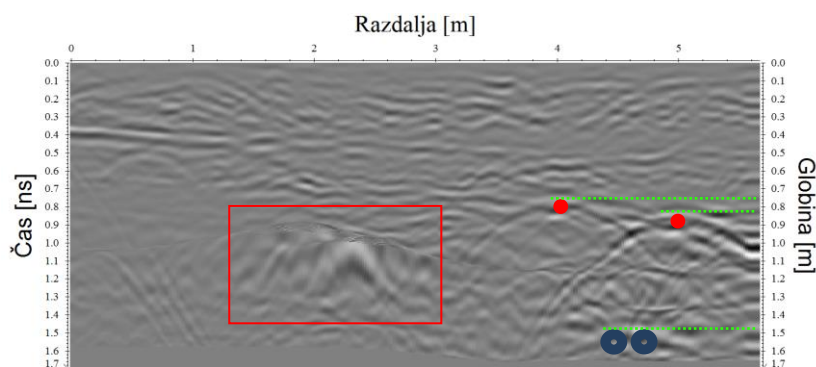
Zamik je posledica različnih plasti in debelin voziščnih konstrukcij posameznih bazenov. Vertikalni zamik, viden kot posledica hitrosti širjenja EMV, pravilno nakazuje odsotnost posteljice v prvem bazenu (glej razdelek 3.1) in posledično manjše hitrosti v zemljini, ki nastopi takoj po nevezani nosilni plasti TD 32 v prvem bazenu. V zadnjem delu profila (bazen 3) smo označili položaje in globine treh izrazitih odbojev. Gre za odboje od električnih vodov z zaporednima številčkama 11 in 12 (rdeča kroga – glej razdelek 3.5.4) in vodovodnih cevi z zaporednima številčkama 5 in 7 (modri krožnici – glej razdelek 3.5.2).



Slika 97: Pretvorba časa v globino 5. profila 900 MHz antene s hitrošnim poljem, pridobljenim po metodi določitve hitrosti po plasteh.

Figure 97: Time to depth conversion of profile 5 using 900 MHz antenna with the velocity field calculated on the basis of layer velocity method.

Slika 98 prikazuje pretvorbo časa v globino s hitrošnim poljem, pridobljenim po metodi ujemanja hiperbol. V drugem delu profila (bazen 2) je jasno vidna diskontinuiteta (rdeč kvadrat), ki nakazuje napačno določitev ocene hitrosti širjenja EMV. Iz slike 95 lahko na identičnem delu profila vidimo točkovno hitrost 0,086 m/ns, umeščeno med hitrosti 0,11 m/ns in 0,09 m/ns, kot razlog vidne diskontinuitete. V zadnjem delu profila (bazen 3) smo označili položaje in globine treh izrazito dobro vidnih refleksij vgrajene GI. Refleksije predstavljajo identične infrastrukture, kot so prikazane na sliki 97.



Slika 98: Pretvorba časa v globino radargrama 5. profila 900 MHz antene s hitrošnim poljem, pridobljenim po metodi ujemanja hiperbol.

Figure 98: Time to depth conversion of profile 5 using 900 MHz antenna with the velocity field calculated on the basis of hyperbola fitting.

Obe metodi imata svoje prednosti in slabosti. Prva je odvisna od poznavanja, števila, prostorske razporeditve in premera ciljnih objektov vidnih odbojev v obliki hiperbole, druga od poznavanja dejanske debeline plasti voziščnih konstrukcij, ki se pogostokrat razlikuje od navedenih v projektnih dokumentacijah, in natančnosti določevanja linearnih refleksij. Obe metodi sta precej odvisni od

subjektivnih ocen operaterja. Ima pa metoda določitve hitrosti po plasteh prednost v smislu lažjega prepoznavanja linearnih refleksij vzdolž voziščne konstrukcije. Iz slik 97 in 98 je razvidna očitna globinska razlika, izračunana po obeh metodah.

Izračunane globine označene GI z zaporednimi številkami 11, 12, 5 in 7 znašajo 0,75, 0,82 in 1,48 m po metodi ujemanja hiperbol, GI 0,73, 0,79 in 1,39 m po metodi določitve hitrosti po plasteh. Razliko pripisujemo majhnemu številu dobro vidnih refleksijskih hiperbol, neupoštevanju premera cilindričnih objektov in subjektivni oceni hitrosti po metodi ujemanja hiperbol. Višine vgrajene GI, opredeljene z geodetskimi metodami izmere (glej razdelek 4.2.3), smo prevzeli kot točne. Na podlagi globinskih odstopanj ΔH lahko trdimo, da nam daje metoda določitve hitrosti po plasteh točnejše rezultate.

Pri izračunu hitrosti je ključnega pomena poznavanje relativne dielektričnosti medija oziroma njegovih plasti (glej razdelek 2.5.3). Relativne dielektričnosti posameznih plasti voziščne konstrukcije se razlikujejo in s tem ključno vplivajo na določanje globine GI. Pri ocenjevanju hitrosti širjenja EMV nismo uporabili ocenjenih relativnih dielektričnosti, pridobljenih na podlagi vzorčenja (glej razdelek 4.7), ker v večini dejanskih georadarskih meritev nastopajo kot neznanke. Navajamo le točnost relativnih dielektričnosti metode določitve hitrosti po plasteh. Pri tej metodi smo povprečili dvojne čase med posameznimi plastmi prečnih profilov 400 MHz antene (glej Slika 108), od koder smo s pomočjo predvidenih konstrukcijskih debelin izračunali hitrost širjenja EMV v plasteh posameznega profila in posredno pridobili vrednosti relativnih dielektričnosti. Lateralna refleksija, ki pomeni mejo med zemljino in dnom bazenov, je slabo določljiva, posledično nismo računali relativne dielektričnosti zemljine. Podobno smo zaradi nedoločljivosti meje med plastema asfaltnih zmesi (AC 8 surf in AC 22 base) združili obe plasti po enačbi (97). Ocenjene relativne dielektričnosti posameznih bazenskih plasti na podlagi vzorčenja smo prevzeli kot referenčne. Za cenilko točnosti relativnih dielektričnosti posameznih bazenskih plasti z metodo določitve hitrosti po plasteh smo uporabili RMSE, rezultati so prikazi v preglednici 24:

$$\Delta \varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_i' \quad (99)$$

$$RMSE_{(\Delta \varepsilon_i)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta \varepsilon_i^2}{n}} \quad (100)$$

kjer so ε_i' relativne dielektričnosti, izračunane z metodo določitve hitrosti po plasteh, ε referenčna relativna dielektričnost na podlagi vzorčenja, $\Delta \varepsilon_i$ odstopanja relativne dielektričnosti i -tega profila posamezne bazenske plasti ter n število vseh prečnih profilov v bazenu.

Preglednica 24: RMSE relativne dielektričnosti po metodi določ. hitrosti po slojih v testnih bazenih.

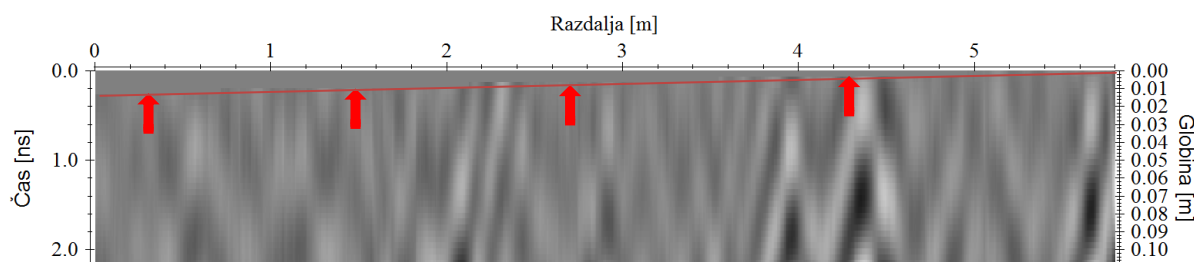
Table 24: RMSE of dielectric constant by using layer velocity function method in testing pools.

	Referenčne relativne dielektričnosti ε_r [] (metoda vzorčenja/laboratorij)			RMSE [] – prečnih profilov 400 MHz (metoda določ. hitr. po plasteh)		
	$\varepsilon_{(AC-surf+ base)}$	$\varepsilon_{(TD 32)}$	$\varepsilon_{(TD 125)}$	$\varepsilon_{(AC-surf+ base)}$	$\varepsilon_{(TD 32)}$	$\varepsilon_{(TD 125)}$
Bazen 1	5,45	6,34	/	0,291	0,201	/
Bazen 2	5,54	6,46	6,30	0,385	0,321	0,058
Bazen 3	5,56	6,62	6,42	0,404	0,481	0,178

Točnost metode določevanja hitrosti po plasteh je odvisna predvsem od poznavanja dejanskih debelin plasti voziščnih konstrukcij pri gradnji ter doslednosti in natančnosti pri določevanju njihovih linearnih refleksij na radargramih. Večji RMSE je zaznati pri asfaltnih zmeseh in nevezanih spodnjih nosilnih plasteh, kar pripisujemo tanki plasti in natančnosti določevanja laterne refleksije ter posledično napaki pri določevanju dvojnih časov širjenja EMV v posamezni plasti.

4.19 Topografska korekcija

Pred migracijskim postopkom smo izvedli topografsko korekcijo (glej razdelek 2.8.8). Zaradi izjemno majhnih, skoraj ničnih naklonov v testnih bazenih ($> 0,8\%$) smo se zadovoljili z rezultati topografske korekcije. Osnovo topografski korekciji so predstavljale izmerjene višinske razlike med sledmi v fazi zajema podatkov. Uporabili smo funkcijo topografske korekcije (angl. static coorection) na podlagi podatkov višin posameznih sledi (angl. z-tracecoord). Vse sledi smo premaknili navzdol in napolnili časovni razpon z ničlami. Premik se izvrši glede na namišljeno horizontalno ravnino, ki je predstavljena z najvišjo višino na profilu. To pomeni, da je na podlagi dane hitrosti območje med trenutnim topografskim nivojem in namišljeno horizontalno ravnino napolnjeno oziroma prazno (glej Slika 99). Smiselnost uporabe topografske migracije vidimo predvsem pri georadarskih podatkih, zajetih pri naklonih, večjih od 3% .



Slika 99: Topografska korekcija četrtega profila 400 MHz antene. Zaradi lažje ponazoritve majhnega naklona je merilo razdalje in globine 30 : 1.

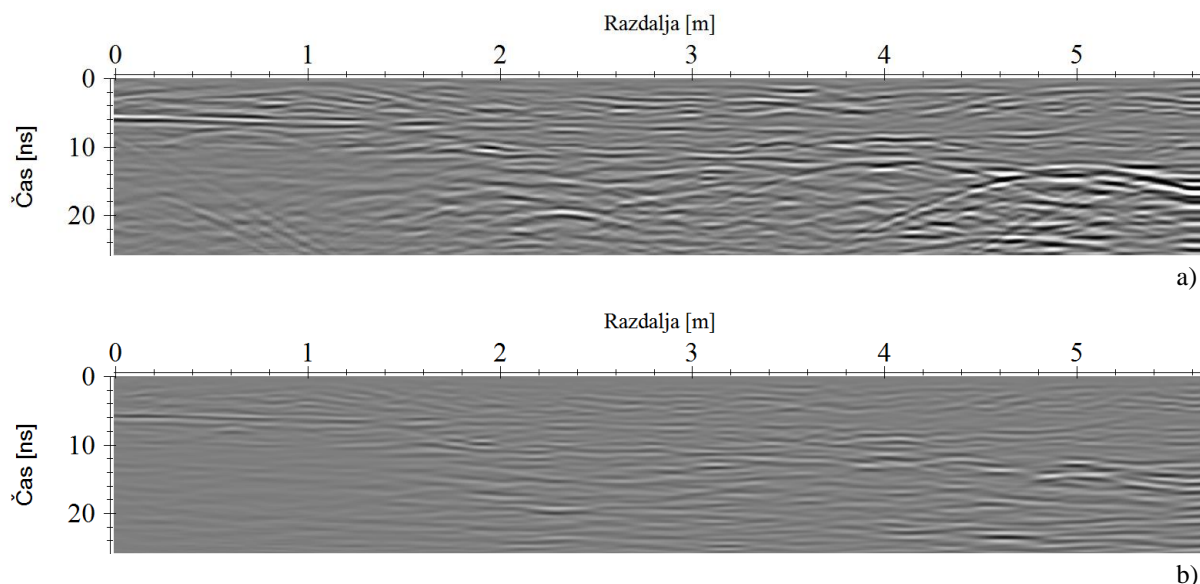
Figure 99: Topographic correction of profile 4 using 400 MHz antenna. For easier illustration of small inclination the scale of length and depth is 30 : 1.

4.20 Migracija

V praksi dobimo relativno izboljšano sliko podpovršja z uporabo migracijskih tehnik in predhodno analizo ocenjenih hitrosti širjenja EMV v mediju oziroma njegovih plasteh (glej razdelek 3.3 in 4.18). Migracija je ključna metoda obdelave radargramov. V večini voziščnih konstrukcij so spremembe bočnih gradientov hitrosti majhne do srednje, s čimer upravičujemo uporabo časovnih migracij. Rezultat v časovni domeni lahko primerjamo z nemigriranimi profili (Gosar in Ravnik, 2007).

Namen uporabe migracije je bil izmerjene časovne signale pretvoriti v pravilne prostorske položaje reflektorjev, ki refleksijske hiperbole reflektorjev skrči v njihove vrhove oziroma izvorne točke odbojev. Prav tako popravi prostorske položaje oziroma nagibe linearnih refleksij. Pri migraciji se popravi ločljivost in amplitude sledi na osnovi iskanja idealne refleksijske hiperbole (glej razdelek 2.8.7). Leckebusch (2003) ne zaznava razlik med Kirchhoffovo, f-k- (Stolt), phase-shift in finite-difference metodo migracij. V postopku migracije smo zato profile migrirali s pogosto uporabljeno Kirchhoffovo migracijo, kjer smo uporabili 2D-hitrostne datoteke širjenja EMV v mediju, kot to

prikazuje Slika 100. Kirchhoffova 2D-hitrostna migracija v časovni domeni (angl. Kirchhoff 2D-velocity migration) poleg ocenjenih 2D-hitrostnih modelov zahteva še podatek o širini seštevanja, ki ga podamo s številom sledi (angl. summation width), nad katerimi se izvajajo algoritmi. Trdimo lahko, da je, kadar so na radargramu formirane čiste refleksijske hiperbole, podajanje velikega števila sledi, s katerimi se sicer poveča čas izvajanja algoritma, smiselno. Algoritem lahko omejimo na izbran časovni interval (angl. time range).



Slika 100: Kirchhoffova 2D-hitrostna migracija v časovni domeni radargrama 5. profila 900 MHz antene s hitrostnim poljem, pridobljenim po metodi določevanja hitrosti po plasteh: a) Pred migracijo; b) Po migraciji.

Figure 100: Kirchhoff 2D velocity migration in the time domain with velocity field calculated on the basis of layer velocity method of 5th profile using 900 MHz antenna: a) before migration; b) after migration.

4.21 Interpretacija – ocenjevanje premera cevi

Določanje dimenzij objektov ni bil primarni cilj te doktorske disertacije. Zato smo v model vključili dve preprosti in hitri metodi ocene zunanje dimenzije cilindričnega objekta. Kot je razvidno iz razdelka 2.8.10, igra zunanji polmer cilindričnih ciljnih objektov ključno vlogo pri geometrijski obliki hiperbole. Metodo smo posplošili in temelji na predpostavki, da sta os profila in os cilindričnega objekta majhnega naklona v fazi meritve pravokotna. Čeprav je večina cilindričnih objektov v naravi dolga in linearna in pogoj ni izpolnjen, posplošitev temelji na dejstvu, da ob tipičnih georadarskih meritvah orientacija ciljnjega objekta v prvi fazi nastopa kot neznanca.

Velik vpliv na natančnost določanja premera cilindričnih objektov imata količina šuma in hitrost širjenja EMV v mediju. Količina šuma na radargramih lahko popolnoma prekrije oziroma toliko zamegli refleksijske hiperbole, da so neuporabne. V omenjenih primerih smo poskušali uporabiti metodo hitrosti širjenja EMV v cevi, ob predpostavki vidnih zakasnitev refleksij na radargramu. Očitno je, da je šum pomemben tudi v fazi klasifikacije, npr. določevanja temena in oblike hiperbol. Pogosto se zgodi, da je premer zaradi šuma ter lastnosti vgrajene GI nedoločljiv po obeh metodah. Ne glede na uporabljeno metodo je njena uspešnost precej odvisna od velikosti ciljnih objektov. Načelno je v testnih bazenih vgrajena GI z manjšimi premeri.

Težavo pri določevanju premera predstavlja tudi napaka pri določevanju osrednje hitrosti v mediju oziroma plasteh, v katerem je cilindrični objekt, ki običajno nastopa kot neznanka oziroma lahko ocenimo njen približek po različnih metodah določevanja hitrosti (glej razdelek 4.18). Napaka v oceni hitrosti širjenja EMV predstavlja sistematični pogrešek in ima vpliv na končno kakovost določitve premera. Pri ciljnih objektih premerov do 5 cm se oblika refleksijskih hiperbol bistveno ne spreminja glede na ničelno referenčno refleksijo ($R \approx 0_+$). Posledično vsi ciljni objekti manjših premerov od 5 cm producirajo refleksijske hiperbole enakih velikosti in oblik. Vgrajenemu koaksialnemu kablju z zaporedno številko 18, kabelski kanalizaciji z zaporednima številčkama 15 in 16, električnim vodom z zaporednima številčkama 11 in 12, plinovodni cevi z zaporedno številko 3 in vodovodni cevi z zaporedno številko 6 (glej razdelek 3.5) zaradi manjših dimenzij nismo določevali premera. Ciljne objekte najmanjših premerov pa lahko uporabimo za določevanje ničelnih referenčnih hiperbol (angl. zero fitting hyperbola). Ničelna referenčna hiperbola pomeni hiperbolo točkovnega ali cilindričnega objekta s polmerom blizu nič ter 90° kotom med osjo profila, ki jo predstavlja trajektorija georadarske meritve, in osjo cilindričnega objekta.

Premerov nismo določevali niti cevem, ki ležijo druga poleg druge, npr. vodovodne cevi zaporedne številke 5 in 7 (glej sliko 62), ali v primeru konstrukcijskih lastnosti dvojnih cevi, spojenih z vmesnim elementom, npr. cev kabelske kanalizacije zaporedne številke 14. Pri vodovodnih ceveh zaporedne številke 9 in 10 je premer manjši od horizontalne ločljivosti 400 MHz antene, ki v danih pogojih sploh omogoča globinski doseg cevi. Na radargramih se pojavijo kot refleksijski vzorci.

Ocenjena hitrost v nosilnih tleh testnih bazenov 0,08 m/ns je bila določena na podlagi poznane globine enega od ciljnih objektov (glej razdelek 4.18). Na podlagi posamičnih ocenjenih premerov po metodi ujemanja referenčne hiperbole in prilagajanja polmera ciljnega objekta smo izračunali centralne tendence (ocenjen DN/OD), absolutne in relativne napake izbrani GI, ki so prikazane v preglednici 25. Cenilka točnosti RMSE znaša 18,4 mm, centralna tendenca relativne napake 17,2 %.

Preglednica 25: Absolutna in relativna odstopanja premerov po metodi ujemanja referenčne hiperbole in prilagajanja polmerov ciljnega objekta.

Table 25: Absolute and relative radius deviations by using the method of reference hyperbola matching by velocity and by adjusting target object radius.

Tip infrastrukture	Zap. št.	Dejanski DN/OD [mm]	Ocenjen DN/OD [mm]	$ \Delta R $ [mm]	$ \Delta R_{rel} $ [%]
Kanalizacijska cev	10	125	141	-16	12,8
Plinovodna cev	1	100	115	-15	15,0
Plinovodna cev	2	63	51	12	19,0
Vodovodna cev	4	90	78	12	13,3
Cev kabelske kanal.	13	125	147	-22	17,6
Cev kabelske kanal.	17	110	138	-28	25,5

Natančnost določanja premera infrastrukturnih objektov je odvisna od njihovega dejanskega premera, globine, tudi od materiala in medija, v katerem so. Oblika in kontrastnost radarskih odbojev sta odvisni od razlik v relativni dielektričnosti, homogenosti in izotropnosti medija.

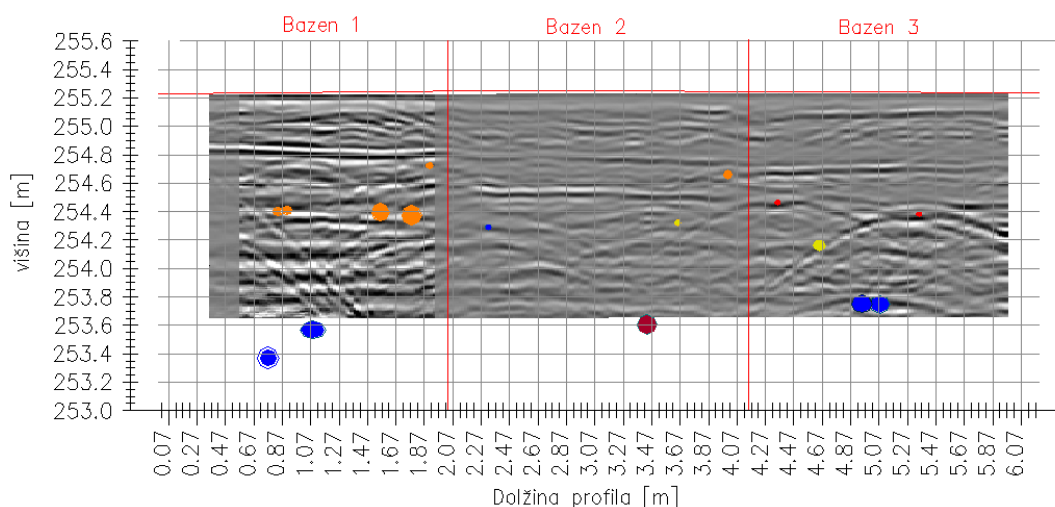
4.22 Izbiranje in interpretacija ciljnih objektov

Posamezne refleksije, za katere sklepamo, da pomenijo ciljne objekte ali meje med plastmi voziščne konstrukcije, lahko posebej označimo. Izbrano mesto na profilu je točno določen vzorec na točno določeni sledi, ki smo ji določili položaj v prostoru (glej razdelek 4.4).

Hitro metodo označevanja refleksij predstavlja avtomatsko izbiranje objektov (angl. auto picks), kjer nam je na voljo izbiranje posameznih objektov (angl. single object) ali linijskih refleksij (angl. continuous reflector). Za avtomatsko določevanje posameznih objektov na radargramu moramo določiti pogoje: polariteto, časovni in prostorski interval, prag amplitude in kontrast amplitude.

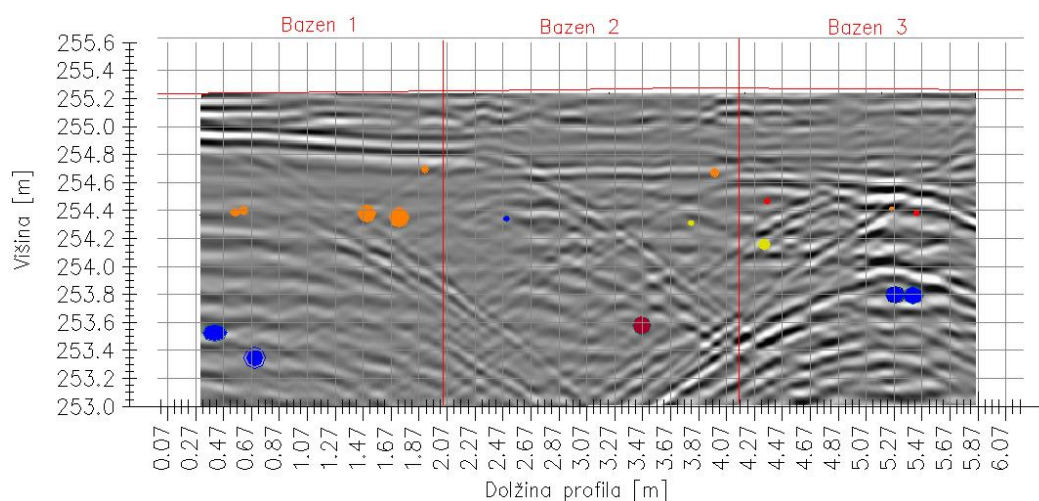
Določitev in izbira odboja sta predvsem subjektivne in intuitivne narave, še posebej pri zelo šibkih in neizraženih odbojih. Avtomatsko izbiranje se je v našem primeru izkazalo za nedosledno in omejeno (glej razdelek 2.8.10). Zaradi navedenega smo za potrebe te doktorske disertacije uporabili ročno izbiranje, kjer smo neprekinjeno izbiranje (angl. continuous pick) zaradi ohranjanja polaritete, praga in kontrasta amplitude uporabljali pri določevanju lateralnih refleksij, ki so predstavljale meje med plastmi voziščnih konstrukcij v bazenih. Točkovno izbiranje (angl. manual pick) pa smo uporabili v smislu določevanja temen ciljnih objektov. V obeh primerih smo uporabili funkcijo določevanja ekstremnih vrednosti pozitivne ali negativne amplitude na območju določevanja refleksij. Ekstremna vrednost pomeni teme hiperbole oziroma trenutka, ko je bila georadarska antena točno nad osjo cevi. V modelu smo predlagali prvotno izbiranje na nemigriranem radargramu, od koder smo prenesli izbire na migriran radargram. Koordinate položaja in globine ciljnih refleksij objektov posameznega radargrama smo izvozili v obliki ASCII-datoteke za medopravnost z drugimi programi, ki so integralni del geografskih informacijskih sistemov. Ker nam ponujene možnosti prikazov izbranih rezultatov niso zadostovale, smo datoteko izvozili in uporabili dodatno programsko orodje (glej razdelek 4.1), v katerem smo rezultate vizualizirali v 3D-prostoru.

Slika 101 in 102 prikazujeta profila 900 MHz in 400 MHz antene v bazenu, kjer so nam v pomoč izdelani geodetski prečni in vzdolžni profili vgrajene GI.



Slika 101: Prikaz prečnega profila 5 in pripadajočega obdelanega radargrama 900 MHz antene, kjer so vidne refleksijske hiperbole posameznih ciljnih objektov.

Figure 101: Longitudinal profile 5 presentation and related radargram using 900 MHz antenna, where reflections of individual target objects are presented.

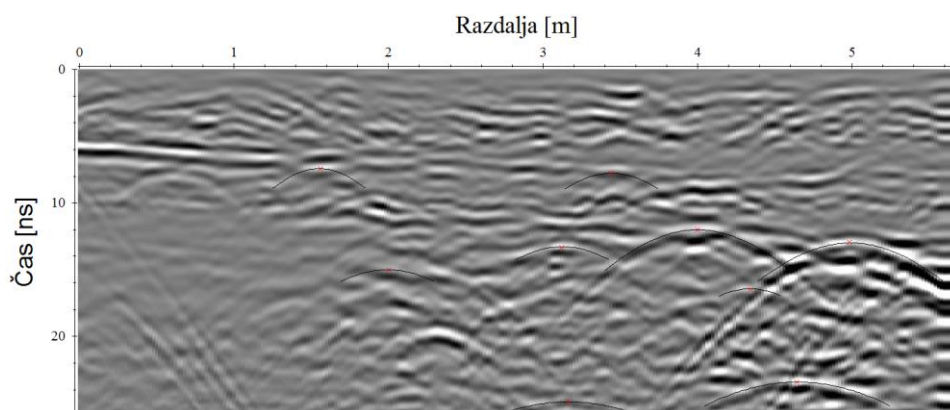


Slika 102: Prikaz prečnega profila 8 in pripadajočega obdelanega radargrama 400 MHz antene, kjer so vidne refleksijske hiperbole posameznih ciljnih objektov.

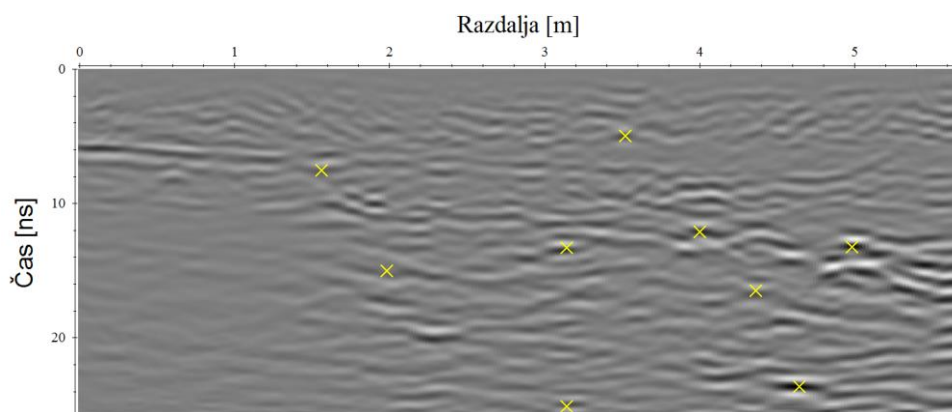
Figure 102: Longitudinal profile 8 presentation and related radargram using 400 MHz antenna, where reflections of individual target objects are presented.

Z barvami so prikazane različne vrste vgrajene GI (rumena – plin, rjava – kanalizacija, oranžna – elektronske komunikacije, modra – vodovod, rdeča – elektrika). Zaradi nazornejšega prikaza ujemanj refleksijskih hiperbol ciljnih objektov v prostoru smo uporabili nemigriran radargram, kjer smo opravili inicialno izbiranje objektov. Profil je v prvem bazenu zaradi slabe prepoznavnosti treh kabelskih kanalizacij elektronskih komunikacij ojačen s funkcijo ACG gain, na intervalu sledi 15. do 80.

Slika 103 prikazuje ročno izbiranje točkovnih refleksij na obdelanem nemigriranem in migriranem 5. vzdolžnem profilu 900 MHz antene, kjer so nedvoumno vidne refleksije cilindričnih ciljnih objektov. Nemigrirani profili služijo kot inicialna osnova ročnemu izbiranju zaradi izrazito vidnih refleksijskih hiperbol, ki jih v nadaljevanju prenesemo na migriran profil. Razlog je skrčenje refleksijskih hiperbol v njihove vrhove po migraciji in s tem oteženo izbiranje.



a)

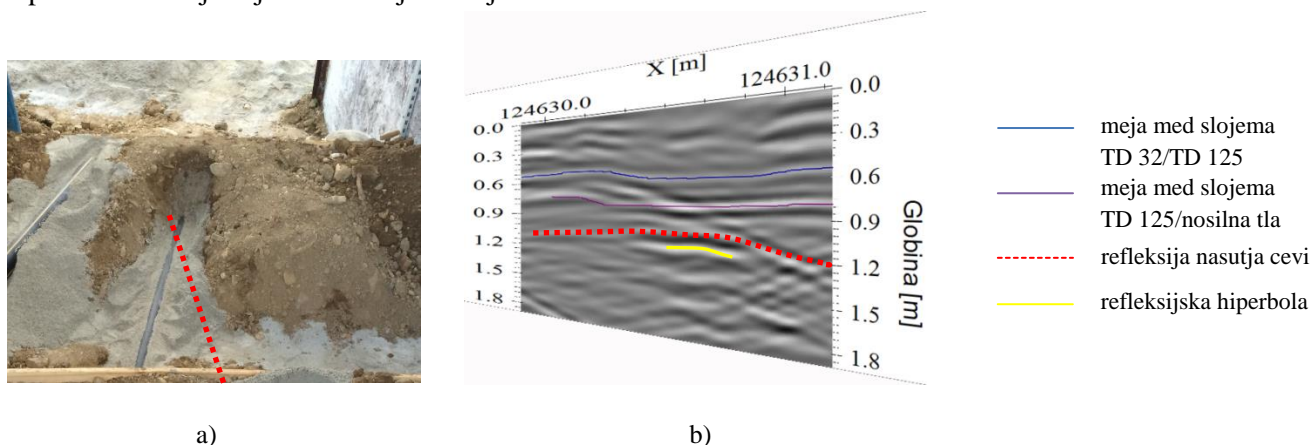


b)

Slika 103: Ročno izbiranje ciljnih objektov na 5. vzdolžnem profilu 900 MHz antene: a) Izbiranje z ročnim prilagajanjem oblike hiperbol (rdeči križci in prilagojene hiperbole), ki nastopijo pri odbojih na obdelanem nemigriranem profilu; b) Prenos in poprava izbiranja (rumeni križci) na obdelanem migriranem profilu.

Figure 103: Manual selection of target objects on longitudinal profile 5 using 900 MHz antenna: a) Selection by hyperbola fitting (red crosses and hyperbola fitting), which occurs at reflections on processed non-migrated profile; b) Transmission and corrigendum of selection (yellow crosses) on processed migrated profile.

Slika 104 prikazuje vpliv kota med osjo profila, ki ga predstavlja georadarska trajektorija, in osjo cilindričnega objekta, kar ima za posledico skoraj nevidno hiperbolo, ki jo v praksi pogosto spregledamo. Ob predpostavki profila, posnetega točno nad osjo cilindričnega objekta (cevi) in vzdolž nje, se ta reflektira kot linijski objekt. Pogosto se peščene posteljice in nasutja cevi v obliki drobljenca majhnih granulacij (glej razdelek 3.5) nad in pod cilindričnim objektom reflektirajo kot linije. Nad cilindričnim objektom zaporedne številke 4 (transportna vodovodna cev TOTRA PE80 PN 12,5) je lepo vidna skoraj linijska refleksija nasutja debeline 15 cm.



a)

b)

Slika 104: Določevanje točkovne refleksije ciljnega objekta (zap. št. 4) na izseku radargrama 6. bazenskega vzdolžnega profila 400 MHz antene: a) Prikaz ostrega kota med profilom in cevjo (rdeča prekinjena črta) na globini vgrajene infrastrukture; b) Izsek profila z označenim neprekinjenim izbiranjem mej med plastmi voziščne konstrukcije.

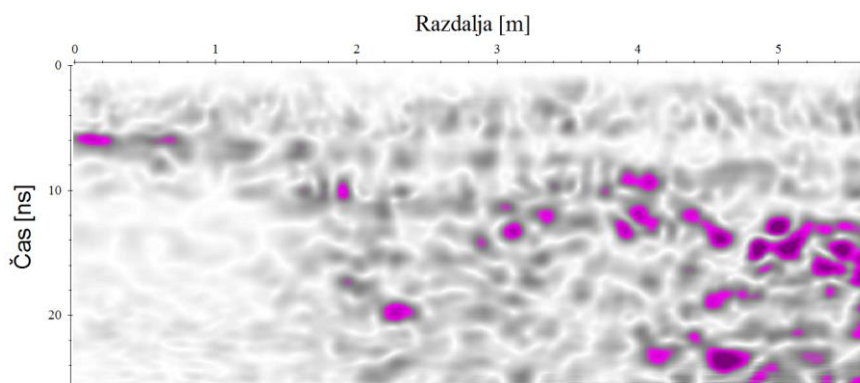
Figure 104: Determination of point reflection of target object (no. 4) on pool longitudinal profile section 6 using 400 MHz antenna: a) Presentation of sharp angle between the profile and the pipe (red broken line) in the depth of installed infrastructure; b) Profile section is marked with solid line of borders between layers of pavement structure.

Pogosto uporabljen način izračuna ovojnice radargramskih signalov je Hilbertova transformacija (angl. Hilbert transformation). Ovojnica signala oziroma njegova amplitudna informacija je merilo jakosti refleksije na radargramih. Zvezo med amplitudo in fazo signala, kar omogoča rekonstrukcijo faze signala z njegovo amplitudo, predstavlja Hilbertova transformacija. Uvedel jo je Gabor leta 1946 (Rosenblum et al., 2001) in daje vrednost faze in amplitude za signal s konstrukcijo analitičnega signala, ki je kompleksna funkcija časa, definirana kot:

$$i_a(t) = i(t) + j \cdot H[i(t)] \quad (101)$$

kjer je $H[i(t)]$ Hilbertova transformacija signala $i(t)$, j imaginarna enota in $i_a(t)$ analitični signal, ki se ujema z realnim signalom (Šprager, 2013).

Izračun ovojnice temelji na zamiku faze $-\pi/2$ za pozitivne in $\pi/2$ za negativne frekvence in izvedbi inverzne Fourierjeve transformacije. Radargrami oziroma signali po izvedbi transformacije nimajo negativnih vrednosti in so s tem boljše podlaga za vizualizacijo refleksij, prikaz slabše opaznih dielektričnih lastnosti, razporeditve energije na sledih ter določanje prvih refleksij signala, kot to prikazuje slika 105. Barve predstavljajo povečevanje jakosti amplitude, kjer temno vijolična ponazarja najmočnejše in bela barva najšibkejše amplitude.

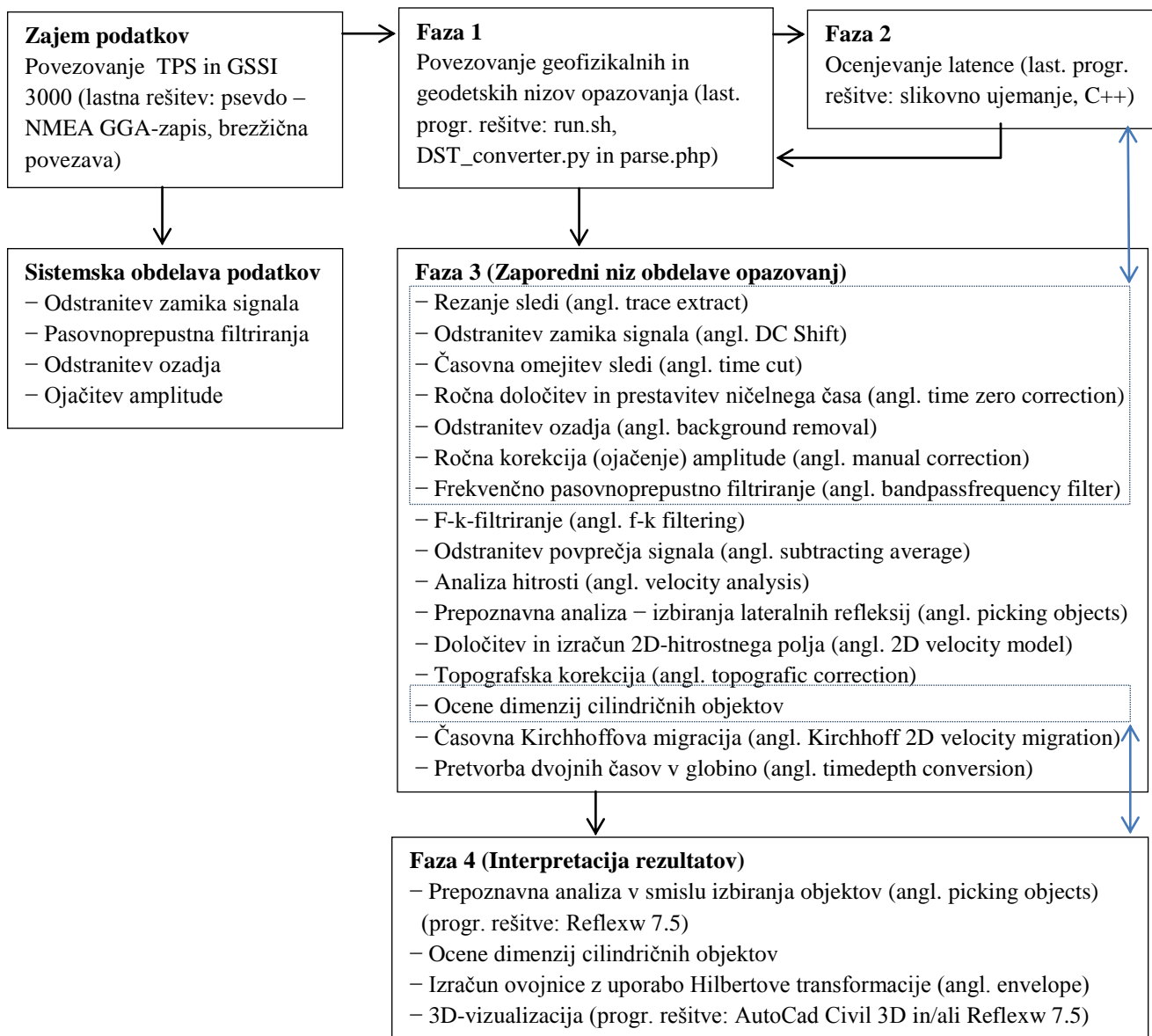


Slika 105: Izračunana ovojnica signalov na radargramu georadarskega 5. vzdolžnega profila 900 MHz antene. Vidni so izrazitejši odboji, ki lahko predstavljajo potencialno refleksijo ciljnih objektov.

Figure 105: Calculated envelope of signals on the longitudinal profile 6 using 900 MHz antenna. More intense reflections can be observed on the basis of which the potential reflection of target object can be recognized.

5 PREDLAGANI MODEL GEORADARSKIH OPAZOVANJ ZA EVIDENTIRANJE GI

Celoten postopek predlaganega modela kot izhodiščnega primera obdelave in shematični prikaz zaporedja postopkov obdelave oziroma posameznih procesov prikazuje slika 106. Na končno kakovost modela poleg izbranih procesov in iskanih ciljnih objektov vpliva presoja, s katerimi procesi in parametri bomo določili model obdelave (Shahbaz-Khan, 2011). Yilmaz (1987) ugotavlja, da je uspešnost obdelave odvisna od ustrezne izbire in zaporedja postopkov, izbire pravih parametrov in ovrednotenja rezultatov in težav ob izbiri posameznega postopka. Vsako delovišče ima svoje posebnosti in učinke, ki jih mora izkušen operater prepoznati in upoštevati v modelu tako, da ga dograjuje in izpopolnjuje.



Legenda: TPS – elektronski tahimeter Leica TCRP 1201+, GSSI 3000 – nadgrajen georadarski sestav, pseudo-NMEA GGA sporočilo – zapis podatkov, Reflexw 7.5 – programsko orodje za obdelavo radargramov, AutoCad Civil 3D – programsko orodje za 3D-vizualiziranje

Slika 106: Shematični prikaz predlaganega modela georadarskih opazovanj za evidentiranje GI.

Figure 106: Schematic presentation of proposed model of GPR observation for recording underground utility facilities.

Predlagani model sestavlja: zajem podatkov, povezovanje geofizikalnih in geodetskih nizov opazovanj – faza 1, ocenjevanje latence – faza 2, zaporedni niz obdelave – faza 3, in interpretacijo rezultatov – faza 4. V predlaganem modelu je implementiran niz lastnih programskih rešitev v fazi 1 in 2. V fazi 3 in 4 sta predlagani programski rešitvi Reflexw 7.5 in AutoCad Civil 3D. Celoten model obdelave profilov (tretja faza) je zasnovan po priporočilih avtorjev: Annan (2003), Jol (2009) in Conyers (2013).

Sistemska obdelava (glej razdelek 4.8) je mogoča že na delovišču in služi zgolj za boljšo interpretacijo sprotnih rezultatov in nastavitev celotnega sestava v danih pogojih. Predlagani model ne predvideva sistemsko predobdelanih radargramov kot vhodnih podatkov. Vsaka geofizikalna obdelava je podvržena predobdelavi, urejanju ter sortiranju profilov. Predobdelava je odvisna predvsem od narave dela in posameznega operaterja, zato je v modelu nismo podrobno opisovali. V del predobdelave sodita rezanje profilov in časovna omejitve, ki jih navajamo v fazi 3. Prav tako interpretacijske metode, kot so slikovne in prepoznavne analize ter modeliranje rezultatov, načelno niso del obdelave podatkov (Jol, 2009), jih pa v modelu zaradi njihove pomembnosti navajamo kot poseben sklop.

Faza 1: Predlagani model v prvi fazi predvideva avtomatsko povezovanje geofizikalnih in geodetskih nizov opazovanj (glej razdelek 4.3) po časovni komponenti, kjer je celoten postopek podprt z razvojem in uporabo niza lastnih programskih rešitev, napisanih v skriptnih jezikih. Programska rešitev Run.sh služi kot vmesno orodje za poganjanje, programa DST_converter.py in parse.php z ustreznimi parametri. DST_converter.py podatke o sledih in časih posameznega profila zapiše v binarno datoteko, ki služi kot vhodna datoteka programu Parse.php. Ta v prvem koraku linearno interpolira čas med sledmi brez podatka o času in v nadaljevanju časovno poveže geofizikalna in geodetska opazovanja v skupno datoteko. Datoteka služi kot vhodni podatek programskemu paketu za obdelavo radargramov ReflexW 7.5, kjer se praznim sledem spet z linearno interpolacijo določijo položaji in višine. Pri obdelavi je celoten postopek avtomatskega povezovanja stekel gladko, mogoče je treba omeniti časovno potratnost predlagane rešitve (glej razdelek 4.1), kjer zagotovo obstaja prostor za izboljšanje in optimizacijo.

Faza 2: V drugi fazi model predvideva oceno latence uporabljenega geodetskega in geofizikalnega sestava (glej razdelek 4.5), ki nadgrajuje prvo fazo. Ob robnih pogojih, kjer nastajajo neizrazite refleksije, je profile pred postopkom ocene latence smiselno osnovno obdelati, kot prikazuje proces na sliki 106 (moder okvir). Za oceno sta uporabljeni subjektivna metoda in matematično-statistična metoda ujemanja po površini (glej razdelek 4.5). Za mero slikovne poravnave in ujemanja parov radargramov (r_t , r_n) smo uporabili različne kriterije. Najmanj razpršene rezultate pridobimo z metodo ujemanja po površini, temeljeno na kvadratu povprečne napake. Ta metoda je ključna pri zagotavljanju relevantnih podatkov o položaju in višini ciljnih objektov. Rezultati druge faze so uporabljeni kot vhodni podatek ob vnovičnem povezovanju popravljenih geofizikalnih opazovanj za vrednost latence in geodetskih opazovanj.

Faza 3: Tretjo fazo sestavlja zaporedje postopkov obdelave geofizikalnih podatkov oziroma radargramov georadarskih profilov. Pri rezanju oziroma odstranjevanju sledi določimo začetni in končni položaj profila, s čimer mu odredimo tudi dolžino (glej razdelek 4.9). Profile je smiselno rezati tako, da predstavljajo zaključeno celoto raziskovanega območja. Programska oprema pri nadaljnji 3D-obdelavi načelno zahteva enako število sledi znotraj niza enako dolgih profilov, kar pa ni pogoj pri obdelavi podatkov s predlaganim modelom. Poenotenje sledi je smiselno v primerih enotne določitve hitrostnega polja celotnemu nizu profilov pri metodah hitrostnih analiz. Programska oprema pri

pretvorbi dvojnih časov v globino in časovni Kirchhoffovi migraciji je pri 2D-hitrostnem polju odvisna od števila sledi obdelanega profila. Pravilnejši in natančnejši način je uporaba 2D-hitrostnega polja za posamezni profil, in sicer zaradi pogostega spreminjanja debeline plasti voziščne konstrukcije vzdolž osi. Predlagani model predvideva uporabo 2D-hitrostne porazdelitve posameznega profila.

Ocena hitrosti širjenja EMV v mediju temelji na posploševanju in ocenjevanju lastnosti medija, posledično je to ena od zahtevnejših nalog (glej razdelek 4.18). Pretvorbo časa v globino s hitrostnim poljem, pridobljenim po metodi določevanja hitrosti po slojih, smo v modelu predvideli kot podlago določevanja globin ciljnih objektov. Razpon globinske osi je odvisen od iskane globine ciljnega objekta in globinskega dosega uporabljene antene (glej razdelek 2.5.3). V model je vključena Kirchhoffova migracija (glej razdelek 2.8.7), po kateri predlagamo vnovično ojačenje signala ene od funkcij ojačenja.

V modelu se predhodno predvideva postopek časovne omejitve sledi, ki je odvisna od ocene hitrosti širjenja EMV v mediju. Ob nepoznavanju približka ocenjene hitrosti oziroma zelene globine penetracije je nesmiselno časovno omejevati profile oziroma jih omejevati brez tveganj o izgubi pomembnih informacij. Sledi premik signala na nivo osrednje ničle s podajanjem časovnega intervala, pri katerem je uporabljena metoda premika (glej razdelek 4.10). Vhodni parametri začetnega in končnega dvojnega časa, iz katerih se izračuna povprečje zamika, so odvisni od centralne frekvence antene in jih izberemo na območjih, kjer je dejansko malo ali nič odbojev, ki bi vplivali na vrednost zamika. V model je vgrajen tudi popravek ničelnega časa (glej razdelek 4.11) z uporabo ročne metode določitve in zamikom začetnega časa. Testiranja so pokazala smiselnost uporabe ročne določitve zaradi mogoče prisotnosti neposrednih in zračnih valov (glej razdelek 2.6), ki lahko zavedejo avtomatski postopek in posredno precej vplivajo na določitev globine ciljnih objektov. Časovni intervali predstavitev so v tesni korelaciji z uporabljeno centralno frekvenco antene. Odstranitev ozadja je široko uporabljena metoda odstranjevanja šuma in je nepogrešljiva pri vsakem modelu obdelave podatkov (Jol, 2009). Model predvideva odstranitev ozadja vzdolž celotnih profilov (glej razdelek 4.15). V model smo po temeljitem preizkusu treh ojačitvenih funkcij signala uvrstili ročno ojačitev amplitude (glej razdelek 4.13). Ročna ojačitev nam omogoča poljubno ojačitev vzdolž profila s poudarkom na ciljnih objektih, a za korektno izvedbo zahteva večje število iteracij in poznavanje krivulje upadanja jakosti signala, ki se izračuna za vsako posamezno centralno frekvenco antene. Po potrebi se uporablja funkcija AGC ali upadanje energije. Za izostritev in glajenje šuma sneženja v modelu po preizkusu dveh prepustnospasovnih fitrov (glej razdelek 4.15) predlagamo frekvenčni pasovnoprepustni filter koničastega kosinusnega okna. Deluje v frekvenčni domeni, kar ga avtomatsko uvršča med frekvenčno odvisne postopke. Pri vsaki centralni frekvenci se poda štiri frekvenčne parametre (glej razdelek 4.15), uporabljen je 1,6-kratnik centralne frekvence. V model je vključen tudi postopek odstranitve povprečja signala, s katerim je treba ravnati izjemno previdno (glej razdelek 4.14). Podajanje dolžine okna je odvisno od zelene stopnje glajenja in centralne frekvence antene. Uporaben je pri glajenju vpliva horizontalnih reflektorjev.

Za odstranjevanje linearnih refleksij z nagibom v modelu uporabimo f-k-filter, kjer je pomembna opredelitev parametrov hitrostnega intervala pahljačaste oblike, s katerimi želimo doseči zastavljeni cilj (glej razdelek 4.16). Parametri se od profila do profila razlikujejo, zato je nemogoče določiti parametre, ki bi bili uporabni na nizu profilov. Ker je vsem profilom določena tudi višinska komponenta, je v model vključena topografska korekcija (glej razdelek 4.19). Pomen in rezultati sicer nimajo značajnega vpliva na bazenske podatke. Ob predpostavki podatkov z majhnimi nakloni (do 3 %) daje topografska korekcija zadovoljive rezultate. Smiselnost spreminjanja modela in vključevanja topografske migracije vidimo pri naklonih, ki so večji od 3 %.

Faza 4: Osnovo prepoznavne analize v modelu podajamo z ročnim izbiranjem linijskih in točkovnih ciljnih objektov (glej razdelek 4.22). Priporoča se pregled izračunanih ovojníc s Hilbertovo transformacijo, ki nam pogosto daje boljše rezultate vizualiziranja. Smiselno je prikazati rezultate s časovnimi rezi oziroma 3D-moduli v treh pravokotnih ravninah x, y ali z kot samostojnimi rastrí (glej razdelek 2.9) in interaktivnim prikazom v videozapisu. 3D-vizualizacija podatkov omogoča lažje prikazovanje prostorskih odnosov med izbranimi ciljnimi objekti.

V modelu nastopajo odvisni in neodvisni procesi od centralne frekvence uporabljene antene. Uporabljeni postopki, neodvisni od centralne frekvence antene, v modelu so:

- povezovanje geodetskih in geofizikalnih nizov opazovanj,
- linearna interpolacija položaja in višine praznih sledi,
- ocena latence,
- vnovično povezovanje geodetskih in geofizikalnih nizov opazovanj (upoštevanje vrednosti latence),
- rezanje sledi, določen začetni in končni položaj oziroma enotna dolžina:
 - 5,80 m: vzdolžni profili
 - 2,20 m: prečni profili
- časovna omejitev sledi: 55 ns,
- topografska korekcija,
- odstranitev ozadja, izbrana srednja vrednost za celotno linijo,
- interpretacija rezultatov obdelave: prepoznavna analiza v smislu izbiranja objektov in 3D-modeliranje.

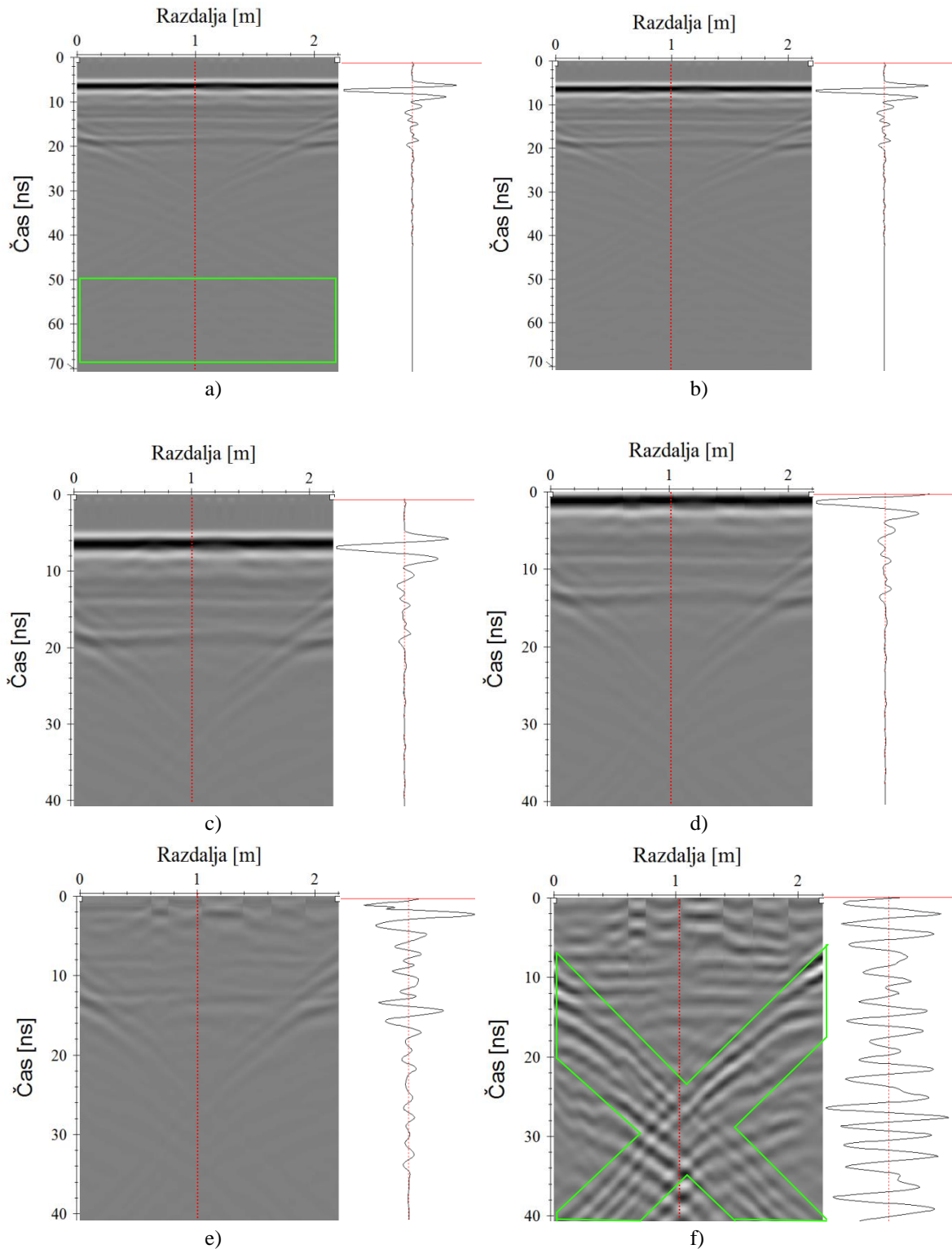
V modelu uporabljeni postopki in parametri, odvisni od centralne frekvence antene, so prikazani v preglednici 26:

Preglednica 26: V modelu uporabljeni postopki in parametri, odvisni od centralne frekvence antene.

Table 26: The procedures and the parameters used in proposed model of GPR depend by the center frequency of antennas.

Uporabljeni postopki	Vhodni parametri	
	900 [MHz]	400 [MHz]
Odstranitev zamika signala – interval [ns]	20–25	50–70
Ročna določitev in prestavitev ničelnega časa [ns]	3,90	5,73
Ročna korekcija (ojačenje) amplitude – faktor ojačitve [dB]	0–36	0–33
Frekvenčno pasovnoprepustno filtriranje koničastega kosinusnega okna – širina območja [MHz]	420/630/1370/1700	230/320/580/750
Odstranitev povprečja signala, okno [št. sledi]	65	50
Analiza hitrosti z označevanjem refleksij meja med plastmi voziščnih konstrukcij za vsak posamezni profil	/	/
Določitev in izračun 2D-hitrostnega polja vzdolžnih in prečnih profilov – interval [m/ns]	0,08–0,132	0,08–0,132
Časovna Kirchhoffova migracija na podlagi 2D-hitrostnega polja– širina seštevanja, interval [št. sledi]	20	30
Pretvorba dvojnih časov v globino na podlagi 2D-hitrostnega polja, globinska os [m]	1,6	2,1

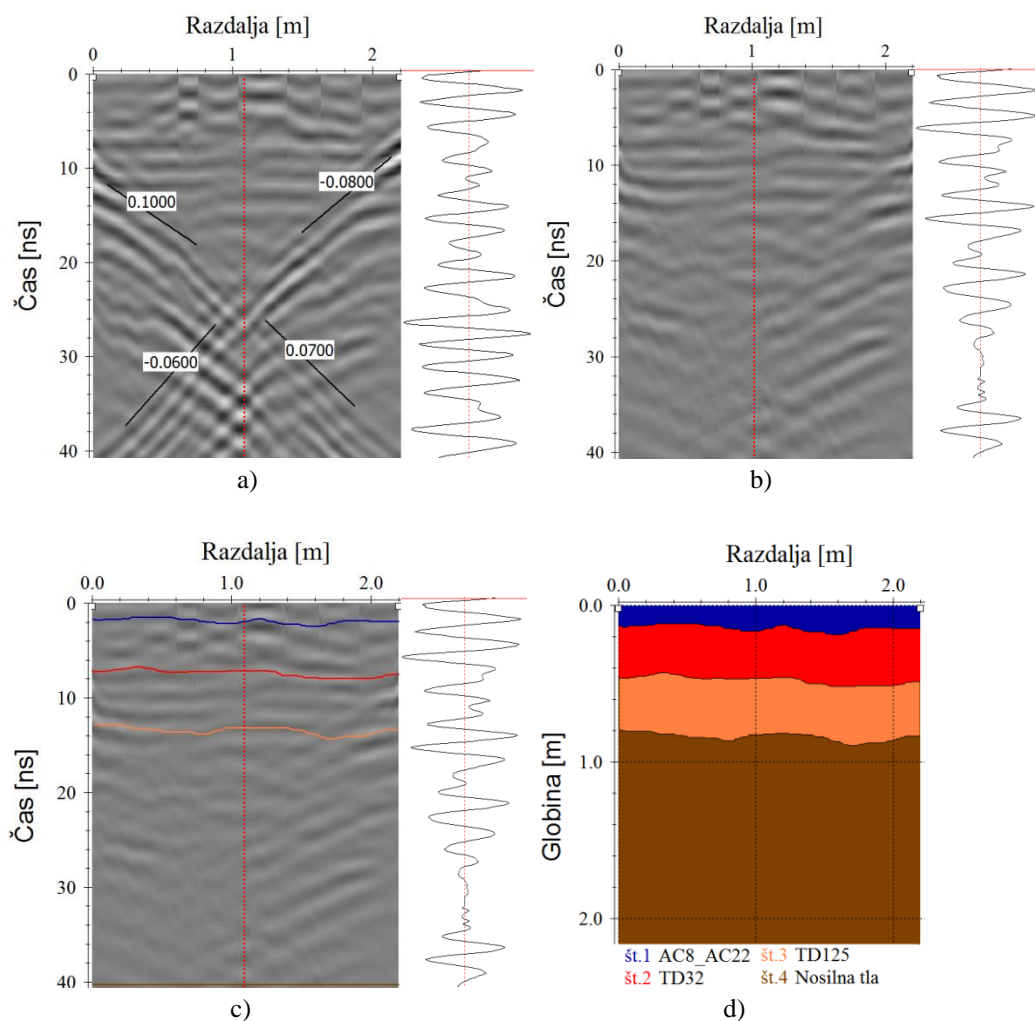
Na slikah 107–109 je opisana in slikovno predstavljena tretja faza in del četrte faze v smislu izbiranja ciljnih objektov predlaganega modela. Obdelan je radargram 47. prečnega profila 400 MHz antene in prikaz vpliva obdelave v bazenu 3. Ob vsaki sliki so predstavljene spremembe amplitude 156. sledi (označena z rdečo linijo) skozi proces obdelave.

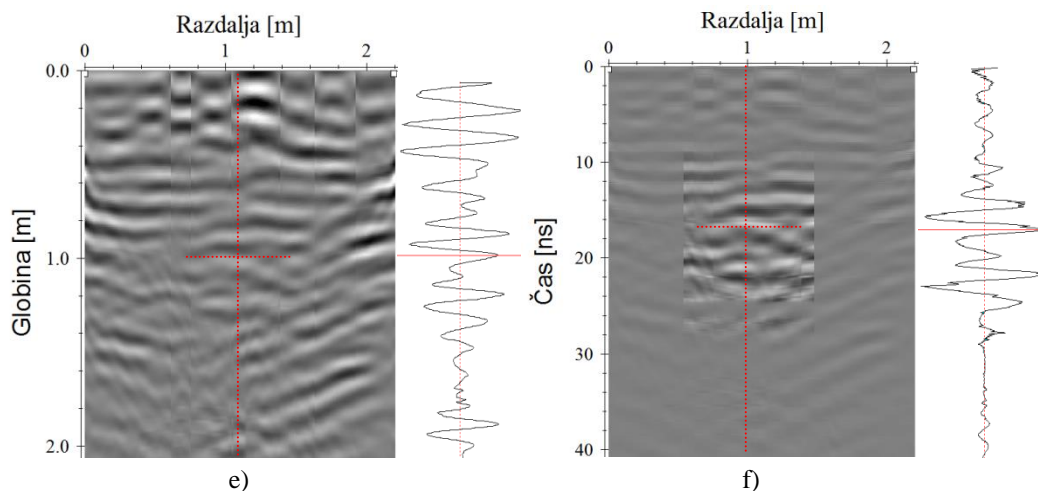


Slika 107: Obdelava radargrama 47. bazenskega prečnega profila 400 MHz antene s predlaganim modelom in njegov prikaz vpliva na amplitudo 156. sledi (označena z rdečo linijo). V nadaljevanju so predstavljene spremembe omenjene izbrane amplitude skozi proces obdelave: a) Surova oblika

georadarskih meritev; b) Odstranitev zamika signala na radargramu s časovnim intervalom izračuna povprečja 50–70 ns (zeleni okvir na sliki a)); c) Časovno omejene sledi radargrama na 41 ns; d) Ročna določitev ničelnega časa pri prvem pozitivnem vrhu signala z ročnim postopkom prestavitve ničelnega časa (5,73 ns) (vidne refleksije posameznih plasti voziščne konstrukcije); e) Prostorski filter odstranitve ozadja; f) Frekvenčni pasovnoprepustni filter koničastega kosinusnega okna (250/320/570/640) in ročno ojačenje amplitude vzdolž profila na pričakovanih globinah točkovnih reflektorjev. Faktor ojačitev jakosti signala sledi v rangu 0–43 dB. Označene so linearne refleksije (zeleni okvir).

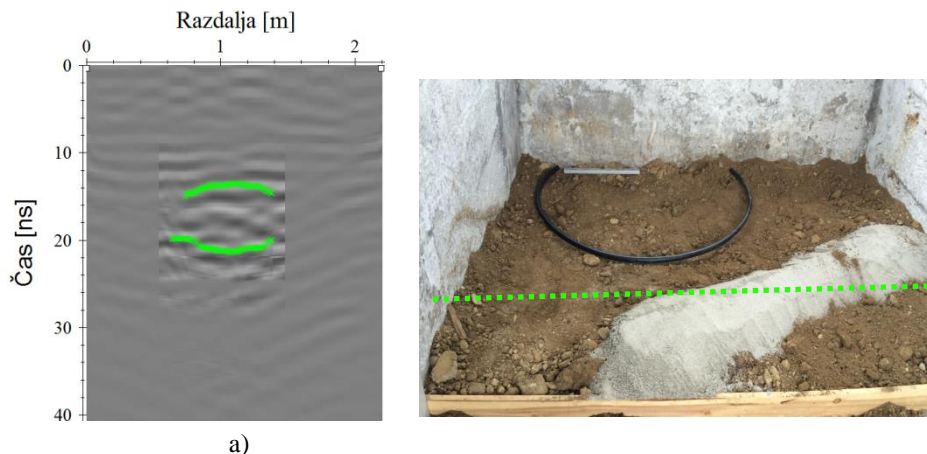
Figure 107: Processing the pool longitudinal profile 47 of 400MHz antenna with the proposed model and its influence on amplitude 156 trace (marked with red line). Further on, changes of the mentioned chosen amplitude through processing are presented: a) Rough GPR measurements; b) Removal of shift signal on radargram with the time interval of average calculation 50-70 s (green frame on a)); c) Time limited radargram traces to 41 ns; d) Manual determination of zero time at first positive peak of signal by manual setting of zero time (5.73 ns) (visible reflections of individual layers of pavement structure); e) Spatial filter of background removal; f) Frequency band-pass filter of tapered cosine window (250/320/570/640) and manual gain of amplitude along the profile at expected depths of point reflectors. Signal gain factor is presented in the range of 0-43 dB. Linear reflections are marked (green frame).

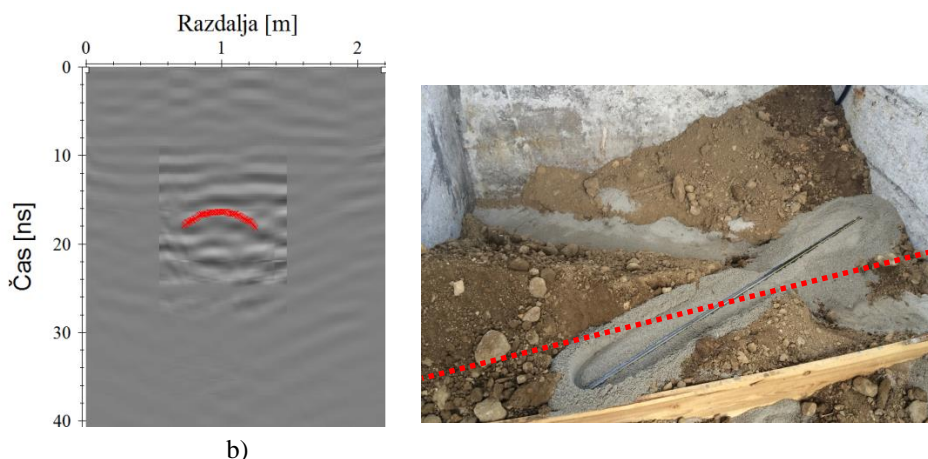




Slika 108: Nadaljnja obdelava radargrama 47. bazenskega prečnega profila 400 MHz antene s predlaganim modelom in njegov prikaz vpliva na amplitudo 156. sledi (označena z rdečo linijo): a) Radargram z označenim območjem f-k-filtriranja, pahljačaste oblike omejene z refleksijami od $+0,105$ do $+0,065$ za pozitivno in od $-0,055$ do $-0,085$ m/ns za negativno smer; b) f-k-filtriran radargram z zadušenimi stenskim linearnimi refleksijami; c) Analiza hitrosti z označenimi refleksijami mej med plastmi voziščne konstrukcije; d) 2D-hitrostno polje z obarvanimi hitrostmi v posameznih plasteh ($0,131$ m/ns – modra, $0,121$ m/ns – rdeča, $0,119$ m/ns – rjava, $0,084$ m/ns); e) Končni rezultat obdelave radargrama v globinski domeni: pretvorba časov v globino in topografska korekcija; f) Končni rezultat obdelave radargrama v časovni domeni. Kirchhoffova časovna migracija na podlagi 2D-prostorskega polja in prostorsko intervalno omejeno (85–230 sledi, 10–25 ns dvojnega časa) ročno ojačenje signala (faktor 0–25 dB) in topografska korekcija.

Figure 108: Further processing of 47 pool longitudinal profile of 400MHz antenna with proposed model and its influence on the amplitude 156 trace (marked as red line). a) Radargram with marked area of f-k filtering in the fan shape, limited by reflections from $+0,105$ to $+0,065$ for the positive and $-0,055$ to $-0,085$ m/ns for the negative directions; b) F-k filtered radargram with suppressed wall linear reflections; c) Analysis of velocity with marked reflections of borders between layers of pavement structure; d) Two-dimensional velocity field with coloured velocities in individual layers ($0,131$ m/ns – blue, $0,121$ m/ns – red, $0,119$ m/ns – brown, $0,084$ m/ns); e) Final result of radargram processing in the depth domain: Time-depth conversion and topographic correction; f) Final result of radargram processing in the time domain. Kirchhoff migration on the basis of two-dimensional spatial field and spatial interval limitation (85–230 traces, 10–25 ns) manual signal gain (factor 0–25 dB) and topographic correction.





Slika 109: Določevanje točkovne refleksije ciljnega objekta zaporedne številke 2 na radargramu 47. bazenskega prečnega profila 400 MHz antene: a) Označena refleksija drobljenca peščene posteljice (10 cm) in nasutja (15 cm); b) Označena refleksija točkovnega ciljnega objekta zaporedne številke 2 (glavna plinska cev DVGW DG8106BN0453 G, DN/OD 63).

Figure 109: Determination of point reflection of target object no. 2 on the 47 pool longitudinal profile using 400 MHz antenna: a) Marked reflection of gravel sub-base (10 cm) and rubble (15 cm); b) Marked reflection of the point target object no. 2 (main gas pipe DVGW DG8106BN0453 G, DN/OD 63).

5.1 Ocena točnosti položaja in višin, pridobljenih z modelom georadarskih opazovanj pri evidentiranju gospodarske infrastrukture

Pri interpretaciji rezultatov, pridobljenih s predlaganim modelom georadarskih opazovanj za evidentiranje GI, je pomembno poznavanje kakovosti modela, ki jo ocenimo na podlagi referenčnih meritev. V testnih bazenih je sicer primerjava radargramov, posnetih z obema antenama (400 MHz in 900 MHz), dala dober vpogled v podpovršje. Kot referenčne položaje in višine smo prevzeli rezultate meritev, opravljenih s polarno metodo detajlne izmere (glej razdelek 4.2.3), ki smo jih izvedli ob vgradnji GI. Cevi v prostoru so predstavljene z daljicami, ki jih omejujejo točke, določene s polarno metodo detajlne izmere. Za potrebe ocene točnosti predpostavimo, da najbližja temenska točka na cevi oziroma daljici predstavlja referenčno točko temenski točki, pridobljeni s predlaganim modelom georadarskih opazovanj. Pri vrednotenju rezultatov so bili v pomoč še grafični prikazi razpršenosti odstopanj in razporeditve točk glede na velikost položajnega in višinskega odstopanja, histogrami porazdelitve ter kvantilni grafi koordinatnih in višinskih odstopanj.

Velikost vzorca je 269 točk, kar pomeni, da smo s predlaganim modelom georadarskih opazovanj zaznali in evidentirali 269 temenskih točk vgrajenih cevi in vodov v testnih bazenih (glej sliko 114). 145 temenskih točk vgrajene GI je prepoznanih s 400 MHz anteno, medtem ko jih je 124 prepoznanih s 900 MHz anteno. Glede na globino penetracije so rezultati pričakovani (glej razdelek 2.5.3).

Velikost vzorca je zadovoljiva. V povprečju je evidentirana temenska točka vsakega 0,16 m glede na skupno dolžino 42,6 m vgrajene GI. Prav tako je razporeditev temenskih točk precej enakomerna in precej dobro pokrita glede na razporeditev infrastrukture v testnih bazenih. Mogoče je zaznati boljšo zastopanost cevi v manjših globinah, kar je za uporabljeno metodo logično. Za oceno točnosti ti rezultati verjetno niso najzanesljivejši, tudi zaradi možnega premikanja in posedanja tako objektov kot medija pri gradnji in po njej. Vseeno pa nam odstopanja vsaj deloma ponujajo vpogled v oceno

točnosti rezultatov, ki smo jih pridobili na podlagi georadarskih opazovanj in modela. Meritve smo izvajali pazljivo in uporabili preizkušeno in kalibrirano mersko opremo.

Robustno oceno točnosti uporabimo, če opazovanja niso normalno porazdeljena in/ali vsebujejo več grobih pogreškov (Hohle in Potuckova, 2011; Hohle in Hohle, 2009). V sklopu ocene točnosti smo izvedli teste normalnosti porazdelitve koordinatnih in višinskih odstopanj (glej razdelek 5.1.1).

Ocena točnosti položaja je bila izvedena s primerjavo položaja 269 (n) pripadajočih referenčnih točk. Odstopanja koordinat v D96/TM, dobljenih s predlaganim modelom georadarskih opazovanj, od referenčnih, ob predpostavki, da se odstopanja porazdeljujejo po normalni porazdelitvi, zapišemo kot:

$$\Delta E_i = E_i - E'_i \quad (102)$$

$$\Delta N_i = N_i - N'_i \quad (103)$$

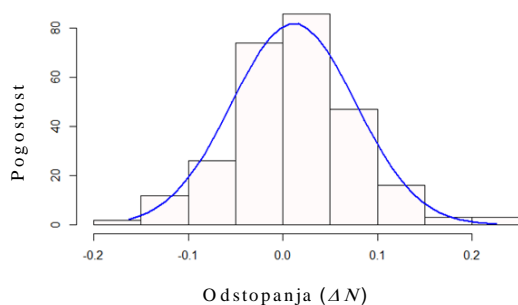
in položajna odstopanja:

$$\Delta P_i = \sqrt{\Delta E_i^2 + \Delta N_i^2} \quad (104)$$

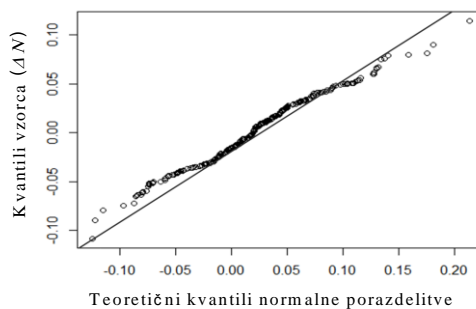
kjer sta E'_i in N'_i koordinati i -te točke, dobljene z modelom georadarskih opazovanj, E in N koordinati i -te referenčne točke, ΔE_i in ΔN_i koordinatni odstopanja i -te točke in ΔP_i položajno odstopanje i -te točke.

5.1.1 Test normalnosti porazdelitve

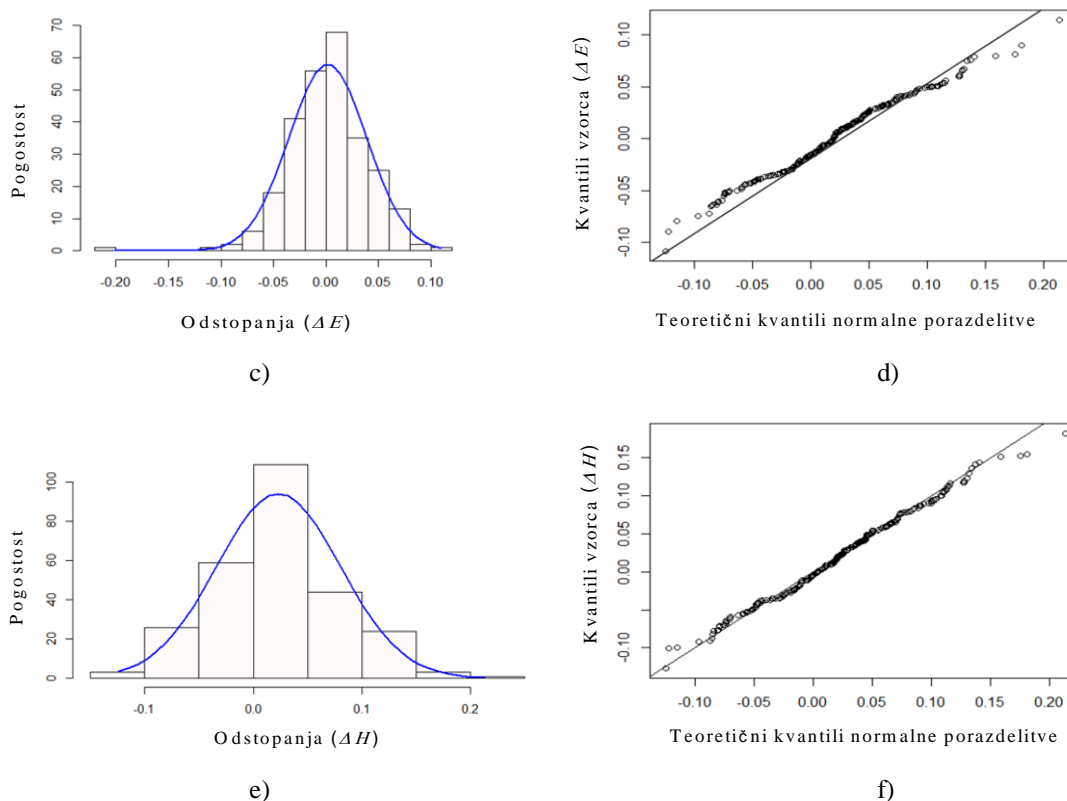
Porazdelitev opisuje območje, ki ga slučajna spremenljivka lahko zavzame, in verjetnost, da je vrednost spremenljivke v tem območju. Dejanske empirične porazdelitve iz naših vzorcev želimo opisati s pomočjo teoretičnih porazdelitev (npr. normalne porazdelitve), ki so osnova za nadaljnjo določitev parametrov porazdelitve. Preverjanje normalnosti porazdelitve koordinatnih in višinskih odstopanj smo opravili grafično oziroma vizualno in s statističnimi testi. Osnovna grafična načina sta histogram porazdelitve in kvantilni graf (angl. Q-Q plot), s katerim primerjamo funkcijo empirične porazdelitve s teoretičnimi kvantili normalne porazdelitve. Za odstopanja, pri katerih histogram izraža normalno porazdelitev in so na kvantilnih grafih prikazana kot linija brez odstopanj, smo predpostavili, da se normalno porazdeljujejo. Odstopanjem smo izračunali kvantilne range in pripadajoče kvantile. Vsakemu rangu smo izračunali še pripadajoč kvantil, ki sledi normalni teoretični porazdelitvi. Slika 110 prikazuje histograme porazdelitve in kvantilne grafe koordinatnih in višinskih odstopanj 269 točk, ki predstavljajo podlago opisne statistike oziroma vizualno oceno normalne porazdelitve.



a)



b)



Slika 110: Histogrami porazdelitve koordinatnih odstopanj po: a) ΔN in c) ΔE in e) višinskih odstopanj ΔH . Modra linija označuje pričakovano število odstopanj v primeru normalno porazdeljenih odstopanj z ocenjeno srednjo vrednostjo in standardnim odklonom odstopanj. Kvantilni grafi koordinatnih odstopanj po: b) ΔN in d) ΔE ter f) višinskih odstopanj ΔH . Točke prikazujejo kvantile posameznih odstopanj. Linija prikazuje teoretične kvantile normalne porazdelitve.

Figure 110: Histograms of distribution of coordinate deviations under a) ΔN and c) ΔE and e) ΔH height deviations. Blue line marks expected number of deviations in the case of normal distribution of deviations with estimated mean value and standard deviation of coordinate deviations. Quantile graph of coordinate deviations under b) ΔN and d) ΔE and f) height deviation at ΔH ; the points present quantiles of individual deviations. Line shows theoretical quantiles of normal distribution.

V teoriji je več statističnih testov za preverjanje normalnosti porazdelitve (Thode, 2002). Najpogosteje se uporabljajo Shapiro-Wilkov, ki primerja dejanske in pričakovane kvantile, Kolmogorov-Smirnov, ki temelji na podlagi največje razlike med dejansko empirično in teoretično pričakovano kumulativno porazdelitvijo, in njegova modifikacija Anderson-Darlingov test. Pri izbiri ustreznega je treba upoštevati določene dejavnike, predvsem velikost vzorca in poznavanje parametrov o porazdelitvi. Uporabili smo Anderson-Darlingov test (Anderson in Darling, 1954), ki pomeni eno od najmočnejših orodij preverjanja neparametrične hipoteze o porazdelitvi spremenljivk in je precej občutljiv na deviacije repov empirične porazdelitve (Stephens, 1974; D'Agostino in Stephens, 1986).

V danih okoliščinah želimo na temelju posameznih vzorcev slučajnih spremenljivk koordinatnih in višinskih odstopanj preizkusiti ničelno neparametrično hipotezo H_0 za posamezno odstopanje: odstopanje je porazdeljeno normalno. V nasprotnem moramo sprejeti alternativno hipotezo H_1 : odstopanje ni porazdeljeno normalno.

Anderson-Darlingovo testno statistiko – ob predpostavki, da vrednosti elementov v vzorcu x_i , $i = \dots n$, kjer je n število elementov v vzorcu, razvrstimo po velikosti od najmanjšega do največjega in zapišemo:

$$A^2 = -n - \sum_{i=1}^n \frac{(2i-1)}{n} \left\{ \ln \left(F_0 \left[Z_{(i)} \right] \right) + \ln \left(1 - F_0 \left[Z_{(n+1-i)} \right] \right) \right\} \quad (105)$$

kjer se predpostavlja, da je F_0 normalna porazdelitvena funkcija s predpostavljeno ali prevzeto srednjo vrednostjo (\bar{x}) in standardnim odklonom (s) vzorca. $Z_{(i)}$ je v tem primeru enak $(x_i - \bar{x})/s$. Če je statistika A^2 večja od mejne vrednosti pri določeni stopnji značilnosti in številu opazovanj, moramo ničelno hipotezo zavrniti. Pogosto se v praksi uporablja prilagojena statistika A^{*2} za primere, kjer srednja vrednost in standardni odklon populacije nista dana in vzorec vsebuje več kot 8 vrednosti:

$$A^{(*2)} = A^2 \left(1 + \frac{0,75}{n} + \frac{2,25}{n^2} \right) \quad (106)$$

Porazdelitev ni taka, kot pravi ničelna hipoteza, če je statistika A^{*2} večja od mejne vrednosti 0,631, 0,752, 0,873, 1,035 ali 1,159 ob 10 %, 5 %, 2,5 %, 1 % in 0,5 % stopnji značilnosti (D'Agostino in Stephens, 1986). Pogosto se uporablja p-vrednost, ki pomeni najmanjšo stopnjo pomembnosti, pri kateri ničelno hipotezo še lahko zavrnemo ob izračunani testni statistiki. V testu smo preverili, ali je p-vrednost manjša ali enaka stopnji značilnosti, kar je podlaga za zavrnitev ničelne hipoteze, v nasprotnem je ne moremo zavrniti ob izbrani stopnji značilnosti.

Rezultati empiričnih podatkov o koordinatnih in višinskih odstopanjih so bili uporabljeni kot osnova za preverjanje normalne porazdeljenosti teh. Teste smo izvedli s statističnim programskim orodjem R, rezultati so ob velikosti vzorcev ($n = 269$) sledeči:

- za koordinatna odstopanja po E je testna statistika $A^{*2} = 0,525$, p-vrednost = 0,181; ničelne hipoteze ne moremo zavrniti ob stopnji značilnosti 0,05,
- za koordinatna odstopanja po N je testna statistika $A^{*2} = 0,547$, p-vrednost = 0,159; ničelne hipoteze ne moremo zavrniti ob stopnji značilnosti 0,05,
- za višinska odstopanja je testna statistika $A^{*2} = 0,707$, p-vrednost = 0,065; ničelne hipoteze ne moremo zavrniti ob stopnji značilnosti 0,05.

Na podlagi Anderson-Darlingovega testa smo ugotovili, da ničelne hipoteze ne moremo zavrniti za nobeno od navedenih odstopanj ob stopnji značilnosti 0,05. Identične rezultate nakazuje že opisna statistika.

Glede na navedeno lahko za oceno točnosti položaja, višine in naklona cevi in vodov z georadarskim modelom uporabimo standardne mere točnosti RMSE, težišče in standardni odklon (glej razdelke 5.1.2, 5.1.3 in 5.1.4).

5.1.2 Položajna ocena točnosti

Za cenilki točnosti koordinat točk s predlaganim modelom georadarskih opazovanj smo uporabili RMSE in položajni (radialni) RMSE (Cheng et al., 2013).

$$RMSE_{(\Delta E_i)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta E_i^2}{n}} = 0,037 \text{ m} \quad (107)$$

$$RMSE_{(\Delta N_i)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta N_i^2}{n}} = 0,066 \text{ m} \quad (108)$$

$$RMSE_{(pol)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta E_i^2 + \Delta N_i^2)}{n}} = 0,076 \text{ m} \quad (109)$$

Analiza je vključevala še ugotavljanje centralne tendence in razpršenosti dobljenih parov koordinatnih odstopanj. Kot standardna mera centralne tendence parov koordinatnih odstopanj je bilo uporabljeno njihovo težišče (aritmetična sredina posameznih koordinatnih komponent).

$$\mu_{\Delta E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta E_i) = 0,002 \text{ m} \quad (110)$$

$$\mu_{\Delta N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta N_i) = 0,012 \text{ m} \quad (111)$$

kjer je n število vseh točk. Za oceno razpršenosti koordinatnih odstopanj je bil uporabljen standardni odklon koordinatnih odstopanj ΔE_i in ΔN_i .

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta E_i - \mu_{\Delta E})^2}{n-1}} = 0,037 \text{ m} \quad (112)$$

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta N_i - \mu_{\Delta N})^2}{n-1}} = 0,065 \text{ m} \quad (113)$$

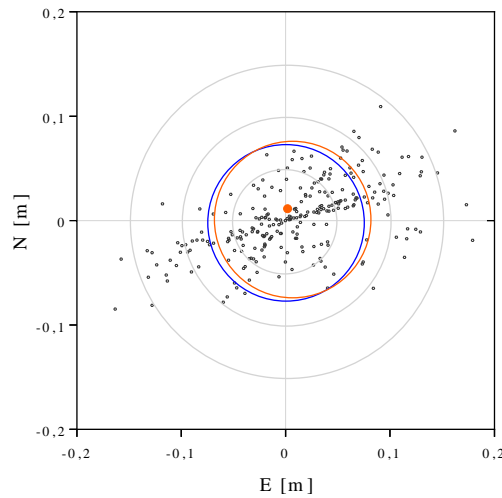
Položajni (radialni) standardni odklon, izračunan kot:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2} = 0,075 \text{ m} \quad (114)$$

Grafične prikaze razpršenosti odstopanj in razporeditve točk glede na velikost položajnega odstopanja prikazuje slika 111. Ocenjena položajna točnost modela georadarskih opazovanj za evidentiranje GI v testnih bazenih je 0,076 m (položajni (radialni) RMSE). Ocenjena je centralna tendenca odstopanj, težišče vektorjev odstopanj leži 0,012 m iz izhodišča proti severovzhodu. Praga 3·RMSE, ki določa grobo pogrešena opazovanja (Hohle in Potuckova, 2011; Hohle in Hohle, 2009), ni preseglo nobeno položajno odstopanje.

Informacijo o porazdelitvi smo uporabili pri izbiri ustreznega testa značilnosti. Za odstopanja smo uporabili t-test značilnosti. Zanesljivost cenilk, ocenjenih na podlagi vzorca, smo podali z intervalom zaupanja. 95 % interval zaupanja za srednjo vrednost, ocenjen na podlagi t-porazdelitve, je $[0,0036 \text{ m} < \mu < 0,0193 \text{ m}]$ za koordinatna odstopanja po N in $[-0,0030 \text{ m} < \mu < 0,005867 \text{ m}]$ za koordinatna odstopanja po E in $[0,0162 \text{ m} < \mu < 0,0299 \text{ m}]$. 95 % interval zaupanja za standardni odklon, ocenjen

na podlagi χ^2 -porazdelitve, je $[0,0603 \text{ m} < \sigma < 0,0714 \text{ m}]$ za koordinatna odstopanja po N in $[0,0603 \text{ m} < \sigma < 0,0714 \text{ m}]$ za koordinatna odstopanja po E .



Slika 111: Prikaz položajnih odstopanj temenskih točk v testnih bazenih: krogi (sive barve) označujejo položajna odstopanja 5, 10 in 15 cm; 0,076 m – položajni RMSE (moder krog), 0,075 m – položajni σ_p (rjav krog) in težišče vektorjev odstopanj (rjava točka).

Figure 111: Presentation of position differences of apex points in testing pools: circles (grey colour) marking the position differences of 5 cm, 10 cm, and 15 cm; 0,076 m – position RMSE (blue circle), 0,075 cm – position σ_p (brown circle) and the barycenter of differences vectors (brown point).

5.1.3 Višinska ocena točnosti

Oceno točnosti višin smo prav tako izvedli s primerjavo višin 269 (n) referenčnih meritev polarne metode detajlne izmere, izračunanih s pomočjo trigonometričnega višinomerstva, in predlaganim georadarskim modelom pridobljenih višin na predpostavljenih identičnih točkah (glej sliko 112). Za cenilko točnosti višin s predlaganim modelom georadarskih opazovanj smo uporabili RMSE, ki smo ga ocenili na podlagi višinskih odstopanj ΔH . Ocena je prav tako vključevala ugotavljanje centralne tendence in razpršenosti dobljenih parov višinskih odstopanj. Kot standardna mera centralne tendence parov višinskih odstopanj je bilo uporabljeno njihovo težišče $\mu_{(\Delta H)}$, za razpršenost standardni odklon $\sigma_{(\Delta H)}$:

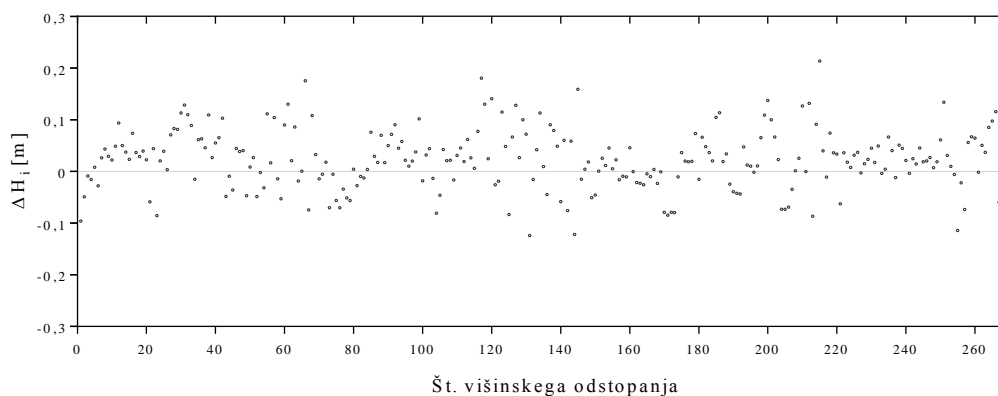
$$\Delta H_i = H_i - H'_i \quad (115)$$

$$\text{RMSE}_{(\Delta H)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta H_i^2}{n}} = 0,1154 \text{ m} \quad (116)$$

$$\mu_{(\Delta H)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta H_i = 0,006 \text{ m} \quad (117)$$

$$\sigma_{(\Delta H)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta H_i - \mu)^2}{n-1}} = 0,1153 \text{ m} \quad (118)$$

kjer so H_i višine i -te točke, pridobljene z modelom georadarskih opazovanj, H višine i -te referenčne točke, ΔH_i višinska odstopanja i -te točke. Praga $3 \cdot \text{RMSE}$ ni preseglo nobeno višinsko odstopanje. Zanesljivost cenilk, ocenjenih na podlagi vzorca, smo podali z intervalom zaupanja. 95 % interval zaupanja za srednjo vrednost višinskih odstopanj, ocenjen na podlagi t -porazdelitve, je $[0,0162 \text{ m} < \mu < 0,0299 \text{ m}]$ za višinska odstopanja. 95 % interval zaupanja za standardni odklon, ocenjen na podlagi χ^2 -porazdelitve, znaša $[0,0603 \text{ m} < \sigma < 0,0714 \text{ m}]$.



Slika 112: Prikaz višinskih odstopanj temenskih točk v testnih bazenih.

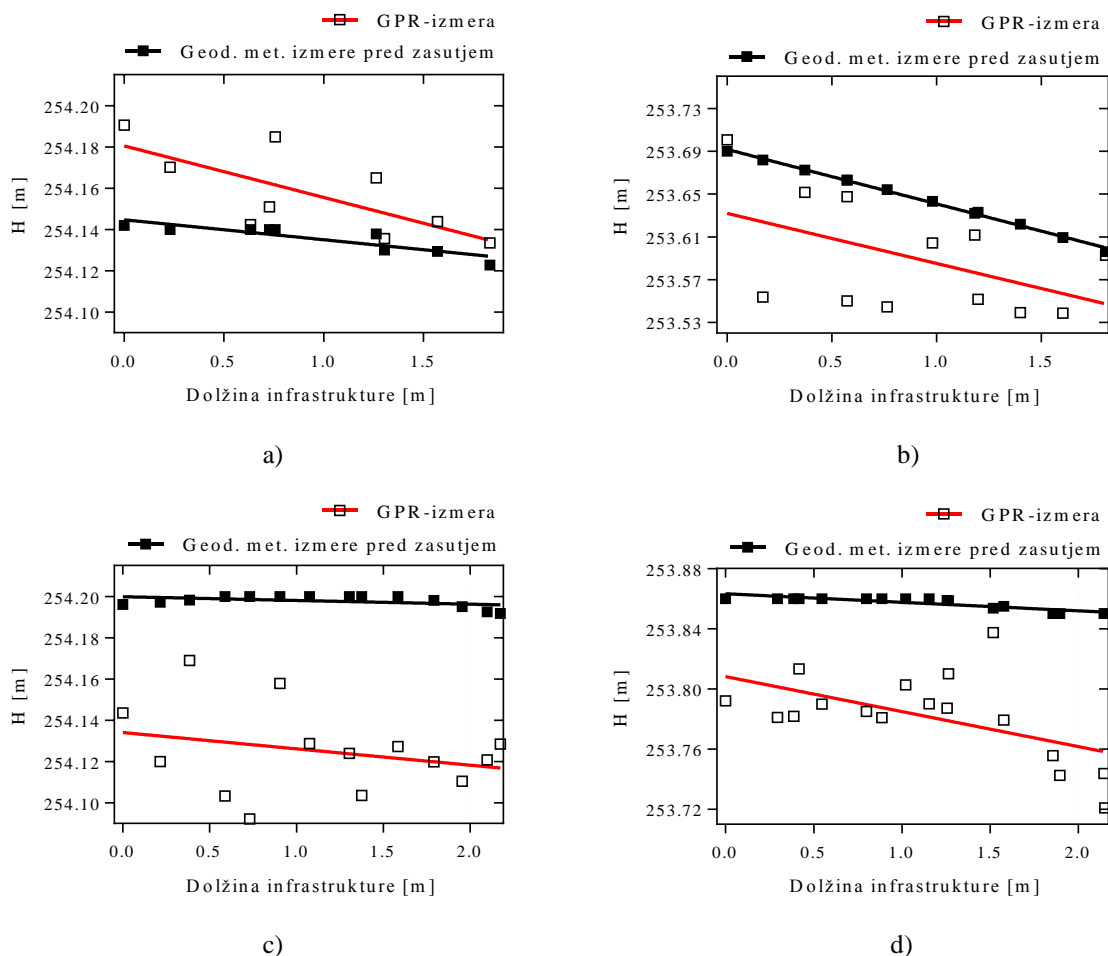
Figure 112: Presentation of height differences at apex points in testing pools.

5.1.4 Ocena točnosti naklona

Ob dejstvu posameznih kosov vgrajenih ravnih infrastrukturnih cevi v testnih bazenih, kjer ne nastopajo spajanja, predpostavljamo konstantni naklon cevi. Množico parov meritev normalnih ortometričnih višin in položaja temena posameznih cevi s predlaganim modelom georadarskih opazovanj in geodetsko metodo izmere med vgradnjo lahko predstavimo v ravnini z rasevnim diagramom. Iz pripadajočih položajev temen normalnih ortometričnih višin po geodetski metodi smo izračunali horizontalno dolžino posameznih odsekov, na koncu združenih v komulativno dolžino. Zaradi zgoraj navedenih dejstev o ceveh predpostavljamo, da je regresijska funkcija linearna:

$$Y = b_0 + b_1 X + E \text{ oziroma } y_i = b_0 + b_1 x_i + e_i \quad (i = 1, \dots, n; n > 2) \quad (119)$$

kjer b_1 predstavlja regresijski koeficient oziroma naklon regresijske premice oziroma cevi in b_0 regresijsko konstanto. Oba parametra smo ocenili po metodi najmanjših kvadratov. Z uporabo linearne regresije, pri kateri smo primerjali vrednosti normalnih ortometričnih višin in horizontalne dolžine cevi, smo določili premico, ki najbolje opiše njihovo povezavo oziroma se številskima spremenljivkama najbolje prilega. Oceno točnosti naklona smo izvedli s primerjavo referenčnih naklonov po geodetski metodi izmere v času vgradnje in naklona s predlaganim georadarskim modelom (glej sliko 113). Kljub nekaterim nizkim vrednostim deleža pojasnjene variance oziroma determinacijskega koeficienta r^2 , ki nakazujejo neznatno ali nizko povezanost dolžine cevi in nadmorske višine s predlaganim georadarskim modelom, smo naklone uporabili za oceno.



Slika 113: Prikaz referenčnega naklona (črna premica) in pridobljenega s predlaganim georadarskim modelom (rdeča premica): a) Črna premica: -0,9 % naklon, $r^2 = 0,78$; rdeča premica: -2,5 % naklon, $r^2 = 0,52$ ciljnega objekta zaporedne številke 1 (glavna plinska cev DVGW – DN/OD 100; $RMSE_{(\Delta H)} = 0,078$ m, $\mu_{(\Delta H)} = 0,015$ m, $\sigma_{(\Delta H)} = 0,081$ m); b) Črna premica: -5,1 % naklon, $r^2 = 0,99$; rdeča premica: -4,7 % naklon, $r^2 = 0,25$ ciljnega objekta zaporedne številke 10 (kanalizacijska cev PE – DN/OD 125; $RMSE_{(\Delta H)} = 0,082$ m, $\mu_{(\Delta H)} = 0,031$ m, $\sigma_{(\Delta H)} = 0,079$ m); c) Črna premica: -0,18 % naklon, $r^2 = 0,20$; rdeča črta: -0,79 % naklon, $r^2 = 0,08$ ciljnega objekta zaporedne številke 2 (glavna plinska cev DVGW – DN/OD 63; $RMSE_{(\Delta H)} = 0,09$ m, $\mu_{(\Delta H)} = 0,047$ m, $\sigma_{(\Delta H)} = 0,079$ m); d) Črna premica: -0,5 % naklon, $r^2 = 0,77$; rdeča črta: -2,3 % naklon, $r^2 = 0,29$ ciljnega objekta zaporedne številke 7 (transportna vodovodna cev Tubi PVC – DN/OD 110; $RMSE_{(\Delta H)} = 0,053$ m, $\mu_{(\Delta H)} = 0,045$ m, $\sigma_{(\Delta H)} = 0,028$ m).

Figure 113: Presentation of inclinations of reference (black line) and proposed GPR model (red line): a) Black line: -0.9% inclination, $r^2 = 0.78$; red line: -2.5% inclination, $r^2 = 0.52$ of target object no. 1 (main gas pipe DVGW – DN/OD 100; $RMSE_{(\Delta H)} = 0.078$ m, $\mu_{(\Delta H)} = 0.015$ m, $\sigma_{(\Delta H)} = 0.081$ m); b) Black line: -5.1% inclination, $r^2 = 0.99$; red line: -4.7% inclination, $r^2 = 0.25$ of target object no. 10 (sewage pipe PE – DN/OD 125; $RMSE_{(\Delta H)} = 0.082$ m, $\mu_{(\Delta H)} = 0.031$ m, $\sigma_{(\Delta H)} = 0.079$ m); c) Black line: -0.18% inclination, $r^2 = 0.20$; red line: -0.79% inclination, $r^2 = 0.08$ of target object no. 2 (main gas pipe DVGW – DN/OD 63; $RMSE_{(\Delta H)} = 0.09$ m, $\mu_{(\Delta H)} = 0.047$ m, $\sigma_{(\Delta H)} = 0.079$ m); d) Black line: -0.5% inclination, $r^2 = 0.77$; red line: -2.3% inclination, $r^2 = 0.29$ of target object no. 7 (water pipe Tube PVC – DN/OD 110; $RMSE_{(\Delta H)} = 0.053$ m, $\mu_{(\Delta H)} = 0.045$ m, $\sigma_{(\Delta H)} = 0.028$ m).

Za cenilko točnosti naklonov s predlaganim modelom georadarskih opazovanj smo uporabili RMSE, ki smo ga ocenili na podlagi naklonskih odstopanj Δn . Naklonska odstopanja smo izračunali le za cevi (ciljni objekti z zaporednimi številkami 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 13, 14 in 17), medtem ko smo vode in kabelsko kanalizacijo, kjer ne moremo predpostavljati konstantnega naklona zaradi načina vgradnje in njihovih fizičnih lastnosti, izpustili. Ocena je prav tako vključevala ugotavljanje centralne tendence in razpršenosti dobljenih parov naklonskih odstopanj. Kot standardna mera centralne tendence parov naklonskih odstopanj je bilo uporabljeno njihovo težišče $\mu_{(\Delta n)}$, za razpršenost standardni odklon $\sigma_{(\Delta n)}$:

$$\Delta n_i = n_i - n'_i \quad (120)$$

$$RMSE_{(\Delta n)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta n_i^2}{n}} = 1^\circ 32' 07'' \quad (121)$$

$$\mu_{(\Delta n)} = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta n_i \right| = 0^\circ 59' 10'' \quad (122)$$

$$\sigma_{(\Delta n)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta n_i - \mu)^2}{n-1}} = 1^\circ 12' 50'' \quad (123)$$

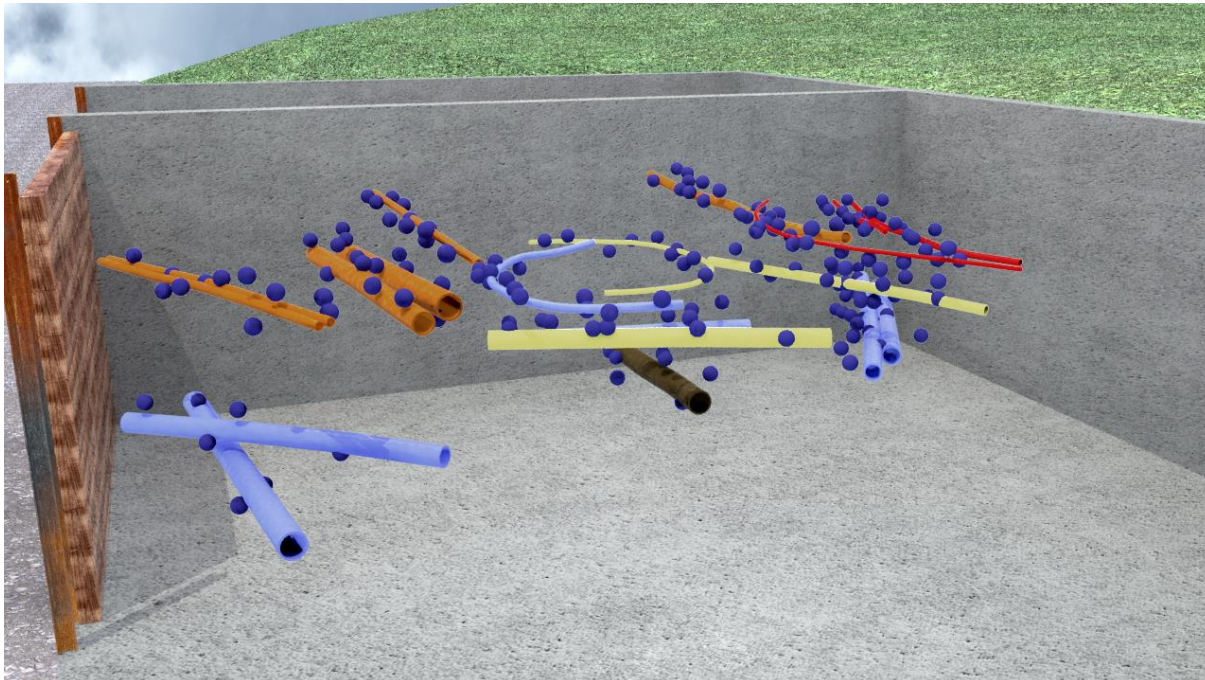
n'_i je naklonski kot i -te cevi, pridobljene z modelom georadarskih opazovanj, n_i naklonski kot i -te referenčne cevi, Δn_i odstopanja naklonskih kotov i -te cevi ter n število točk v vzorcu. Praga 3·RMSE ni preseglo nobeno odstopanje naklonskega kota.

5.2 Grafična predstavitev končnih rezultatov v testnih bazenih

Končni rezultat zajema in obdelave podatkov s predlaganim modelom so georeferencirani obdelani georadarski radargrami posnetih profilov v globinski domeni, iz katerih s pomočjo interpretacije pridobimo metrične podatke o temenskih točkah vgrajene GI. Te določimo s postopkom prepoznavne analize (glej razdelek 4.22) v fazi 3 ter jih v fazi 4 vizualiziramo v 3D-prostoru. Kot končni rezultat predlaganega modela lahko razumemo prostorsko definirano podzemno GI v 3D-prostoru. S predlaganim modelom nam je uspelo zajeti vso predhodno vgrajeno GI. Edina težava, kot posledica horizontalne ločljivosti, se je pojavila pri vgrajeni infrastrukturi z zaporedno številko 14 (glej preglednico 17), kjer gre za dvojno cev z vmesnim povezovalnim elementom. S predlaganim modelom je evidentirana kot enojna cev.

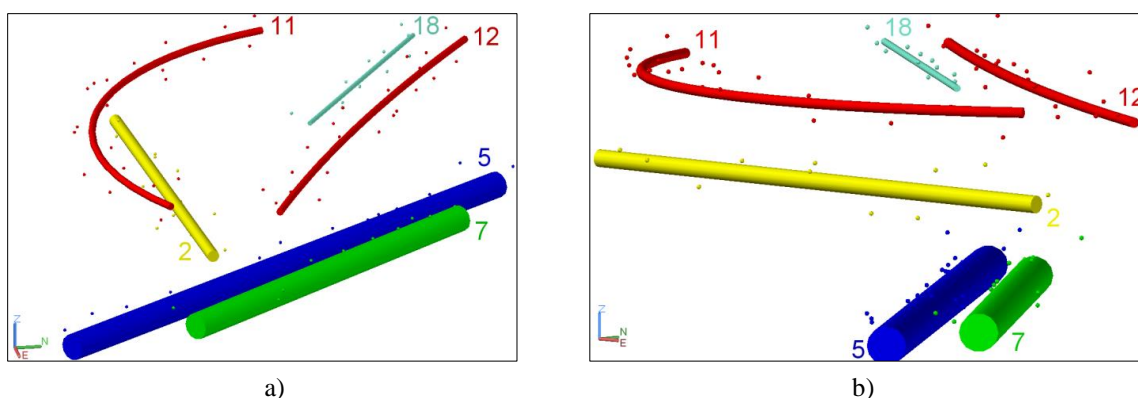
Slika 114 in 116 prikazujeta perspektivni pogled 3D-prostora izmerjenih vodov in cevi v testnih bazenih s predlaganim georadarskim modelom ob uporabi 400 in 900 MHz antene. Na podlagi 269 točk pripadajočih temen vgrajene GI smo z uporabo linearne regresije v dodatnem programskem orodju AutoCad Civil 3D (glej razdelek 4.1) vizualizirali cevi na podlagi pripadajočih temen posamezni GI. V prvi fazi smo določili premice oziroma daljice skozi točke, predstavljene s koordinatami oziroma številskimi spremenljivkami (N, E) v horizontalnem smislu. V drugi fazi smo določili regresijsko premico, ki se najbolj prilega številskima spremenljivkama (H – višina, d – dolžina), s čimer smo definirali naklone in položaje v 3D-prostoru. Pri vizualizaciji nelinearnih objektov, npr. vgrajenih vodov, smo uporabili regresijsko krivuljo (angl. second degree polynomial regression) polinoma druge stopnje skozi točke, predstavljene s koordinatami (N, E) v horizontalnem smislu. Sledila je še linearna regresija po spremenljivkah (H – višina, d – dolžina), s čimer smo definirali višino krajišč in posledično naklon GI. Uporabljeni so bili ocenjeni zunanji premeri vgrajene

GI (glej razdelek 4.21), kjer jih je bilo mogoče določiti, pri preostalih smo za potrebe vizualizacije uporabili referenčne zunanje premere. Za podroben opis in lastnosti vizualiziranih vodov in cevi v testnih bazenih glej razdelek 3.5.



Slika 114: Z regresijsko analizo vizualizirani vodi in cevi iz pripadajočih izmerjenih 269 temenskih točk (modre točke), določenih s predlaganim georadarskim modelom, v 3D-prostoru vseh treh testnih bazenov.

Figure 114: Cables and pipes visualized with the regression analysis from related measured apex points (blue points), determined with proposed georadar model in 3D testing pools space.

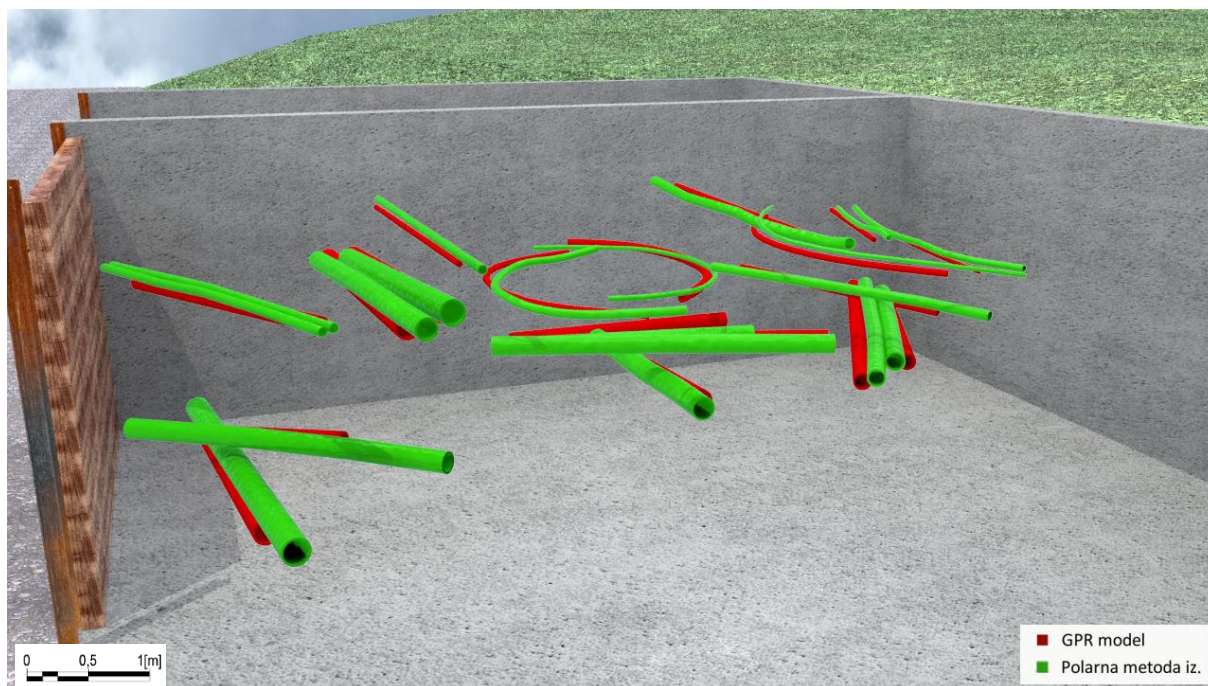


Slika 115: Podrobna vizualizacija vodov in cevi iz pripadajočih izmerjenih točk temen v 3D-prostoru tretjega testnega bazena: a) Pogled z zahoda; b) Pogled z jugozahoda.

Figure 115: Detailed visualization of cables and pipes from related measured apex points in 3D space of testing pool 3. a) Viewed from west; b) Viewed from southwest.

Slika 116 prikazuje primerjave in odklone položajev cevi in vodov (glej razdelek 3.5) v 3D-prostoru. Prikazani so referenčni vodi in cevi v testnih bazenih (zelena barva), izmerjeni s polarno metodo

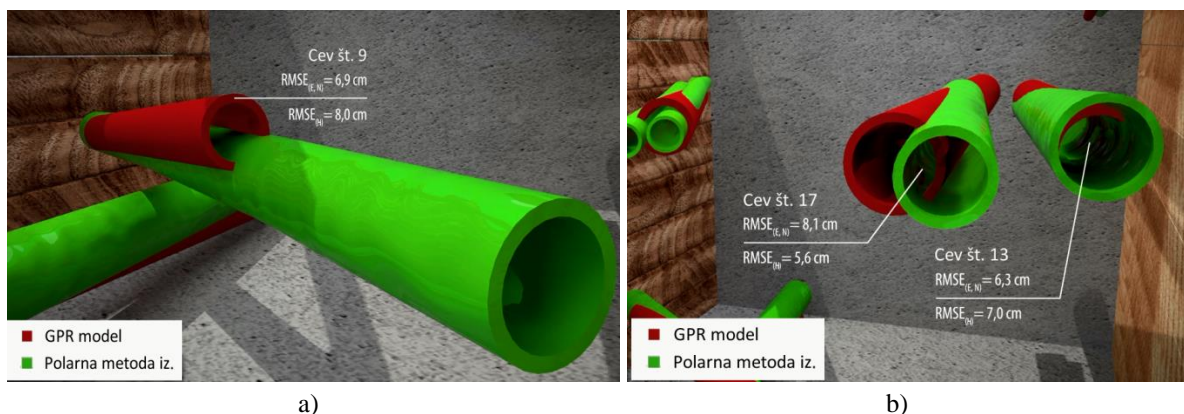
detajlne izmere (glej razdelek 4.2.3), ter vodi in cevi, pridobljeni na podlagi predlaganega georadarskega modela (rdeča barva), vizualizirani s pomočjo regresijske analize.



Slika 116: Primerjava in odkloni položajev vgrajenih cevi in vodov (georadarski model – rdeča barva) od referenčnih (polarna metoda detajlne izmere – zelena barva).

Figure 116: Installed cables and pipes position comparison and deviation (georadar model – red colour) from the reference items (polar measurement method – green colour).

Slika 117 prikazuje položajno ($RMSE_{(N,E)}$) in višinsko ($RMSE_{(H)}$) točnost (glej razdelek 5.1) cevi v 3D-prostoru. Prikazane so referenčne cevi (zelena barva) z zaporednimi številkami 9, 17 in 13, pridobljene na podlagi predlaganega georadarskega modela (rdeča barva), vizualizirane s pomočjo regresijske analize v prvem testnem bazenu. Podroben opis prikazanih cevi je podan v razdelku 3.5.2.



Slika 117: Položajni $RMSE_{(N,E)}$ in višinski $RMSE_{(H)}$: a) Vodovodna cev, zap. št. 9; b) Cevi kabelske kanalizacije, zap. št. 17 in 13.

Figure 117: Position ($RMSE_{(N,E)}$) and height ($RMSE_{(H)}$) root-mean-square error in the 3D space of testing pools: a) Water pipe no. 9; b) Cable duct pipes no. 17 and 13.

5.3 Pregled in diskusija rezultatov v testnih bazenih

Pri pregledu in primerjavi rezultatov, pridobljenih v testnih bazenih, smo se osredotočili samo na obstoječa testna okolja v svetu (glej razdelek 1.1). Podatki in raziskave s področja testiranja položajne in višinske točnosti, zmogljivosti in razvoja georadarske metode, v testnih okoljih voziščnih konstrukcij in vgrajene GI pri nadzorovanih pogojih, nam niso poznani. Znanstvenoraziskovalna ter strokovna literatura s področja testiranja zmogljivosti, položajne in višinske točnosti pri odkrivanju podzemne GI navaja le eno delo, ki se dotika georadarske metode v testnih bazenih, ki ne predstavljajo voziščnih konstrukcij.

Jaw in Hashim (2013; 2011) sta izvajala meritve v testnem okolju z antenama 270 in 750 MHz, kjer ne navajata naklona ter načina merjenja položaja in višine georadarja. Predpostavljamo, da sta avtorja radargrame dolžinsko umerjala glede na znane razdalje predhodno vzpostavljene ortogonalne mreže. Metoda GNSS-RTK izmere je bila uporabljena za potrebe določevanja položaja in višin cevi v testnem okolju pred zasutjem. Natančnosti izmere avtorja ne navajata. Georadarski podatki so obdelani s postopki popravka ničelnega časa, filtri za odstranjevanje zvonjenja antene, ciljne uporabe pasovnoprepustnih filtrov v smislu območij, kjer je GI, ter postopki ojačitve signala. Uporabljena je ročna metoda ujemanja hiperbol pri določevanju hitrosti EMV v mediju. Jaw in Hashim (2011) navajata povprečno položajno točnost zaznanih šestih od skupno devetih vgrajenih cevi v testnem bazenu, pri izvajanju georadarskih meritev pravokotno na cevi, 23,1 cm, podano z radialnim RMSE, medtem ko povprečna višinska točnost znaša 25,3 cm, podana z višinskim RMSE. V drugem delu Jaw in Hashim (2013) opisujeta identično metodo pridobivanja ter obdelavo podatkov v istem testnem bazenu, vendar podajata položajno in višinsko točnost, izboljšano za faktor 2. Rezultatov točnosti testnih bazenov, ki ne predstavljajo voziščne konstrukcije, v nadaljevanju ne primerjamo s predlaganim modelom v tej disertaciji, in sicer zaradi nepoznavanja razloga in pravil, ki so povzročila odstopanja med navedenimi rezultati testiranja točnosti.

Ena od očitnih prednosti predlaganega modela za evidentiranje GI, razvitega v tej doktorski disertaciji, je, da ni treba vzpostavljati ortogonalne mreže raziskovanega območja, na katero bi naknadno umerjali dolžine. Predlagani model temelji na kinematičnem zajemu podatkov z geodetskimi metodami, ocenjevanju latence in povezovanju georadarskih in geodetskih nizov podatkov. Druga očitna prednost predlaganega modela je, da v skladu z gostoto zajetih položajnih in višinskih točk beleži trajektorijo gibanja georadarja. S trajektorijo se približamo dejanski poti georadarja, s katero z razliko od merjenj znotraj ortogonalne mreže delno izločimo položajni pogrešek, in sicer z naknadnim lineariziranjem georadarskega profila. Tretja prednost, ki jo vidimo glede na merjenja znotraj ortogonalne mreže, je v pridobivanju višinskega profila vzdolž celotne georadarske trajektorije. Če je ortogonalna mreža vzpostavljena, se pri običajnih georadarskih opazovanjih izmerijo le horizontalne razdalje zunanjih robov oziroma razdalje med obodnimi točkami mreže z ročnim merskim trakom, mogoče je dolžinsko umerjanje profilov, izostane pa podatek o višinskih razlikah oziroma naklonu. V primeru določitve položaja in višin obodnih točk v ortogonalni mreži z geodetskimi metodami izmere sicer pridobimo višinske razlike začetnih in končnih točk georadarskih profilov, ki podajajo konstantni naklon profila, izostanejo pa reliefne spremembe vzdolž profila, ki so ključnega pomena pri uporabi topografske korekcije. Reliefne spremembe oziroma kontinuirano gibanje georadarja vzdolž profila lahko pridobimo z geodetskimi kinematičnimi metodami izmere, kot je na primer navedena in uporabljena v predlaganem modelu (glej razdelek 4.4).

Zaporedni niz predlaganih postopkov in obdelav ne more biti popolnoma objektivni, in je zato v očeh nekaterih avtorjev bolj podoben umetnosti kot znanosti (Yilmaz, 1987). Rezultati meritev so lahko

večpomenski, zato sta pri interpretaciji potrebna izkušnost in poznavanje merilne tehnike (Brezigar et al., 1995). Jaw in Hashim (2013) navajata pomembnost izkušnosti pri obdelavi in interpretaciji radargramov, ki si jo vsak posameznik zasnuje in prilagaja svojim potrebam in ciljem. Glede na obdelavo radargramov, predstavljeno v delu Jaw in Hashim (2013), predlagani model v tej disertaciji z uporabo f-k-filtrov, migracije, topografske korekcije, Hilbertove transformacije, vpeljavo metode določevanja hitrosti EMV po plasteh, metod za oceno dimenzij ciljnih objektov in 3D-vizualizacije, nadgrajuje opisanega v fazi obdelave ter interpretacije podatkov. Pri predlaganem modelu gre bolj za kvalitativne kot kvantitativne postopke, predvsem v fazi 3, ki je srce modela. Kljub nekaterim subjektivnim ter ročnim določitvam parametrov, kot na primer določitvi predvidene časovne omejitve dvojnega časa, naklonov linearnih refleksij z navidezno daljico hitrosti za potrebe f-k-filtriranja, faktorja ojačitve pri ročni ojačitvi radargramov, refleksij mej med posameznimi plastmi voziščnih konstrukcij za potrebe določevanja hitrostnega polja, širine seštevanja oziroma števila sledi v postopkih Kirchhoffove migracije in subjektivni interpretaciji dimenzij ciljnih objektov ter ročnemu temenskem izboranju refleksij, trdimo, da gre za delno avtomatiziran postopek, ki zahteva posamezne objektivne intervencije izkušenega operaterja. Ravno subjektivni postopki dajejo prednost predlaganemu modelu pred popolnoma avtomatiziranimi procesi. Na primer na radargramih testnih bazenov, kjer se pojavljajo spreminjajoče linearne refleksije s spreminjajočimi nakloni kot posledica odbojev EMV od sten in pregradnih sten med bazeni, se avtomatizacija izkaže kot neučinkovita. Kar se kaže v preveč ali premalo odstranjenih linearnih refleksijah. V prihodnosti pa je z veliko verjetnostjo pričakovati avtomatizacijo tudi preostalih, danes ročno določenih parametrov.

Kot rezultat predlaganega modela so določeni posamezni zunanji premeri ciljnih objektov in njihova točnost po metodi ujemanja referenčne hiperbole in prilagajanja polmera ciljnega objekta. Kot je opisano v razdelku 4.21, znaša cenilka točnosti RMSE 18,4 mm, centralna tendenca relativne napake pa je 17,2 %. Rezultati so odvisni predvsem od prisotnosti šuma in čistosti refleksijskih hiperbol. Metoda določevanja premera je sicer del interpretacije rezultatov, vendar je v predlaganem modelu zaradi lažje prepoznave refleksijskih hiperbol uvrščena pred migracijske postopke v zaporedni niz obdelave opazovanj, ki jih predstavlja faza 3.

Laboratorijsko dokazan majhen volumenski delež vode v voziščnih konstrukcijah je precej pozitivno vplival na končne rezultate položajne in višinske točnosti oziroma določevanja globin. Položajna točnost predlaganega modela v testnih bazenih obeh uporabljenih anten skupaj znaša 7,6 cm, podana je z radialnim RMSE. Višinska točnost je podana z višinskim RMSE in znaša 11,5 cm. Praga $3 \cdot \text{RMSE}$, ni preseglo nobeno položajno in višinsko odstopanje. Točnost naklona znaša $1^\circ 32' 07''$ naklonskega kota, podanega z naklonskim $\text{RMSE}_{\Delta n}$.

Položajna točnost, podana z radialnim RMSE 900 MHz antene, znaša 6,7 cm in je boljša od 400 MHz, ki znaša 8,6 cm. Podobno odstopanje je mogoče zaznati med višinsko točnostjo 10,6 cm pri 900 MHz in 12,3 cm pri 400 MHz anteni, podani z višinskim RMSE. Razlike točnosti bi lahko pripisali prostorski ločljivosti uporabljenih anten. Posledično je mogoče pri višji položajni in vertikalni ločljivosti antene zaznati boljšo kontrastnost in izrazitejše geometrije hiperbol ter jim natančneje zamejiti temena. S povečanjem centralne frekvence se posledično zmanjšuje globinski doseg. V primeru voziščnih konstrukcij testnih bazenov je globinski doseg 900 MHz antene znašal 1,6–1,7 m, medtem ko je globinski doseg 400 MHz antene dosegel tudi globino 1,9 m in več. Iz rezultatov lahko sklepamo, da se z globinskim dosegom zmanjšuje kvantitativni element kakovosti, kot je točnost določevanja položaja in globine, ter hkrati povečuje popolnost zajetih vodov in cevi v testnih bazenih. Z večjim globinskim dosegom lahko zajamemo oziroma prepoznamo več podzemne GI.

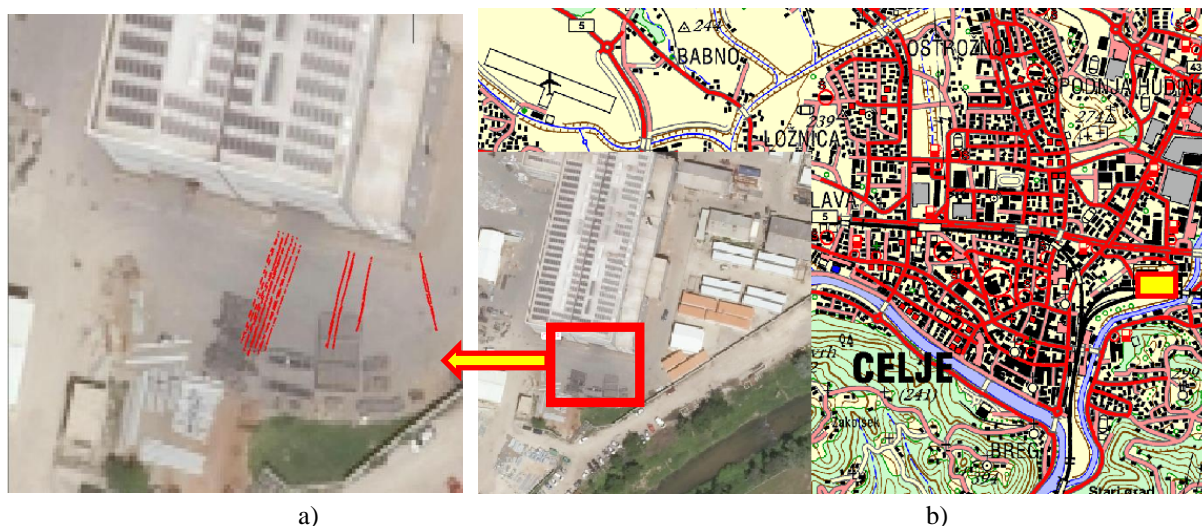
»Ta stran je namenoma prazna«

6 PREIZKUS IZDELANEGA MODELA GEORADARSKIH OPAZOVANJ V REALNEM OKOLJU

Izdelan model georadarskih opazovanj in izsledke glede prepoznavanja in pridobivanja metričnih podatkov ciljnih objektov GI, pridobljenih v testnih bazenih, smo preizkusili v izbranem realnem urbanem okolju. Izbrani sta bili dve območji v urbanem delu Mestne občine Celje, kjer smo preizkusili celoten model, ter eno dodatno območje, kjer smo preizkusili le del modela, in sicer fazo obdelave radargramov. Zaradi zagotovitve reprezentativnega testnega območja nas je vodilo nekaj osnovnih kriterijev: primeren relief; primerna površina (prekrita z asfaltnimi zmesmi); površina naj predstavlja voziščno konstrukcijo ali pohodno površino; na območju naj bo vsaj ena GI, katere položaj je bil določen z geodetskimi metodami pred zasutjem; obstoj referenčne osnove oziroma geodetske mreže, uporabljene ob evidentiranju GI; odsotnost virov EMV, ki lahko povzročajo motnje v GPR-meritvah zaradi interference (npr. daljnovodi, transformatorske postaje, radijski in televizijski oddajniki, oddajniki GSM-omrežij); in odsotnost lokalnih deformacij zemeljskega površja (območja z zaznavnim posedanjem, plazovita in erozivna območja).

6.1 Testno območje I

Pocinkovalnica v kompleksu Maksim, d. o. o., leži zahodno od vodotoka Hudinja in južno od Bežigrajske ceste v Celju ter predstavlja prvo testno območje (glej sliko 118). Pred gradnjo leta 2008 je bila na novo zgrajena vsa GI (kanalizacijske, vodovodne in plinovodne cevi ter električni vodi). Skladno s tem je bila pri gradnji izvedena klasična terestrična izmera GI pred zasutjem. V ta namen je bila ob izvedbi meritev vzpostavljena geodetska mreža, ki smo jo uporabili za geodetsko osnovo pri določevanju položaja georadarja s terestrično kinematično metodo. Ocena natančnosti določitve položaja in višine GI z geodetskimi metodami ni poznana.



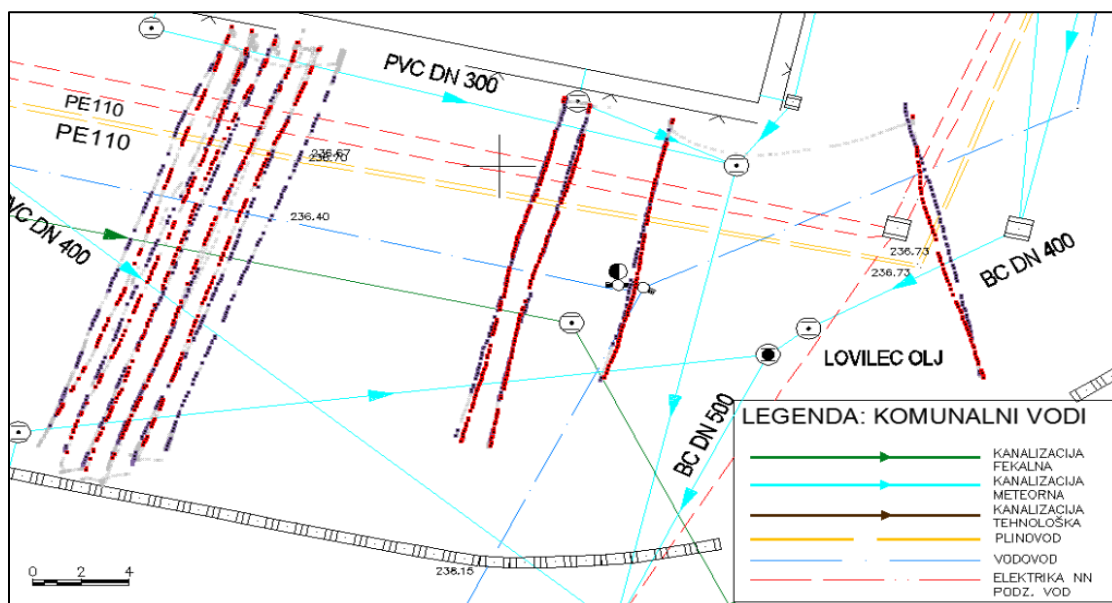
Slika 118: a) 19 profilov, uporabljenih za preizkus modela; b) Na karti je označen položaj območja v realnem okolju, območje pocinkovalnice Maksim, d. o. o., v Celju.

Figure 118: a) 19 profiles used for testing of model; b) On the map area position in real environment is marked, i.e. the area of the Maksim d.o.o. Galvanizing Plant Celje.

Sestavo zgornjega ustroja manipulacijskih površin, opredeljeno v projektni dokumentaciji zunanje ureditve s komunalnimi vodi, št. 42/2007, in projektu izvedenih del, št. 11/04 izdelovalca Vizura - Vitez prostorski inženiring, d. o. o., predstavljajo 4 cm asfaltbetona BB 8, 6 cm bitudrobirja BD 32, 2 cm peska za zaklinjanje in tamponska plast v debelini 45 cm. Na izbranem območju tehnična dokumentacija obravnava meteorno, fekalno in tehnološko kanalizacijo. Ta je zgrajena iz polivinilkloridnih (PVC) cevi od DN/OD 150 do DN/OD 400, cevi so položene v globini od 2 do 3,5 m. Podobno velja za industrijski vodovod, izveden iz cevi LŽ DUKTIL DN/OD 100, v globini 2 m. Plinovodne cevi oplaščenega polietilena (PE) DN/OD 110 ležijo v globini 1,70 m. Nad cevmi je položen opozorilni trak z vgrajenimi kovinskimi vložki. Vsa infrastruktura je položena na peščeno podlago debeline 10 cm in obsuta s peskom do višine 15 cm nad temenom cevi. Podatka o napetosti, globinah in lastnostih elektrovodov ni zaslediti.

Ob predpostavki poznavanja orientacije ciljnih objektov pri meritvah nismo razvili ortogonalne mreže. Izvedli smo meritve na 9 profilih v smeri J–S in 10 profilih v smeri S–J (glej sliko 119). Vsi profili so bili posneti na ravnini z naklonom manjšim od 0,9 %. Dolžine parov profilov so znašale od 22 do 11 m.

Uporabljen je bil identičen sestav (glej razdelek 4.1) opreme in metod za izvajanje geofizikalnih in geodetskih merenj kot v testnem okolju. Uporabljena je 400 MHz monostatična antena. Pred izmero smo umerili merilno kolo na znani razdalji, ki je zaradi nadgradnje sestava služilo le za proženje signalov v odvisnosti od opravljene razdalje in kot groba kontrola izmerjenih razdalj posameznih profilov. Frekvenca terestrične kinematične meritve je znašala 4–5 Hz, hitrost premikajočega se reflektorja $\approx 0,5$ m/s (glej sliko 120).



Slika 119: Prikaz vseh 15.423 točk, določenih s terestrično kinematično metodo (rdeče točke predstavljajo 9 profilov v smeri J–S, modre točke 10 profilov v smeri S–J, preostale točke so obarbane sivo) na geodetskem načrtu s prikazano GI.

Figure 119: Presentation of total 15,423 points, determined by terrestrial kinematic method (red points present 9 profiles in S–N direction, blue points present 10 profiles in the N–S direction, the remaining points are grey) on the geodetic plan showing underground utilities.

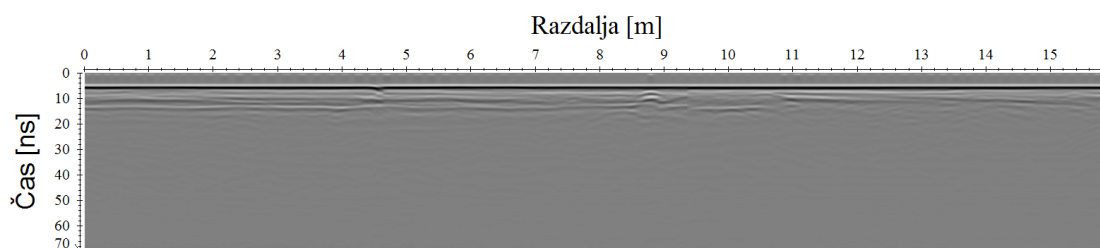


Slika 120: a) Elektronski tahimeter Leica TCRP 1201+ s samodejnim prepoznavanjem reflektorja in sledenjem v testnem območju I; b) Georadarski sistem SIR 3000, 400 MHz monostatična antena: 1) vlečna palica, 2) merilno kolo, 3) reflektor Leica GRZ4 in 4) izdelan nastavek za reflektor.

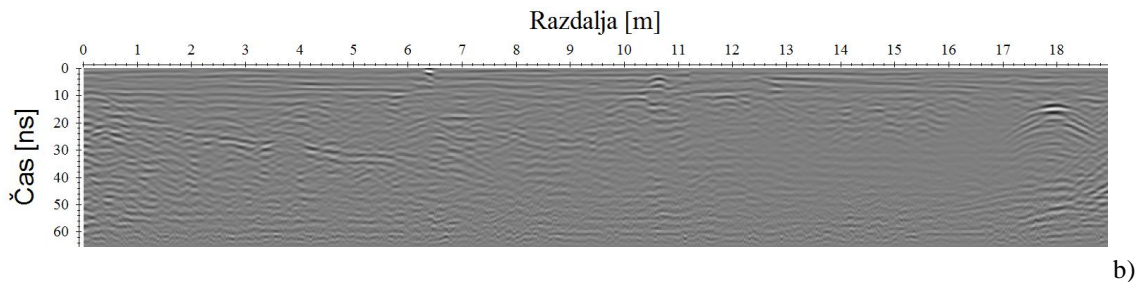
Figure 120: a) Leica TCRP 1201+ electronic tracking total station with automatic recognition of reflector of testing field I; b) SIR 3000 GPR system, 400 MHz mono-static antenna: 1) tow bar, 2) measuring wheel, 3) Leica GRZ4 reflector and 4) adapter made for reflector.

6.1.1 Obdelava radargramov

Ob predpostavki uporabe istega sestava opreme pri izvajanju meritev smo prevzeli vrednosti latence, izračunane na podlagi testnih bazenov, prav tako smo prevzeli predlagan model obdelave radargramov (glej sliko 121). V obdelavi smo iz modela namerno izpustili časovno omejevanje sledi radargrama zaradi nazornejšega prikaza globinskega dosega in neprepoznavnosti ciljnih objektov v nižjih plasteh zaradi prisotnosti podtalnice (glej razdelek 6.1.2). Zaradi nemotečih blagih zračnih odbojev bližnjega objekta smo iz modela izpustili f-k-filter. V modelu določeno okno procesa odstranitve povprečja signala smo modificirali na 35 sledi. V primeru uporabe modelnega okna 50 sledi obstaja velika verjetnost odstranitve pomembnih horizontalnih refleksij. Oceno hitrosti širjenja EMV smo ob nepoznavanju globin ciljnih objektov izvedli v kombinaciji metode ujemanja hiperbol, s katero smo podali oceno točkovnih hitrosti v temeljnih tleh, in metode določevanja hitrosti po plasteh (glej sliko 122). Kljub izjemno majhnemu naklonu smo v modelu ohranili topografsko korekcijo (glej sliko 123). Uporabili smo ročno izbiranje ciljnih objektov (glej sliko 124).

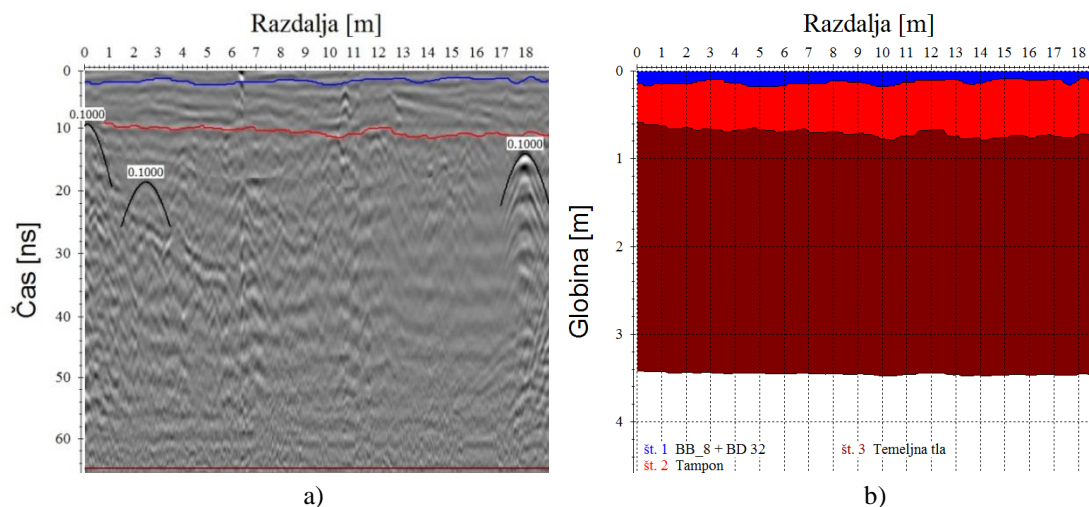


a)



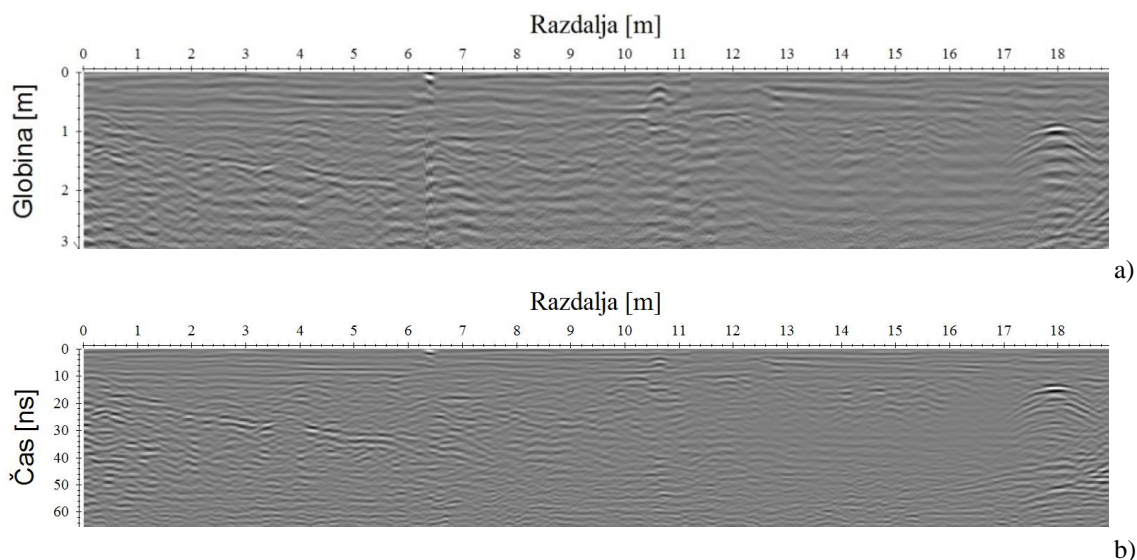
Slika 121: Obdelava radargrama 8. profila s predlaganim modelom: a) Surova oblika georadarskih meritev; b) Odstranitev zamika signala na radargramu s časovnim intervalom izračuna povprečja 50–70 ns, ročna določitev ničelnega časa pri prvem pozitivnem vrhu signala z ročnim postopkom prestavitve ničelnega časa (4,41 ns), prostorski filter odstranitve ozadja, frekvenčni pasovnoprepustni filter koničastega kosinusnega okna (250/310/580/680) in ročno ojačenje amplitude vzdolž profila na pričakovanih globinah točkovnih reflektorjev. Faktor ojačitev jakosti signala sledi v rangu 0–37 dB.

Figure 121: a) Processing of profile 8 with proposed model; rough GPR observations; b) Subtracting a constant shift on radargram with time interval of the calculation of average 50-70 ns; manual determination of zero time at the first positive peak of signal by manual setting to zero (4.41 ns), spatial filter of background removal, frequency band-pass filter of tapered cosine window (250/310/580/680) and manual gain of amplitude alongside the profile at expected depths of point reflectors. Gain factor of trace signal is in the range of 0-37 dB.



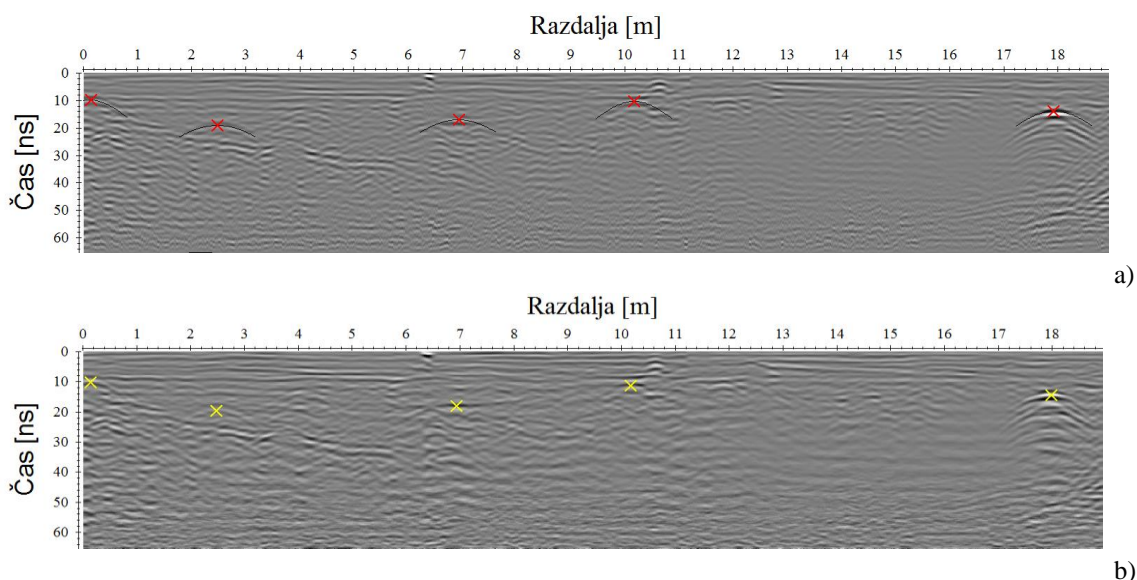
Slika 122: Ocena hitrosti širjenja EMV na 8. profilu: a) Metoda ujemanja hiperbol, s katero podamo oceno točkovnih hitrosti, in metoda določevanja hitrosti po plasteh voziščne konstrukcije; b) Hitrostno polje z obarvanimi hitrostmi (0,131 m/ns – modra; 0,124 m/ns – rdeča; 0,087 m/ns – rjava) v posameznih plasteh.

Figure 122: Estimation of velocity of EMW propagation on profile 8: a) The method of hyperbola adjustment for estimating velocity of point reflector and the method of velocity determination by individual layers of pavement structure; b) Velocity field with coloured velocity layers (0.131 m/ns – blue; 0.124 m/ns – red; 0.087 m/ns – brown).



Slika 123: Obdelan radargram 8. profila: a) Pretvorba časov v globino in topografska korekcija; b) Kirrhoffova časovna migracija na podlagi 2D-prostorskega polja in prostorsko neomejeno ročno ojačenje signala (faktor 0–22 dB) ter topografska korekcija.

Figure 123: Processed radargram of profile: a) Time-depth conversion and the topographic correction; b) Kirrchoff migration on the basis of two dimensional spatial fields and spatially unlimited manual gain of the signal (factor 0-22 dB) and topographic correction.



Slika 124: Ročno izbiranje ciljnih objektov na radargramu 8. profila: a) Izbiranje z ujemanjem oblike hiperbol (rdeči križci in prilagojene hiperbole) na obdelanem nemigriranem profilu; b) Prenos in poprava izbiranja (rumeni križci) na obdelanem migriranem profilu.

Figure 124: Manual selection of target objects on radargram of profile 8: a) Selecting with hyperboles fitting (red crosses) on processed non-migrated profile; b) Transmission and corrigendum of selection (yellow crosses) on migrated profile.

Kvantitativne podatke za 3D-prikaz GI dobimo z izbranim naborom postopkov obdelave radarskih prerezov in analizo posamičnih radarskih odbojev (Van der Kruk, 2001; Leckebusch, 2003), ki so večinoma že izpolnjeni s predlaganim modelom. Zaradi vpeljave vizualizacije v smislu prerezov

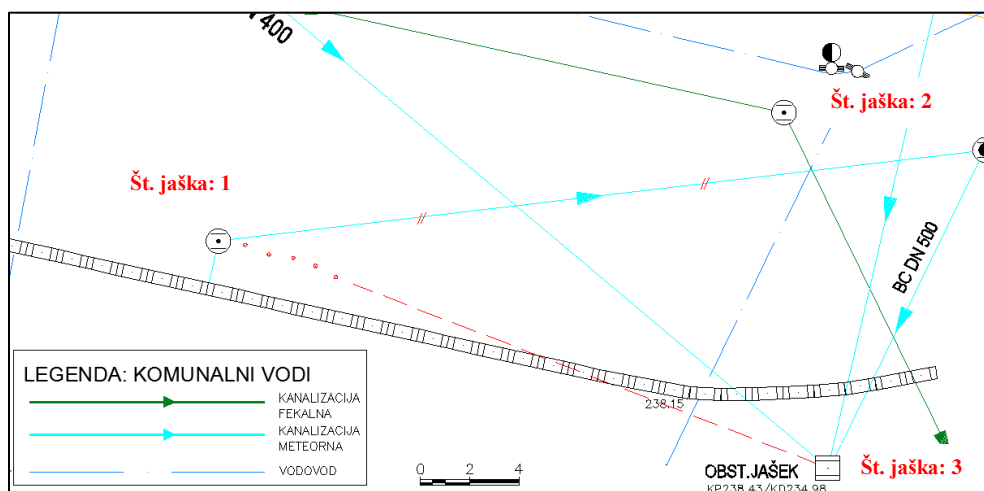
preiskovane prostornine, katere pogoj je istosmernost vseh profilov, smo dodatno uporabili funkcijo obračanja profilov (angl. flip profile).

6.1.2 Rezultati in diskusija

Vsem obdelanim georadarskim profilom testnega območja je enoten slab globinski doseg, ki ga pripisujemo lastnostim podpovršja ter precejšni vlagi in podtalni vodi že v globinah od 1,2 do 1,5 m. Posledično na pričakovanih globinah ciljnih objektov refleksij ni zaznati. Celotno testno območje je prepredeno s podtalno vodo. Po podatkih peziometra št. 0421 je povprečna globina podtalne vode po zadnjih dostopnih podatkih decembra 2009 znašala 2,34 m, najnižja globina v tem obdobju pa 1,21 m (ARSO, 2010). Peziometer je od testnega območja oddaljen 940 m severovzhodno, na sotočju Voglajne in Hudinje s koto nič 240,76 m, od katere se meri globina podzemne vode, in koto površja 240,25 m. Velika verjetnost je, da je nivo podtalne vode na testnem območju I še višji, saj je vodotok Hudinje oddaljen le dobrih 40 m.

Precej boljši rezultati se kažejo do globine 1 m, kjer je mogoče zaznati številne dobro izražene točkovne refleksije (glej sliko 124). Po navedbah investitorjev in izvajalcev gradbenih del bi lahko refleksije pripisali tudi opuščeni objektom GI. Izvajalec gradbenih del opuščeni objektov oziroma cevi ni odstranjeval. Položaj in globina opuščeni objektov GI nista poznana.

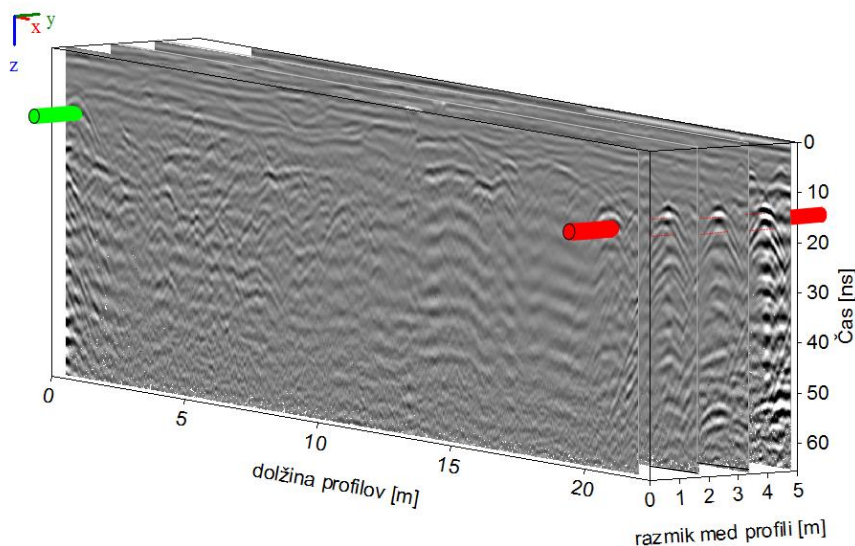
Na vseh profilih je izrazito dobro vidna točkovna refleksija polivinilkloridne cevi (glej sliko 119 (PVC DN/OD 300); sliko 124 (označena skrajno desno); sliko 126 (rdeč cilindrični objekt)) tehnološke kanalizacije na skrajnem severu testnega območja ob obstoječem objektu. Podobno lahko trdimo za meteorno kanalizacijo na južnem delu testnega območja (glej sliko 124 (označena skrajno levo); sliko 126 (zelen cilindrični objekt)). Slika 125 prikazuje položaj omenjene cevi, ki pred zasutjem ni bil določen z geodetskimi metodami. Predpostavile so se zgolj povezave med geodetsko izmerjenimi pokrovi jaškov številka 1 in 2 meteorne kanalizacije. Položaj cevi s predlaganim modelom (rdeče točke), ob nadaljevanju linijskega trenda (rdeča prekinjena linija), nakazuje smer oziroma povezavo na jašek številka 3. Ob interpretaciji podatkov lastniku smo dejansko potrdili eno od naših hipotez o nepravilni povezavi na obstoječem geodetskem načrtu po končani gradnji.



Slika 125: Napačen položaj meteorne kanalizacije, predpostavljen na izmeri kanalizacijskih jaškov.

Figure 125: Presentation of wrong positioning of rainwater drainage as assumed basis of measurement of drainage ducts.

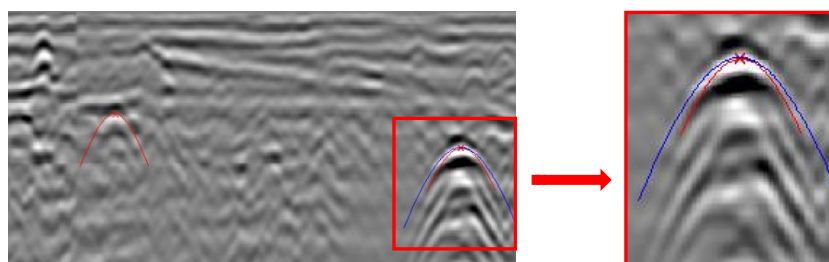
Za prikazovanje rezultatov se pogosto uporabljajo prerezi preiskovane prostornine tal v poljubnih smereh, s čimer dobimo natančen vpogled v prostorske odnose posameznih elementov. Ta postopek je še posebno dobrodošel za interaktivno interpretacijo v 3D-okolju.



Slika 126: Prostorski odnosi elementov, prikazani s serijo vzporednih georadarskih profilov preiskovane prostornine.

Figure 126: Spatial relations among elements as presented with a series of parallel GPR profiles of studied volume.

Kot referenčno refleksijsko hiperbolo ob izbrani hitrosti 0,104 m/ns smo ob predpostavki malega premera izbrali točkovni objekt ($R \approx 0_+$) v bližini ciljnega cilindričnega objekta. Na podlagi prilagajanja premera po metodi ujemanja referenčne hiperbole in prilagajanja polmera smo izračunali absolutne in relativne napake ob danem DN/OD 300 PVC-cevi tehnološke kanalizacije. Cenilka točnosti RMSE znaša 0,02 m. Slika 127 prikazuje izbrano referenčno refleksijsko hiperbolo (rdeča hiperbola) točkovnega objekta in ujemanje oziroma spreminjanje njene geometrije ob spremembi premera ciljnega objekta na 0,28 m (modra hiperbola).

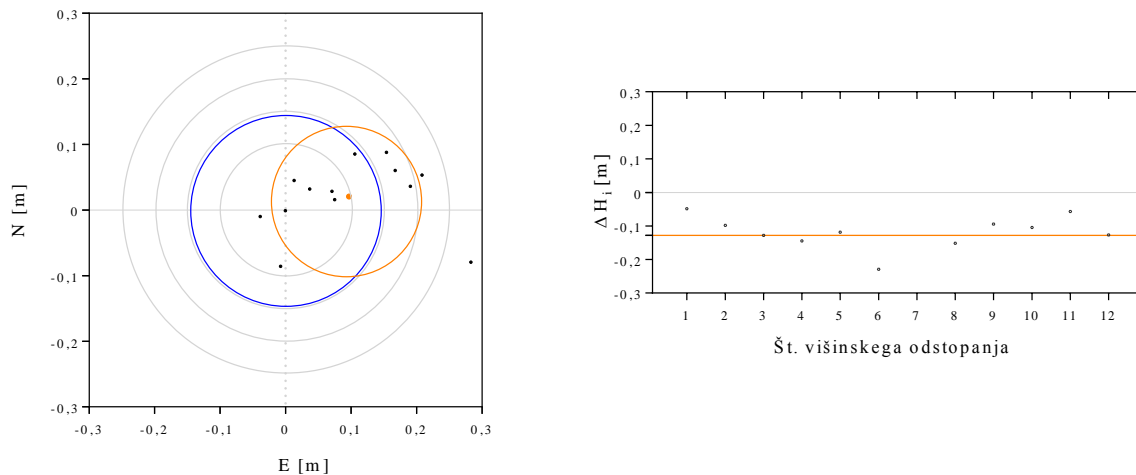


Slika 127: Referenčna točkovna refleksijska hiperbola (rdeča) in spreminjanje njene geometrije ob spremembi premera ciljnega objekta (modra).

Figure 127: Reference point reflection hyperbola (red hyperbola) and changing of its geometry by changing diameter of target object (blue hyperbola).

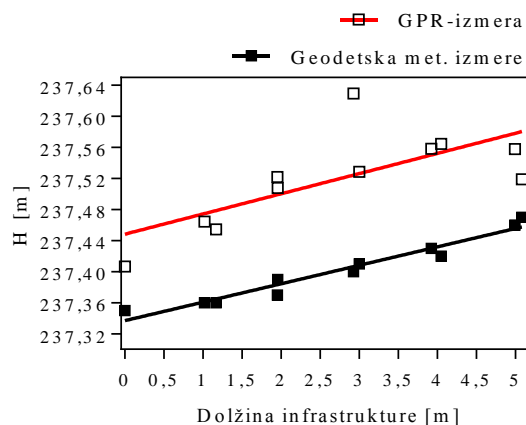
Oceno točnosti položaja in višine smo izvedli s primerjavo 12 (n) pripadajočih referenčnih točk (glej razdelek 5.1.2 in 5.1.3), kot to prikazuje slika 128. Ocenjena položajna točnost georadarskih opazovanj za evidentiranje GI v testnem naravnem okolju I je 0,146 m (položajni (radialni) RMSE).

Položajni (radialni) standardni odklon je $\sigma_p = 0,112$ m, medtem ko težišče vektorjev odstopanj leži 0,098 m iz izhodišča v smeri vzhoda. Ocenjena višinska točnost znaša 0,134 m, medtem ko je $\sigma_{(\Delta H)}$ enak 0,093 m in centralna tendenca višinskih odstopanj $\mu_{(\Delta H)} = -0,128$ m. Praga 3·RMSE, ki določa grobo pogrešena opazovanja, ni preseglo nobeno položajno in višinsko odstopanje. Razlika med referenčnim naklonom in naklonom, pridobljenim z georadarsko metodo, znaša $0^\circ 30' 08''$ naklonskega kota (glej razdelek 5.1.4), kot prikazuje slika 129.



Slika 128: Prikaz položajnih in višinskih odstopanj temenskih točk v izbranem realnem urbanem okolju. Krogi (sive barve) označujejo položajna odstopanja 0,10 m, 0,15 m, 0,20 m in 0,25 m; 0,146 m – položajni RMSE (moder krog), 0,112 m – položajni σ_p (oranžen krog), težišče vektorjev odstopanj (oranžna točka). Linija (oranžna) označuje centralno tendenco višinskih odstopanj $\mu_{(\Delta H)} = -0,128$ m.

Figure 128: Presentation of the position and height differences of apex points in chosen real urban environment: Circles (grey colour) mark position differences 0,10 m, 0,15 m, 0,20 m and 0,25 m; 0,146 m – RMSE position (blue circle), 0,112 m – σ_p position (brown circle), barycenter of vectors differences (brown point). Line (brown) marks central tendency of height differences $\mu_{(\Delta h)} = -0,128$ m.

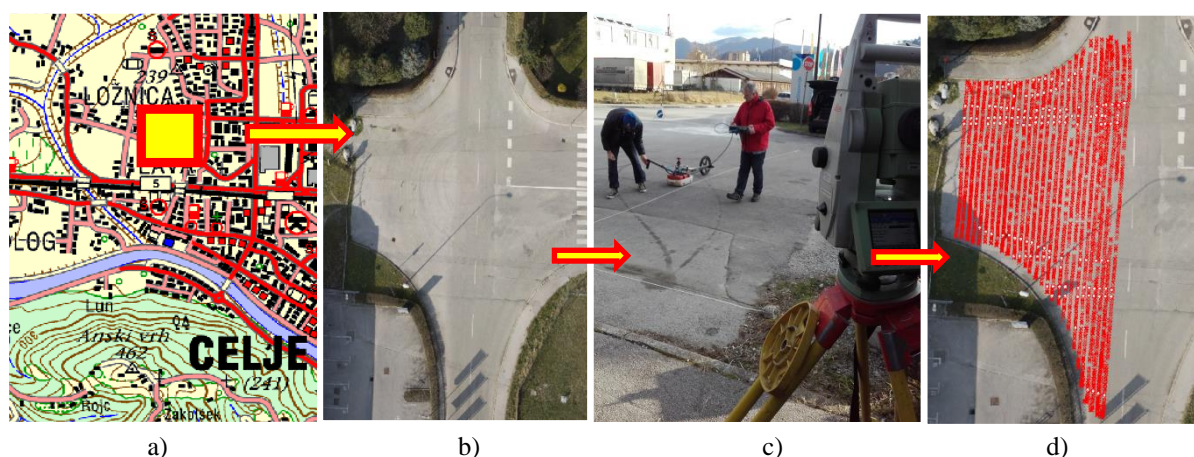


Slika 129: Prikaz referenčnega naklona (črna premica: 2,3 % naklon, $r^2 = 0,95$) in pridobljenega s predlaganim georadarskim modelom (rdeča črta: 2,6 % naklon, $r^2 = 0,51$) tehnološke kanalizacije.

Figure 129: Presentation of reference inclinations (black line; 2.3% inclination, $r^2=0.95$) and proposed GPR model (red line; 2.6% inclination, $r^2=0.51$) of the rainwater drainage.

6.2 Testno območje II

Križišče oziroma stičišče podaljška Dečkove ceste in Njogoševe ulice v mestni četrti Lava v Celju je bilo izbrano za drugo testno območje (glej sliko 130). Na izbiro so vplivali ugoden položaj v prostoru, obstoječa predhodna geodetska izmera, delna opuščenost križišča na zahodni strani, predpostavljen nivo podtalne vode na 2,5 m in neprisotnost radiofrekvenčnih motenj. Ovirajoča okoliščina je sicer frekvenca prometa, ki nam ni dovoljevala izvedbe meritev na celotnem območju križišča. Glavni razlog izbire območja je bila rekonstrukcija oziroma obnova vodovodnega in plinovodnega distribucijskega oskrbovalnega sistema na začetku junija leta 2012. Pred zasutjem je bila izvedena klasična terestrična geodetska izmera. Zaradi veljavne zakonodaje in zahteve naročnika je bila kot referenčna osnova uporabljena poligonometrična mreža I. reda, iz katere je bil že v preteklosti določen položaj v 3D-prostoru vseh obstoječi GI. Ocena natančnosti določitve položaja in višin GI, izmerjenih z geodetskimi metodami, ni poznana. Identične točke poligonometrične mreže tako stojišča kot orientacijskih točk, stabiliziranih s kovinskimi čepi, smo uporabili za geodetsko osnovo pri določevanju položaja georadarja s terestrično kinematično metodo. V tem delu disertacije podajamo položaje v starem državnem koordinatnem sistemu D48/GK ter višine točk kot nadmorske višine, podane v sistemu normalnih ortometričnih višin.



Slika 130: a) Karta z označenim položajem križišča Dečkove ceste in Njogoševe ulice (Lava, Celje) v realnem okolju; b–c) Izvedba georadarskih opazovanj; d) Prikaz vseh 16.878 točk, določenih s terestrično kinematično metodo (rdeče točke predstavljajo 28 profilov v smeri J–S).

Figure 130: a) On the map, the position of the crossroad area between Dečkova and Njogoševa Streets (Lava-Celje) in the real environment is marked; b–c) Execution of GPR observations; d) Presentation of total 16,878 points determined by using terrestrial kinematic method (red points show 28 profiles in S–N direction).

6.2.1 Izdelava digitalnega ortofota testnega območja II

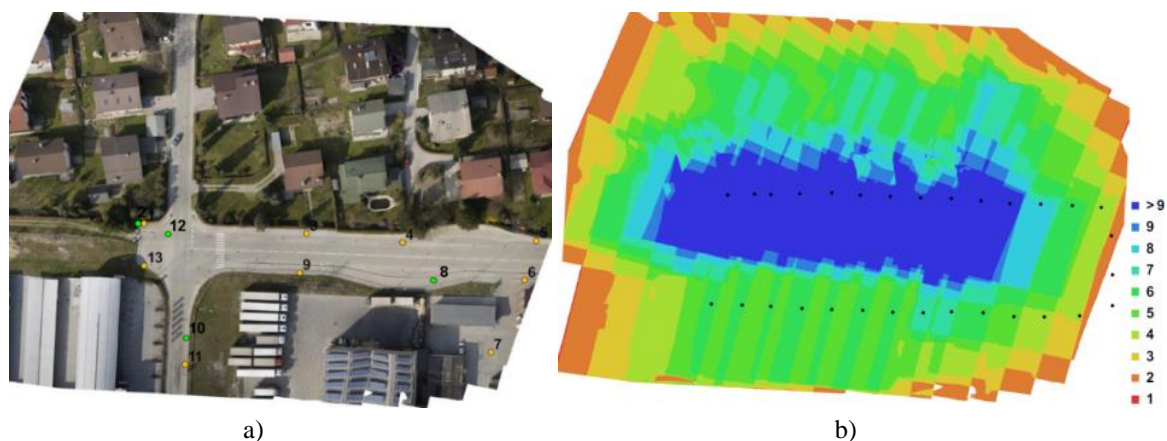
Za boljši prikaz rezultatov z georadarskim modelom določene GI smo izvedli fotogrametrično snemanje testnega območja II z malim brezpilotnim letalnikom (BPL). Najpogosteje se v geodetski praksi uporabljajo BPL v fotogrametrične namene, izdelavo 3D-modelov objektov, digitalnih modelov površja (DMP) ali reliefa (DMR) in ortofotov (Eisenbeiß, 2009; Hausamann, 2005; Siebert in Teizer, 2012). Pri izdelavi ortofota s prostorsko ločljivostjo 1,17 cm, površine 2,56 ha, smo uporabili večrotorni BPL (glej razdelek 4.1).

Na osnovi planiranega leta smo po območju enakomerno razporedili, stabilizirali in signalizirali 9 oslonilnih točk, ki služijo za orientacijo posnetkov in georeferenciranje fotogrametričnega bloka v koordinatnem sistemu D48/GK. Kot kontrolne točke smo uporabili 4 točke osnovne poligonometrične mreže I. reda, na osnovi katerih je narejena groba položajna in višinska ocena točnosti DMR. Pri določevanju horizontalnega položaja in višin oslonilnih in kontrolnih točk smo uporabili klasično terestrično metodo izmere. Po izvedbi geodetskih meritev in določitvi območja leta smo izvedli snemanje z BPL.

Uporabili smo vnaprej programiran let testnega območja II, zasnovan v programskem okolju, navedenem v razdelku 4.1. Območje smo posneli s 40 % prečnim in 80 % vzdolžnim preklopom nadirnih posnetkov, 90 m relativno višino leta, ločljivostjo posamezne fotografije 36 milijonov točk (7340×4912), goriščno razdaljo objektiva 35 mm ter povprečno velikostjo slikovne pike/elementa $4,88 \mu\text{m} \times 4,88 \mu\text{m}$.

Združevanje posnetkov v fotogrametrični blok poteka preko veznih točk, ki se samodejno določijo s postopkom gostega slikovnega ujemanja (angl. dense image matching). V tej fazi obdelave, ko se posnetki med seboj le relativno povežejo, se izračunajo tudi elementi notranje orientacije fotografske kamere (koordinate glavne točke posnetka, goriščna razdalja objektiva, velikost slikovne pike in parametri radialne in/ali tangencialne optične distorzije). Obdelava podatkov snemanja je izvedena s programskim modulom, navedenim v razdelku 4.1. Parametri notranje orientacije se sicer za merske fotoaparate določijo z laboratorijsko kalibracijo (Kraus, 2006).

Relativno orientiran blok posnetkov na podlagi koordinat oslonilnih točk (glej sliko 131) transformiramo v referenčni koordinatni sistem. Ob tem se izračunajo tudi parametri zunanje orientacije vsakega posnetka v bloku (3 parametri translacije, 3 parametri zasuka slikovnega koordinatnega sistema glede na referenčni koordinatni sistem). Na podlagi orientiranih posnetkov in samodejno izmerjenih slikovnih koordinat veznih točk se v izravnavi izračuna fotogrametrični oblak točk. Oblak točk v nadaljevanju klasificiramo na talne in netalne točke. Iz talnih točk z interpolacijo izračunamo DMR, ki služi za ortorektifikacijo posnetkov. Končni ortofoto testnega območja izdelamo z mozaičenjem ortofotov, narejenih iz posameznih posnetkov.



Slika 131: a) Položaj oslonilnih (rumene) in kontrolnih (zelene) točk območja snemanja; b) Položaj fotoaparata in pogostost prekrivanja 30 posnetkov.

Figure 131: a) Position of the ground control (yellow) and control points (green) of the recording area; b) Overlapping 30 images frequency and camera position.

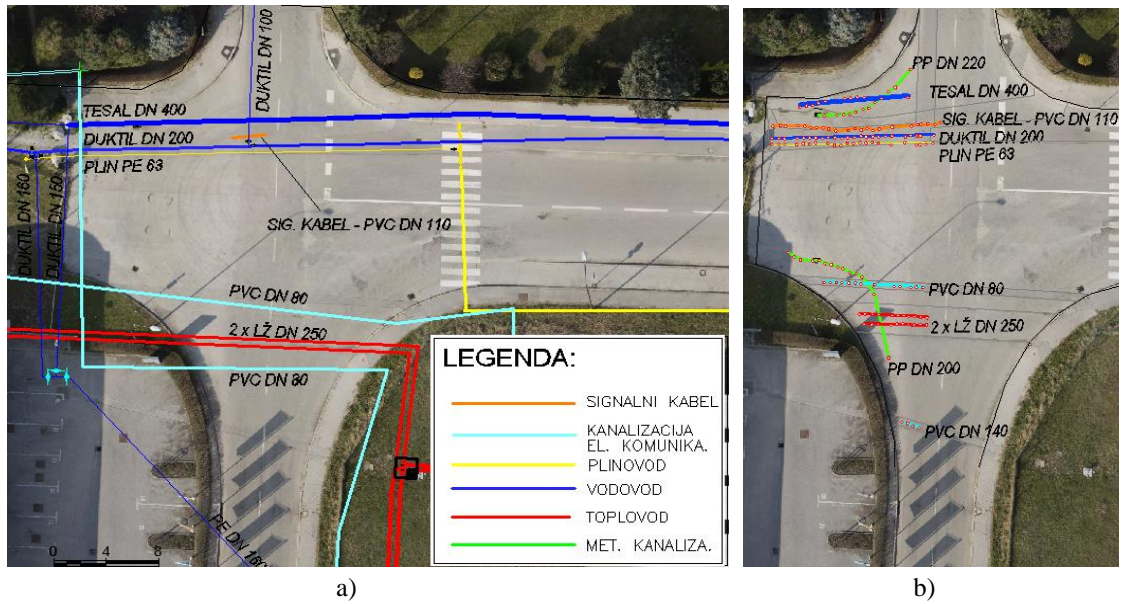
Točnost položajev točk DMR v 3D-prostoru preverjamo z odstopanjem položajev kontrolnih točk v fotogrametričnem oblaku točk od njihovih referenčnih vrednosti, zajetimi z terestrično metodo. Izrazimo ga s točnostjo horizontalnega položaja in točnostjo višine (Höhle in Potuckova, 2011). Razporeditev ter število kontrolnih točk v našem primeru ni zadovoljivo za dejansko oceno kakovosti, vseeno pa nam vsaj okvirno opredeli točnost ortofota.

Ker nismo dokazovali normalne porazdelitve odstopanj, smo uporabili robustne kazalnike točnosti, in sicer mediano kot 50 % kvantil $Q_{\Delta_i}(0,50)$, 95 % kvantil $Q_{|\Delta_i|}(0,95)$ absolutnih vrednosti odstopanj ter normalizirano mediano absolutnih odklonov NMAD (angl. normalised median absolute deviation). Na podlagi robustnih kazalnikov točnosti $Q_{|\Delta H|}(0,95) = 5,0$ cm ocenjujemo, da je višinska točnost DMR: NMAD = 2,2 cm, mediana = -1,4 cm; položajna točnost ortofota na koordinatni osi y $Q_{|y|}(0,95) = 1,7$ cm (NMAD = 1,2 cm, mediana = 0,003 cm) in koordinatni osi x $Q_{|x|}(0,95) = 4,7$ cm (NMAD = 2,7 cm, mediana = -0,007 cm). Veliko razliko med koordinatnimi osmi pripisujemo izredno majhnemu številu kontrolnih točk. Robustna ocena točnosti ortofota po horizontalnem položaju $Q_{|xy|}(0,95)$ tako znaša 4,9 cm.

6.2.2 Izvedba georadarskih meritev in obstoječa GI

Po podatkih pristojnega javnega podjetja za oskrbo s pitno vodo Vodovod-Kanalizacija, d. o. o., iz Celja, rekonstruirani vodovodni sistem obravnavanega območja predstavljajo litoželezne duktilne cevi DN/OD 200 na globini od 0,8 in 1 m. Podatki nakazujejo prisotnost Tesal centrifugiranih poliestrskih cevi, armiranih s steklenimi vlakni in kremenovim peskom DN/OD 400 industrijskega vodovoda, zgrajenega leta 1991 za potrebe podjetja Cinkarna Celje, d. d. Zapiski nakazujejo obstoj signalnega kabla v polivinilkloridni (PVC) DN/OD 110 kabelski kanalizaciji za potrebe vodovodnega podjetja o telemetriji, njegov položaj v prostoru ni poznan. Prav tako niso poznani podatki o materialu, dimenzijah in položaju ter višinah meteorne kanalizacije. Pristojno podjetje za oskrbo s plinom in toplotno energijo na obravnavanem območju navaja podatke o plinskih ceveh oplaščenega polietilena (PE) DN/OD 63, v globini 0,80 m, in dveh toplovodnih ceveh temperaturnega režima 90/70 °C, DN/OD 250 v kineti (1,70 m × 0,80 m), podatki o dimenzijah kinete in debelini izolacije (23 mm) toplovodnih cevi so prevzeti iz geodetskega posnetka toplovoda, št. 303/78-140 GZ, iz leta 1988. Debelina izolacije ob poznejši obnovi ni znana. Podatki o položaju in višini industrijskega vodovoda in toplovoda so bili v preteklosti pridobljeni na podlagi Zakona o katastru komunalnih naprav (UL SRS št. 27-211/68). Podatki, pridobljeni z digitalizacijo načrtov katastra komunalnih naprav (KKN) merila 1 : 1000, ne morejo nastopati kot referenčna osnova za ocenjevanje točnosti uporabljenega georadarskega modela, lahko pa so dobra osnova. Izvorni tahimetrični zapisniki, iz katerih bi bilo mogoče preračunati dejanski položaj in višino med meritvami, se niso ohranili.

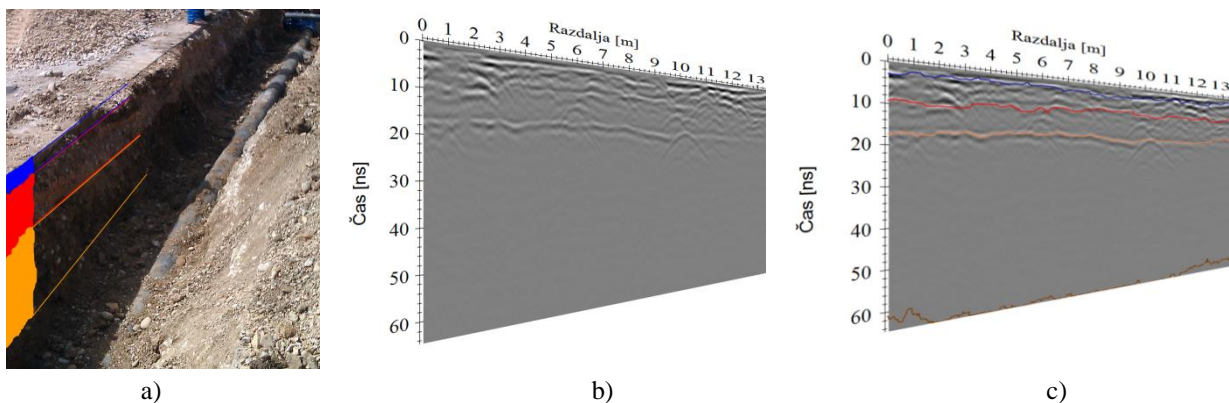
Slika 132a prikazuje GI na obravnavanem območju po podatkih upravljavcev, medtem ko slika 132b prikazuje odkrito in evidentirano GI s predlaganim georadarskim modelom, s povezanimi pripadajočimi temeni hiperbol (rdeče točke) in razpokami zaradi krpanja asfaltne zmesi pri obnovi ali rekonstrukciji GI (črne linije vzdolž GI). Položajno in višinsko skladni s podatki georadarske metode sta plinovodna cev PE 63 in rekonstruirana vodovodna cev duktil DN/OD 200 (glej razdelek 6.2.4), ki sta bili evidentirani pri odprtem rovu z geodetskimi metodami. Preostala GI položajno precej odstopa ali sploh ne obstaja v uradnih evidencah, kar pripisujemo zgodovinskim razlogom, rekonstrukcijam in nedoslednosti pri evidentiranju. Razvidno je, da je evidentirana GI z georadarskim modelom položajno precej skladna z vidnimi sledmi pri obnovi ali rekonstrukciji, poteka po sredini izkopa, kar za GI po podatkih upravljavcev ne moremo trditi.



Slika 132: Evidentirana GI na obravnavanem testnem območju II: a) GI po podatkih upravljavcev in ZKGJI; b) GI po podatkih temenskih točk, pridobljenih na podlagi predlaganega geor. modela.

Figure 132: Recorded underground utilities of testing field II: a) According to stakeholders data and ZKGJI cadastre; b) According to data collected on the basis of the proposed GPR model.

Smer georadarskih profilov smo določili na podlagi tehnične dokumentacije oziroma orientacije večine GI. Izmerili smo 28 vzporednih profilov v smeri J–S (glej sliko 130). Razdalja med profili je znašala $\approx 0,5$ m. Vsi profili so bili posneti na ravni asfaltni površini z majhnim naklonom ob hitrosti premikanja $\approx 0,5$ m/s. Dolžine profilov so znašale 13,5–34,5 m. Domeno proženja signala uporabljenega georadarskega sestava v odvisnosti od dolžine smo zagotovili s pripadajočim merilnim kolesom. Uporabili smo georadarski sestav, nadgrajen z merskim kolesom in programsko opremo, opisani so v razdelku 4.1. Določitev oziroma izbiranje plasti voziščne konstrukcije prikazuje slika 133.



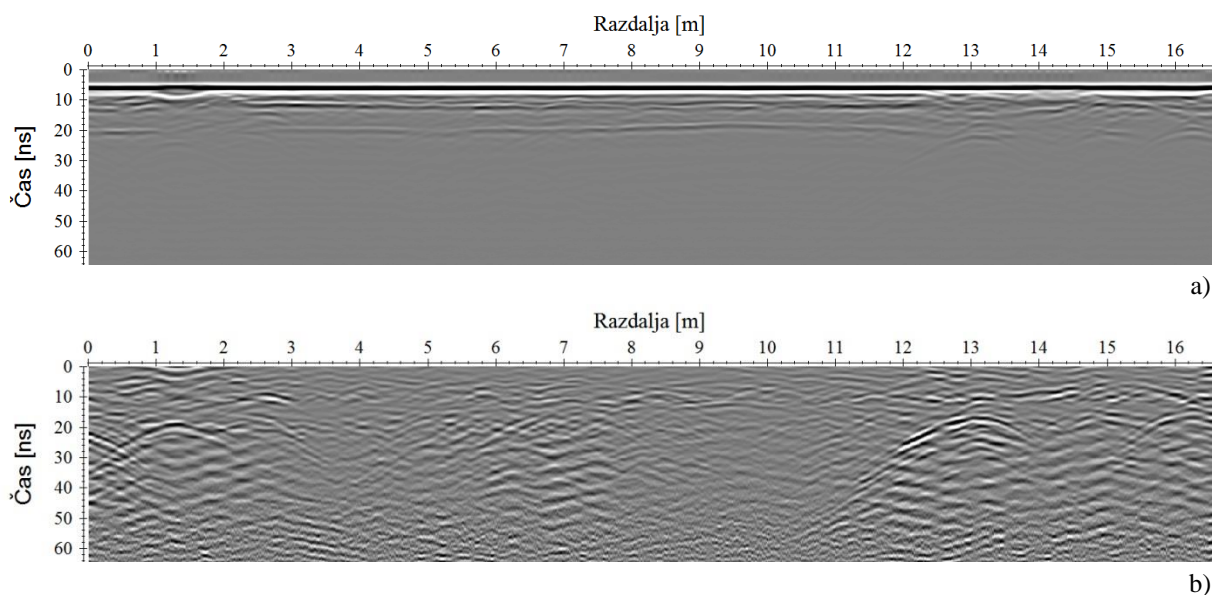
Slika 133: a) Rekonstrukcija distribucijske vodovodne cevi na testnem območju leta 2012; b) Delno obdelan radargram (izračun in popravek ničelnega časa, odstranitev zamika signala in filter odstranitve ozadja) 2. profila 400 MHz antene, kjer so dobro vidne lateralne refleksije plasti voziščne konstrukcije; c) Določitev oziroma izbiranje (angl. picking object) plasti voziščne konstrukcije.

Figure 133: a) Reconstruction of the distribution water pipe of testing field in 2012; b) Partially processed radargram (calculation and corrigendum of zero time, subtracting a constant shift and filter of background removal) of 400 MHz antenna second profile with clearly visible layers of pavement structure; c) Determination of pavement structure layers by picking object method.

Sestavo in debelino plasti voziščne konstrukcije smo povzeli po projektni dokumentaciji rekonstrukcije distribucijskega vodovodnega sistema PL 200 v podaljšku Dečkove ceste na Lavi, št. 45/2012. Kot krovni plasti sta navedeni (AC surf in AC base) skupne debeline 12 cm, čemur sledijo nevezana spodnja nosilna plast tamponskega drobljenca TD 32, debeline 35 cm; posteljica D 125 debeline 40 cm; in nosilna tla.

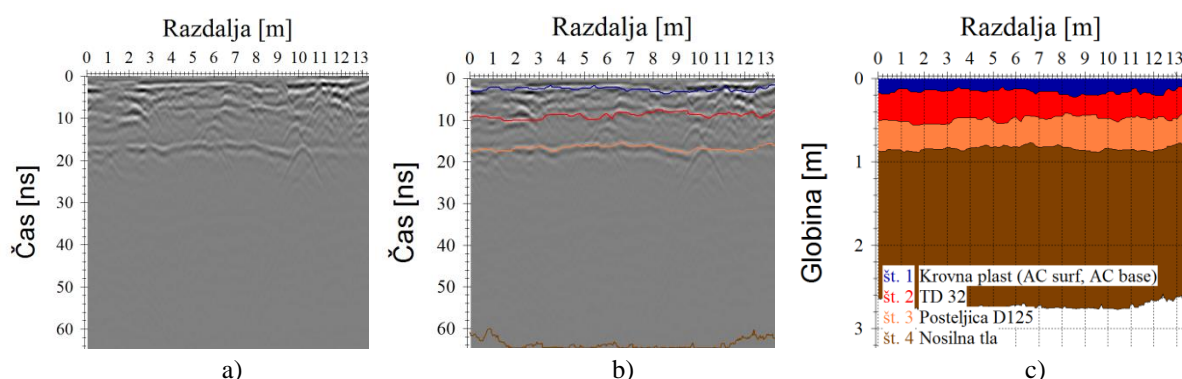
6.2.3 Obdelava radargramov

Slike 134–138 prikazujejo zajem in obdelavo podatkov pri uporabi predlaganega modela (glej razdelek 5). Upoštevana je bila latenca merskega sestava, določena v tej disertaciji (glej razdelek 4.5). Tretja faza obdelave je bila prilagojena zahtevam testnega okolja. Začetek prve faze je vseboval izračun in popravek ničelnega časa (5,20 ns), odstranitev zamika signala (50–64 ns) in filter odstranitve ozadja. Uporabljena sta bila ročna korekcija amplitude (0–32 dB) in frekvenčno pasovnoprepustno filtriranje koničastega kosinusnega okna (230/320/580/750 MHz). Obdelava je osnova določevanju lateralnih refleksij plasti voziščne konstrukcije z metodo izbiranja (angl. picking object). V voziščni konstrukciji je bila osnova ocene hitrosti širjenja EMV metoda določevanja hitrosti po plasteh (glej sliko 135), medtem ko je v nosilnih tleh uporabljena metoda ujemanja hiperbol. Izvedena je bila topografska korekcija.



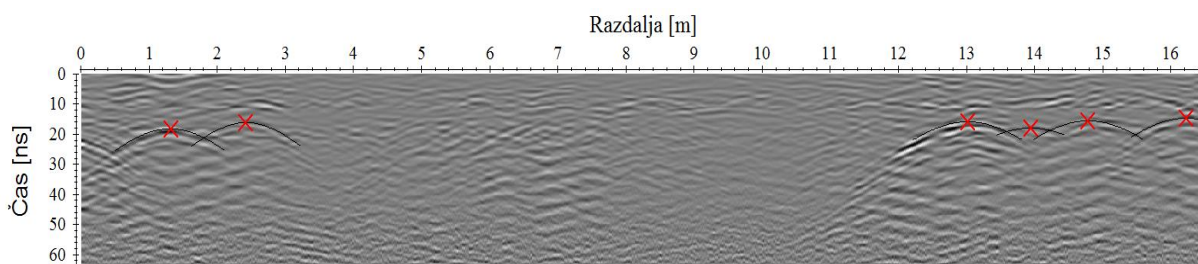
Slika 134: Obdelava radargrama 8. profila 400 MHz antene s predlaganim modelom: a) Surova oblika georadarskih meritev; b) Odstranitev zamika signala na radargramu, s časovnim intervalom izračuna povprečja 50–64 ns, ročna določitev ničelnega časa pri prvem pozitivnem vrhu signala z ročnim postopkom prestavitve ničelnega časa (5,20 ns), prostorski filter odstranitve ozadja, frekvenčni pasovnoprepustni filter koničastega kosinusnega okna (250/310/580/750) in ročno ojačenje amplitude vzdolž profila na pričakovanih globinah točkovnih reflektorjev. Faktor ojačitve jakosti signala sledi v rangu 0–32 dB.

Figure 134: Processing profile 8 of 400 MHz antenna with proposed GPR model: a) Raw radargram; b) DC-shift on radargram with time interval of calculation of average between 50-64 ns, manual determination of zero time at the first positive peak of signal by manually setting zero time (5,20 ns), spatial filter of background removal, frequency band-pass filter of tapered cosine window (250/310/580/750) and manually gained amplitude along the profile of expected depths of point reflectors. Signal gain factor follows in the range of 0-32 dB.



Slika 135: a) Delno obdelan radargram 2. profila 400 MHz; b) Ocena hitrosti širjenja EMV z metodo določevanja hitrosti po plasteh voziščne konstrukcije; c) Hitrostno polje z obarvanimi hitrostmi v posameznih plasteh (0,118 m/ns – modra; 0,105 m/ns – rdeča; 0,102 m/ns – oker; 0,098 m/ns – rjava).
Figure 135: a) Partially processed radargram of profile 2 of 400 MHz antenna; b) Estimation of EMW propagation velocity by layer pick velocity method of pavement structure. c) Velocity field with coloured values by individual layers (0,118 m/ns – blue; 0,105 m/ns – red; 0,102 m/ns – light brown, 0,098 m/ns – brown).

Postopek odstranitve povprečja signala (glej razdelek 4.14) smo izvedli pred ročnim izbiranjem ciljnih objektov, s čimer smo želeli odstraniti horizontalne refleksije, npr. plasti voziščnih konstrukcij. Ker nas postopek ni zadovoljil, smo v modelu uporabili f-k-filter, kjer smo vsakemu posameznemu profilu opredelili parameter hitrostnega intervala pahljačaste oblike, s katerim smo dosegli zastavljeni cilj. Prepoznavna analiza je narejena z referenčnim ročnim izbiranjem točkovnih ciljnih objektov (glej sliko 136), ki jih v nadaljevanju uporabimo na migriranih radargramih. Na posameznih radargramih je bila dodatno uporabljena dekonvolucija. Ta se je v testnem okolju II izkazala kot koristna na območju železnih toplovodnih cevi, ki povzročajo vidne ponavljajoče se refleksije.



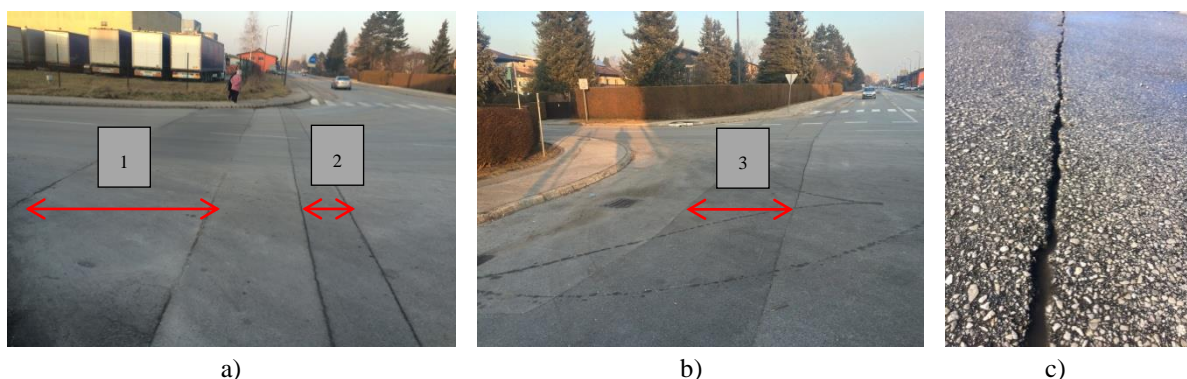
Slika 136: Ročno izbiranje ciljnih objektov na obdelanem nemigriranem (rdeči križci in prilagojene hiperbole) radargramu 14. profila 400 MHz antene. Iz leve proti desni si sledijo elektronske komunikacije, meteorna kanalizacija, vodovod LŽ DN/OD 200, signalni vod DN/OD 110, meteorna kanalizacija, vodovod TESAL DN/OD 400.

Figure 136: Manual selection of target objects on processed non-migrated (red crosses and adjusted hyperbolas) profile 14 of 400 MHz antenna. From left to right as follows: electronic communications, rainwater drainage, LŽ DN/OD 200 water supply, DN/OD 110 signal link, rainwater drainage, TESAL DN/OD 400 water supply.

6.2.4 Rezultati in diskusija

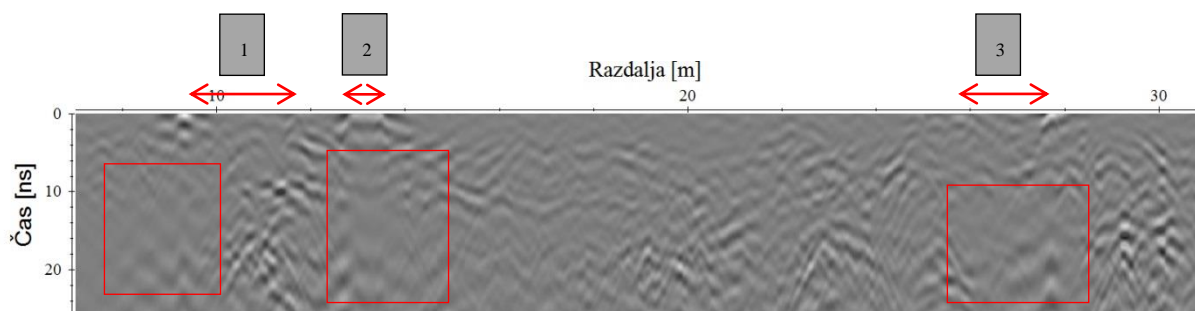
Nekaterim radargramom georadarskih profilom testnega območja je enotna slaba ločljivost kot posledica dušenja EMV v mediju. Vzrok pripisujemo pronicanju vode skozi razpoke v krovni plasti

voziščne konstrukcije. Pri polaganju, obnovi in rekonstrukciji GI na obravnavanem območju se je rezalo asfaltne površine, odkopalo voziščne konstrukcije in vgradilo bližnje, obstoječim materialom čim bolj podobne nove nosilne in krovne plasti. Kot prikazuje slika 137, se na robnih delih obravnavanega območja pojavljajo ozke in široke razpoke (TSC 08.311:2005). Poleg rekonstrukcije in prometnih ter klimatskih obremenitev sta na razpoke verjetno vplivali pomanjkljiva izvedba in uporaba od obstoječih, različnih asfaltnih zmesi. Zalitje razpok v smislu vnosa primerne bitumenske zmesi pri vzdrževanju ni bilo opravljeno. Voda zato v voziščno konstrukcijo vstopa zaradi prepustnosti vrhnjih plasti. Georadarske meritve so bile opravljene po dveh dneh dežja, kar se odraža na dušenju EMV oziroma kakovosti in ločljivosti posameznih radargramov, kjer je voda skozi razpoke znatno pronicala. Slika 138 prikazuje razpoke v krovni plasti in vpliv pronicanja vode v nosilno plast in temeljna tla na radargramu 25. profila 400 MHz antene, kjer je dušenje EMV najočitnejše.



Slika 137: Posledice rekonstrukcij voziščne konstrukcije testnega območja II: a) Razpoke nad toplovodom (št. 1) in elektronskimi komunikacijami (št. 2); b) Razpoke nad vodovodnim in plinovodnim omrežjem (št. 3); c) Vidno zastajanje in vstop vode v voziščno konstrukcijo po dežju.

Figure 137: Crevices on joints of various asphalt mixtures at the time of reconstruction of pavement structure of testing field II: a) For the needs of heating system (no.1) and electronic communications (no.2); b) For the needs of water supply system and gas pipeline (no. 3); c) Visible retention/accumulation and water entry after rainfall.

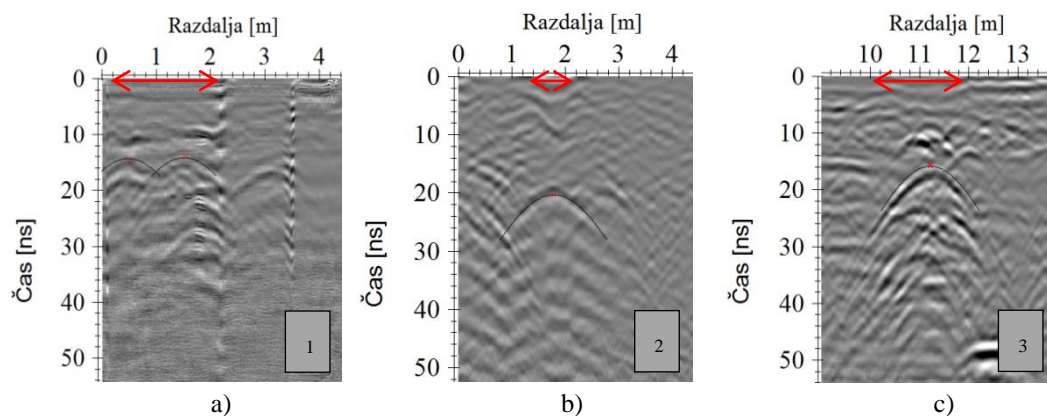


Slika 138: Vidne anomalije krovne plasti voziščne konstrukcije zaradi rekonstrukcij (1 – toplovoda, 2 – elektronskih komunikacij in 3 – vodovoda ter plinovoda) in posledice prodiranja vode v voziščno konstrukcijo v smislu dušenja EMV na radargramu 25. profila 400 MHz antene.

Figure 138: Visible anomalies of covering layer of pavement structure caused by reconstruction (1 – heating system, 2 – electronic communications and 3 – water supply and gas pipeline) and the consequences of water penetration into pavement structure for the attenuation of EMW on profile 25 of 400 MHz antenna.

Posledično lahko sklepamo in delno potrdimo dejstvo uporabnosti georadarske metode pri odkrivanju napak in poškodb oziroma odkrivanju izgub na vodovodnem sistemu, kjer se izkorišča velika relativna dielektričnost vode in spremembe fizikalnih lastnosti medija, kot to navajajo številni avtorji (Hasan, 2012; Hyun et al., 2007; Liu et al., 2002, Stampolidis et al., 2003).

Na manj dotrajanem delu voziščne konstrukcije, neobremenjene z dnevnim prometom, ki jo predstavlja odstavní pas (zahodni del križišča), ni zaznati pronicanja vode v voziščno konstrukcijo. Dobro vidne refleksije pod identičnimi razpokami zaradi krpanj asfaltne zmesi za potrebe rekonstrukcije GI so prikazane na slikah 139a, 139b in 139c. Vidne so anomalije krovne plasti voziščne konstrukcije zaradi rekonstrukcij (1 – toplovoda, 2 – elektronskih komunikacij in 3 – vodovoda ter plinovoda). V testnem okolju II je na radargramih uporabljena tudi dekonvolucija na območju železnih toplovodnih cevi. Prikazana je uporaba dekonvolucije na omejenem območju radargrama 19. profila 400 MHz antene, na katerem so železne toplovodne cevi, ki povzročajo vidne ponavljajoče se refleksije. Interval začetnega in končnega dvojnega časa, ki določata območje avtokorelacije (angl. autocorrelation), smo omejili od 5 do 11 ns, filtrirne sledi na 10 ns, medtem ko smo delež odstranitve belega šuma nastavili na rang 50. Tako obdelan profil smo za boljšo vizualizacijo ojačali s funkcijo ročne ojačitve amplitude vzdolž dvojnega časa. Po dekonvoluciji je zaznati odboja dovodnih in odvodnih vzporednih toplovodnih cevi na identični globini.

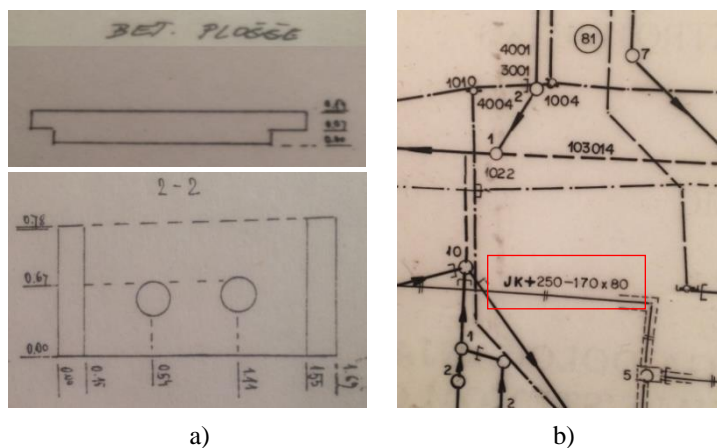


Slika 139: Vidne anomalije krovnih plasti (1– toplovoda, 2 – elektronskih komunikacij in 3 – vodovoda in plinovoda): a) Uporaba dekonvolucije na obdelanem nemigriranem (interval 5–11 ns, 10 ns, 50 – beli šum) radargramu 19. profila; b) Uporaba dekonvolucije na obdelanem nemigriranem radargramu 14. profila; c) Uporaba dekonvolucije na obdelanem nemigriranem radargramu 9. profila.

Figure 139: Visible abnormalities of covering layers (1– heating system, 2 – electronic communications and 3 – water and gas supply); a) Using deconvolution on processed non-migrated (interval 5-11 ns, 10 ns, 50 – white noise) radargram of profile 19; b) Using deconvolution on processed non-migrated radargram of profile 14; c) Using deconvolution on processed non-migrated radargram of profile 9.

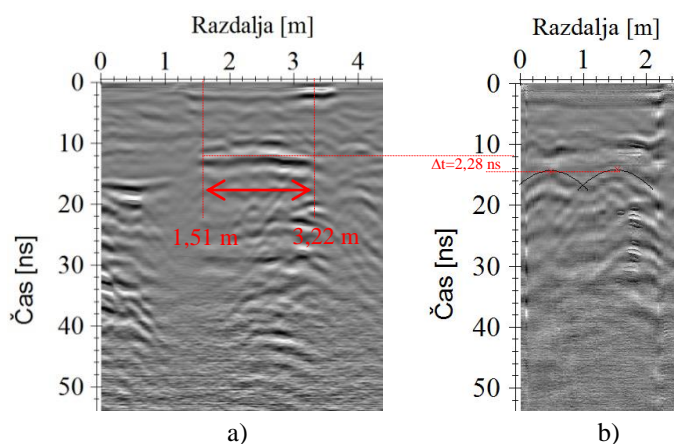
Iz zbirnega preglednega načrta razberemo jekleno cev premera DN OD 250 in dimenzijo kinete 170 cm × 80 cm. Skica in dimenzije najbližjega prečnega profila (elaborat, št. 303/78-140 GZ) betonske plošče in kinete z vgrajenimi cevmi, radargramu georadarskega 20. profila, so prikazane na sliki 140. Iz skice predpostavljamo 14 cm debelino betonske pokrovne plošče, pod katero so na tem delu trase le 4 cm od dna plošče toplovodne cevi. Ob predpostavki relativne dielektričnosti betona (4,5) in zraka (1) bi moral referenčni dvojni čas od vrha pokrova do temena izolirane cevi znašati 2,24 ns. Iz slike 141 sta razvidna dimenzija kinete (171 cm) in dvojni čas širjenja EMV od vrha pokrova kinete do temena izoliranih toplovodnih cevi (2,28 ns) na podlagi predlaganega georadarskega modela,

s čimer hkrati potrdimo skladnost podatkov KKN in georadarskih opazovanj. Radargram 20. profila je le delno obdelan (odstranitev zamika signala, ročna določitev ničelnega časa, prostorski filter odstranitve ozadja, frekvenčni pasovnoprepustni filter, Kirchhoffova migracija in vnovično ročno ojačenje amplitude) zaradi nazornejšega prikaza refleksije betonskega pokrova toplovodne kinete.



Slika 140: Podatki KKN o toplovodu (elaborat, št. 303/78-140 GZ) iz leta 1988: a) Skica prečnega profila betonske plošče in kinete z vgrajenimi cevmi; b) Tip cevi (JK) in polmer (DN/OD 250) in (170 cm × 80 cm) dimenzija kinete.

Figure 140: KKN data on heating system (GZ - 303/78-140 study) of 1988: a) The sketch of cross-sectional area of concrete slab and culvert with pipes installed; b) The pipe type (JK) and radius (DN/OD 250) and dimension of culvert (170 cm × 80 cm).

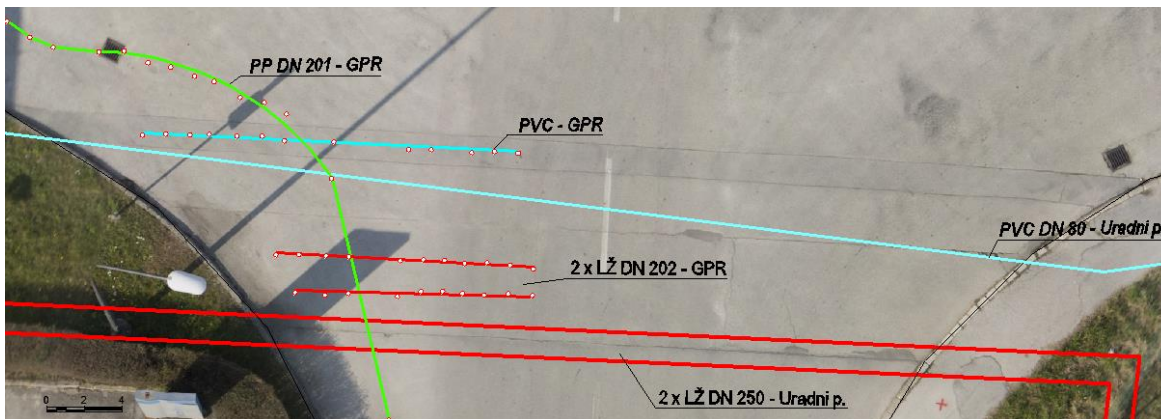


Slika 141: a) Dimenzija kinete (171 cm) in dvojni čas odboja (11,91 ns) od temena betonskega pokrova toplovodne kinete na podlagi delno obdelanega migriranega radargrama 20. profila; b) Dvojni čas odboja (14,18 ns) od temena izoliranih toplovodnih cevi ob uporabi dekonvolucije obdelanega in migriranega radargrama 19. profila.

Figure 141: a) The dimension of culvert (171 cm) and double time of reflection (11.91 ns) from the apex of concrete cover of the heating system culvert on the basis of partially processed migrated radargram of profile 20; b) Double time of reflection (14.18 ns) from the apex of insulated heating pipes using decompression of processed and migrated radargrams of profile 19.

Kot je navedeno že v uvodu (glej razdelek 6.2), je stopnja zaupanja v podatke toplovida, pridobljene z digitalizacijo načrtov katastra komunalnih naprav merila 1 : 1000, nizka. Upali bi si trditi, da so položaji, pridobljeni po predlaganem georadarskem modelu, točnejši. Krpanje asfaltne zmesi lahko

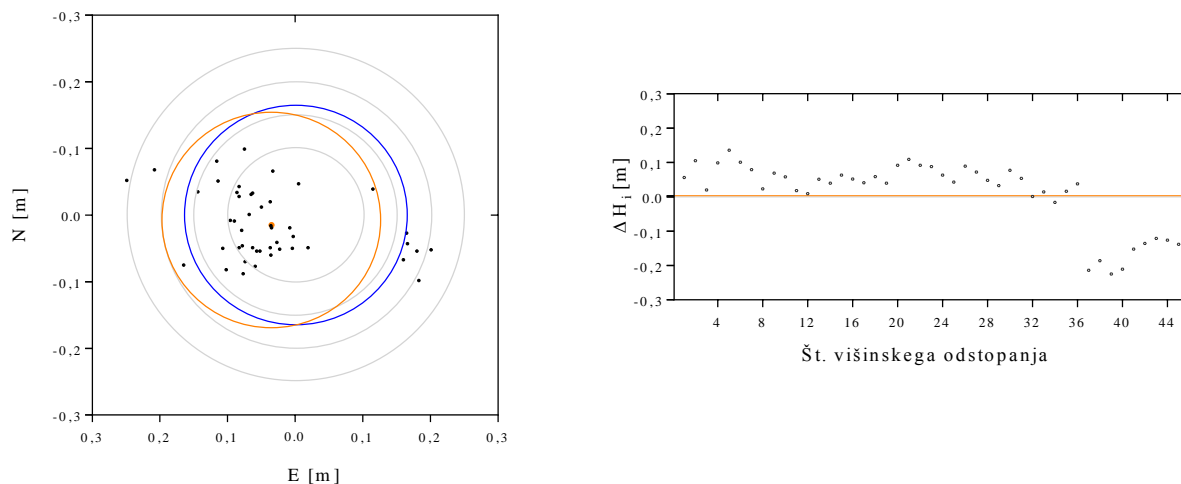
uporabimo kot enega od kriterijev validacije rezultatov položaja toplovodnega omrežja. Uradni položaj predmetnega toplovoda se po podatkih upravljalškega katastra energetskega upravljavca Energetika Celje, d. d., ne ujema oziroma prostorsko ne odgovarja položaju širine krpanja asfaltne površine pri rekonstrukciji. Pri prikazu položaja uradno veljavnih podatkov in podatkov, pridobljenih po predlaganem georadarskem modelu, ugotovimo položajno ujemanje krpane asfaltne zmesi in GPR-meritev, kot to prikazuje slika 142.



Slika 142: Prikaz ujemanja krpane asfaltne zmesi pri obnovi GI, GPR-meritev in uradno veljavnih podatkov o GI.

Figure 142: Presentation of matching of mended asphalt in utilities infrastructure renovation, GPR measurements and official data on the utilities infrastructure.

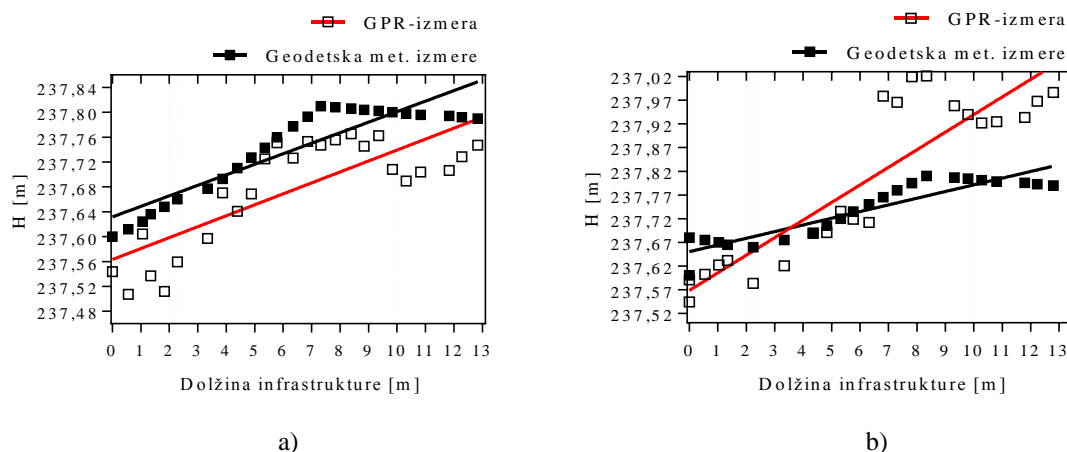
Oceno točnosti položaja in višine smo izvedli s primerjavo 46 (n) pripadajočih referenčnih točk (glej razdelek 5.1.2 in 5.1.3) izbrane GI, kot prikazuje slika 143.



Slika 143: Prikaz položajnih in višinskih odstopanj temenskih točk v izbranem realnem urbanem okolju. Krogi (sive barve) označujejo položajna odstopanja 0,10 m, 0,15 m, 0,20 m in 0,25 m; 0,114 m – položajni RMSE (moder krog), 0,111 m – položajni σ_p (oranžen krog), težišče vektorjev odstopanj (oranžna točka). Linija (oranžna) označuje centralno tendenco višinskih odstopanj $\mu_{(\Delta H)} = 0,003$ m.

Figure 143: Position and height differences of apex points in selected urban environment. Circles (grey colour) mark position differences 0.10 m, 0.15 m, 0.20 m and 0.25 m; 0.114 m – position RMSE (blue circle), 0.111 m – position σ_p (orange circle), the barycenter of vectors (orange point). The orange line marks central tendency of height differences $\mu_{(\Delta h)} = 0.003$ m.

Ocenjena položajna točnost georadarskih opazovanj za evidentiranje GI v testnem naravnem okolju II je 0,114 m (položajni (radialni) RMSE). Položajni (radialni) standardni odklon $\sigma_{(p)}$ = 0,111 m, težišče vektorjev odstopanj leži 0,038 m iz izhodišča v smeri jugozahoda. Ocenjena višinska točnost znaša 0,100 m, medtem ko je $\sigma_{(\Delta H)}$ enak 0,103 m in centralna tendenca višinskih odstopanj $\mu_{(\Delta H)}$ = 0,003 m. Centralna tendenca izraža višinski premik ciljnega objekta glede na referenčne višine. Kaže se zelo dobra ocena hitrosti širjenja EMV s kombinacijo metod ujemanja hiperbol in določevanja hitrosti po plasteh voziščne konstrukcije. Praga 3-RMSE ni preseglo nobeno položajno in višinsko odstopanje. Kot prikazuje slika 144, smo za cenilko točnosti naklona s predlaganim modelom georadarskih opazovanj uporabili $RMSE_{\Delta H}$, ki znaša $1^{\circ} 21' 06''$ naklonskega kota (glej razdelek 5.1.4).

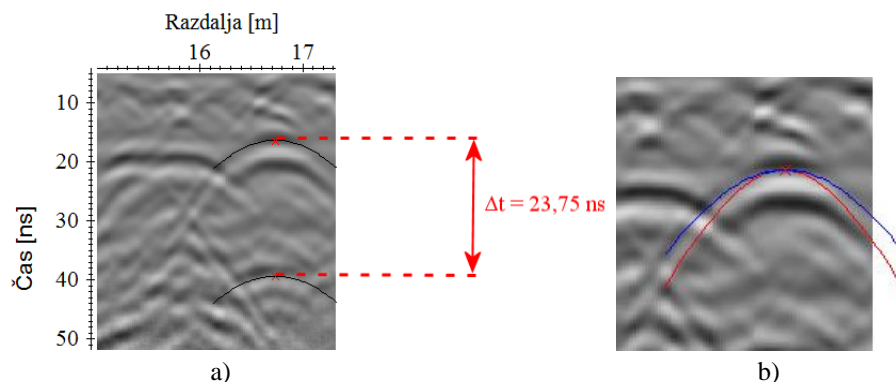


Slika 144: Prikaz referenčnega naklona (črna premica) in pridobljenega s predlaganim georadarskim modelom (rdeča premica): a) Črna premica: 1,7 % naklon, $r^2 = 0,82$; rdeča premica: 1,7 % naklon, $r^2 = 0,64$ vodovodne cevi DN/OD 200 ($RMSE_{\Delta H} = 0,072$ m, $\mu_{\Delta H} = 0,063$ m, $\sigma_{\Delta H} = 0,032$ m, $RMSE_{pol} = 0,048$ m, $\sigma_{pol} = 0,05$ m); b) Črna premica: 1,3 % naklon, $r^2 = 0,84$; rdeča premica: 3,6 % naklon, $r^2 = 0,76$, plinovodne cevi DN/OD 63 ($RMSE_{\Delta H} = 0,128$ m, $\mu_{\Delta H} = -0,058$ m, $\sigma_{\Delta H} = 0,113$ m, $RMSE_{pol} = 0,116$ m, $\sigma_{pol} = 0,152$ m).

Figure 144: Inclinations of reference (black line) and proposed GPR model (red line): a) Black line: 1.7% inclination, $r^2 = 0.82$; red line: 1.7% inclination, $r^2 = 0.64$ water supply pipes DN/OD 200 ($RMSE_{\Delta H} = 0.072$ m, $\mu_{\Delta H} = 0.063$ m, $\sigma_{\Delta H} = 0.032$ m, $RMSE_{pol} = 0.048$ m, $\sigma_{pol} = 0.05$ m); b) Black line: 1.3% inclination, $r^2 = 0.84$; red line: 3.6% inclination, $r^2 = 0.76$ gas pipe DN/OD 63 ($RMSE_{\Delta H} = 0.128$ m, $\mu_{\Delta H} = -0.058$ m, $\sigma_{\Delta H} = 0.113$ m, $RMSE_{pol} = 0.116$ m, $\sigma_{pol} = 0.152$ m).

Pri ocenjevanju dimenzij cilindričnih objektov smo v kombinaciji uporabili metodi hitrosti širjenja EMV v cevi in ujemanja referenčne refleksijske hiperbole in prilagajanja polmera cilindričnega objekta (glej razdelek 4.21). Slika 145a prikazuje metodo hitrosti širjenja EMV v cevi, ki se je v praksi kot uporabna izkazala le v redkih primerih. Uporaba metode je odvisna od različnih danosti, kot so polnila cevi, količina polnila in materiala cevi. V primeru praznih cevi je določevanje odbojev dna cevi oteženo, ker ti nastopajo izredno hitro. Razlika med refleksijo vrha in dna cevi premera 110 mm brez polnila je predstavljena z dvojnimi časom potovanja EMV v cevi, ki znaša 0,73 m/ns. Zaradi bližine je refleksije težko ločiti. Podajamo primer izbora najboljšega ujemanja dejanskega in ocenjenega premera Tesal vodovodne cevi, radargrama 14. profila, 400 MHz antene. Dvojni čas potovanja EMV v vodovodni cevi, kjer je odboj od dna cevi zakasnjjen glede na teme oziroma obod, znaša 23,75 ns. Ob predpostavki relativne dielektričnosti vode 80 in posledične hitrosti širjenja EMV v vodi 0,033 m/ns izračunamo premer cevi 398 mm. Slika 145b prikazuje metodo ujemanja refleksijske hiperbole ob izbrani referenčni hiperboli (rdeča barva) točkovnega objekta v posteljnici voziščne konstrukcije (0,102 m/ns) in prileganje oziroma spreminjanje njene geometrije ob spremembi premera

ciljnega objekta za 0,381 m (modra hiperbola). Ob tem je treba opozoriti, da lahko v nekaterih primerih precenimo premer infrastrukture pri radarskih profilih, ki ne sekajo infrastrukturnega voda pod kotom 90° . Na podlagi pridobljenih premerov smo izračunali centralne tendence (ocenjen DN/OD), absolutne in relativne napake poznani GI, ki so prikazani v preglednici 27. Cenilka točnosti RMSE znaša 19,5 mm, centralna tendenca relativne napake 14,4 %.



Slika 145: Določevanje premera vodovodne cevi (Tesal) na radargramu 14. profila 400 MHz antene: a) Metoda hitrosti širjenja EMV v cevi (refleksija vrha – 16,04 ns, refleksija dna – 39,79 ns, dvojni čas potovanja EMV v cevi – $\Delta t = 23,75$ ns); b) Metoda ujemanja referenčne refleksijske hiperbole ob spreminjanju polmera cilindričnega objekta (hitrost 0,102 m/ns, točkovna referenčna refleksijska hiperbola (rdeča), spremenjena geometrija referenčne hiperbole (modra)).

Figure 145: Defining diameter of water supply pipe (Tesal) on radargram of profile 14 of 400 MHz antenna using both methods. Method of velocity of EMW propagation in the pipe (reflection of the top – 16.04 ns, reflection of the bottom – 39.79 ns, two way time of EMW passing through the pipe – $\Delta t = 23.75$ ns); b) Matching reference reflection of hyperbola by changing the radius of cylindrical object (velocity 0.102 m/ns, point reference reflection hyperbola (red), changed geometry of reference hyperbola (blue)).

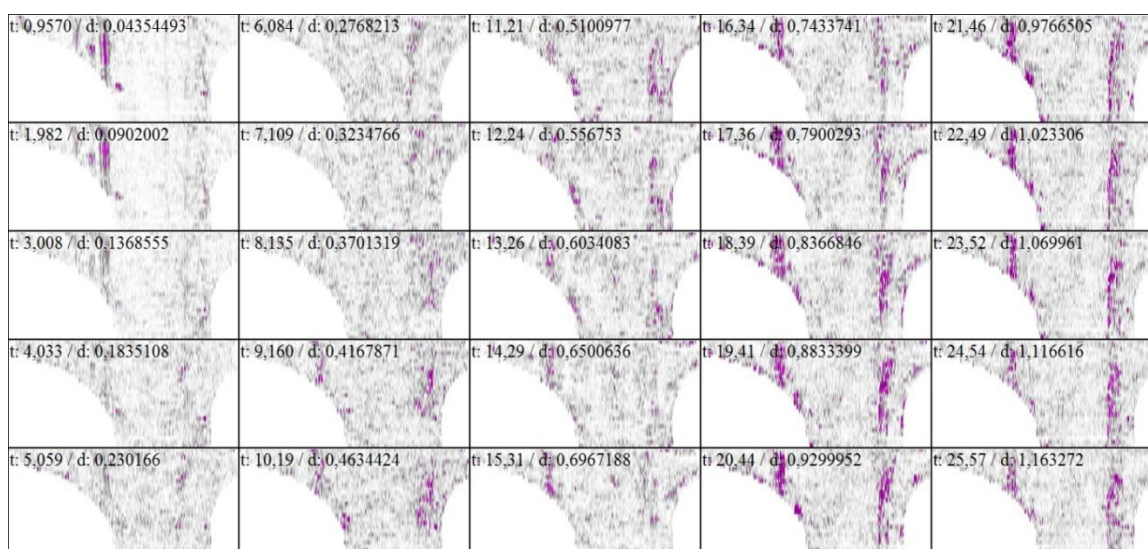
Preglednica 27: Absolutna in relativna odstopanja premerov v kombinaciji obeh metod (ujemanje referenčne hiperbole (prilagajanje polmera ciljnega objekta) in hitrosti širjenja EMV v cevi).

Table 27: Absolute and relative radius deviations, both methods combined; the reference hyperbola matching (adjusting target object radius) and velocity propagation of EMW in the pipe.

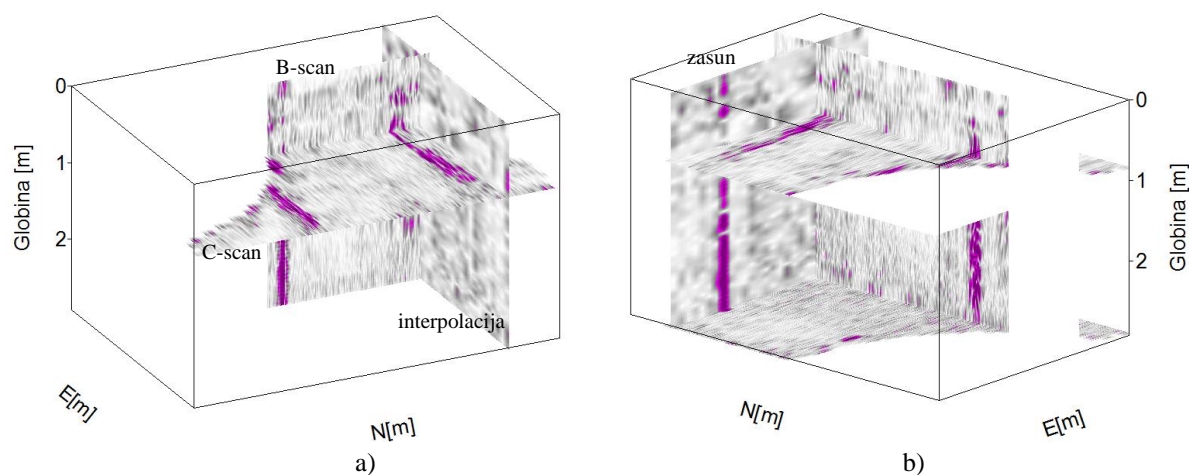
Tip infrastrukture	Material	Dejanski DN/OD [mm]	Ocenjen DN/OD [mm]	$ \Delta R $ [mm]	$ \Delta R_{rel} $ [%]
Vodovodna cev	Tesal	400	376	24	6,0
Met. kanal. cev I	PP	/	220	/	/
Cev kableske kanal. I	PVC	110	98	12	10,9
Vodovodna cev	LŽ	200	179	21	10,5
Plinovodna cev	PVC	63	51	12	19,0
Met. kanal. cev I	PP	/	201	/	/
Cev kableske kanal. II Signalni kabel vodovod	PVC	/	80	/	/
Toplovod	LŽ	273	202	71	25,8
Cev kableske kanal. II	PVC	/	138	/	/

Pred 3D-vizualizacijo v treh pravokotnih ravninah N, E in H smo obdelanim in migriranim radargramom vseh profilov izračunali ovojnice s Hilbertovo transformacijo, kjer so boljše vidni

prostorski odnosi med izbranimi ciljnim objekti. Slika 146 prikazuje globinske časovne reze (angl. C-scan), ki pri identičnem dvojnem času običajno vzporednih in enako oddaljenih radargramih prikazujejo interpolirano vrednost celotne površine (glej razdelek 2.9). Ob poznavanju hitrosti širjenja EMV v mediju in opravljeni topografski korekciji lahko časovnim globinskim rezom pripišemo značilnosti horizontalnih rezov. Levo zgoraj so dobro vidne razpoke asfaltne zmesi zgornje plasti voziščne konstrukcije na plitvih horizontalnih rezih in njihovo multipliciranje do globine 0,23 m. Na globini 0,74 m je zaznati prve odboje rekonstruiranega vodovodnega omrežja (LŽ 200) in signalnega voda (PVC 110), ki se globlje okrepijo zaradi naklona cevi ter multipliciranja refleksijskih. Že pred to globino je zaznati prve refleksije meteorne kanalizacije. Podobno so izrazito dobro vidne refleksije toplovodnega omrežja (LŽ 250) na globini 0,65 m in njihove multiplikacije v nadaljevanju.



Slika 146: Prikaz horizontalnih prerezov testnega območja II.
Figure 146: Presentation of selected depth slices of testing area II.



Slika 147: Prikaz prostorskih prerezov v D48/GK koordinatnem sistemu: a) Radargram (B-scan) 6. profila v smeri E [m], interpoliran prerez v smeri N [m] in horizontalni rez (C-scan); b) Izrazita multiplicirana refleksija vodovodnega zasuna na radargramu 5. profila v smeri E [m].

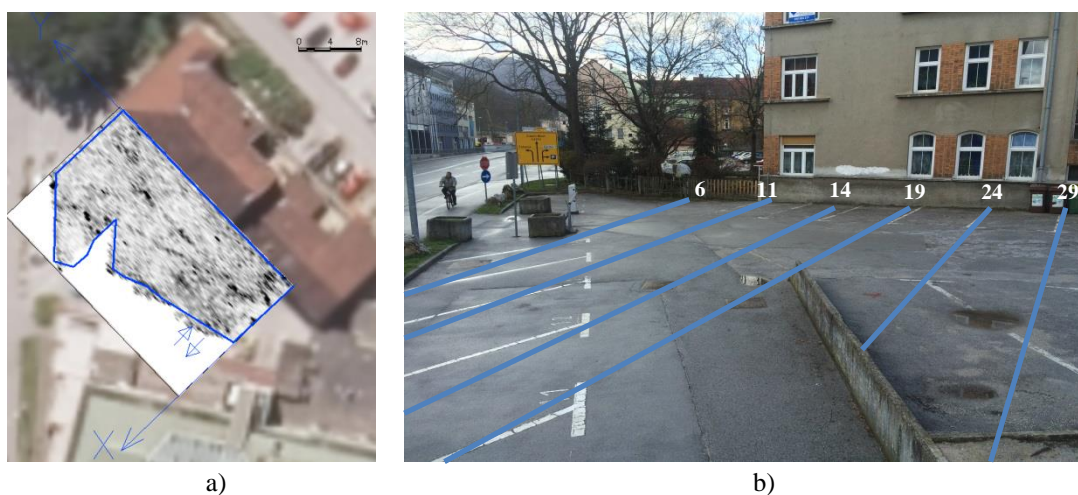
Figure 147: Presentation of spatial sections in D48/GK coordinate system: a) GPR sections (B-scan) of profile 6 in the direction E[m], interpolated section in the direction N[m] and depth section (C-scan). b) Featured multiplied reflections of the water supply valve on the radargram of profile 5 in the direction E[m].

Slika 147 prikazuje vzporedni radargram (angl. B-scan) 6. profila v smeri E [m], interpoliran prerez v smeri N [m] in horizontalni rez (angl. C-scan) na globini 0,80 m, kjer so izrazito dobro vidne multiplicitarne refleksije toplovodnega in rekonstruiranega vodovodnega omrežja v D48/GK koordinatnem sistemu. Površinski objekti, kot so zasuni, pokrovi jaškov, železne rešetke odvodnjavanja, pomenijo oteževalne okoliščine pri interpretaciji globinskih ciljnih objektov. Njihove refleksije v površinskih plasteh se multiplicitirajo v globino, kjer nam lahko zakrijejo pomembne informacije. Na radargramu 5. profila v smeri E [m] je jasno zaznati multiplicitirano refleksijo železnega vodovodnega zasuna, ki nam pri interpretaciji podatkov predstavlja oteževalno okoliščino.

6.3 Testno območje III

V okviru arheoloških raziskav na območju centra Celja med Cankarjevo, Stanetovo, Levstikovo in Aškerčevo ulico, v Smernicah za načrtovanje občinskega podrobnega načrta, imenovano tudi Kare 9, je bil v preteklosti opravljen niz georadarskih meritev v okviru geofizikalnih raziskav. Namen raziskave je bil kartiranje dielektrično kontrastnih podpovršinskih oblik, ki bi jih lahko opredelili kot rimske in/ali srednjeveške arhitekturne ostanke, s čimer je bilo pomembno dopolnjeno poznavanje arheološkega potenciala območja. Okvirno je bila raziskovana površina približno 15.000 m².

Kot tretje testno območje, kjer smo preizkusili samo model obdelave georadarskih podatkov za potrebe odkrivanja GI (glej razdelek 5), smo izbrali podobmočje KV8 znotraj območja Kare 9 (glej sliko 148). Namen izbire območja je, da prikažemo uporabnost predlaganega modela v fazi same obdelave in ne v preizkusu njegove skladnosti z evidentirano GI. Za namen arheoloških geofizikalnih meritev je bila takrat na terenu razvita lokalna ortogonalna mreža, ki je vsaj delno omogočala izvedbo izmere s pomočjo vzporednih profilov.



Slika 148: a) Prostorsko območje zajema v lokalnem koordinatnem sistemu z označenima smerema (modre puščice) georadarskih opazovanj; b) Prikaz izbrane serije radargramov vzporednih georadarskih profilov: 6, 11, 14, 19, 24 in 29 v lokalnem koordinatnem sistemu.

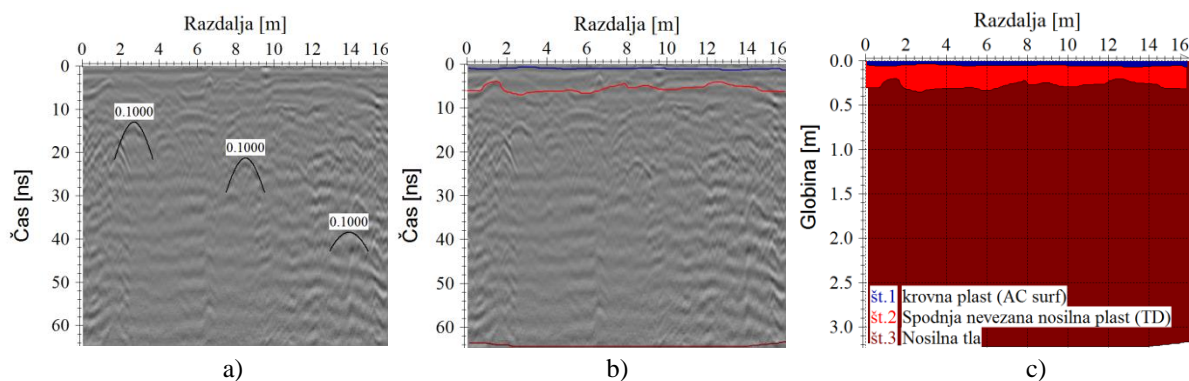
Figure 148: a) Spatial area of capture in local coordinate system with marked directions of GPR monitoring (blue arrows); b) Presentation of a series of GPR profiles 6, 11, 14, 19, 24 in 29 in local coordinate system.

Prostorsko geofizikalnih meritev naknadno ni bilo več mogoče povezati z referenčnim državnim koordinatnim sistemom, s čimer bi pridobili vpoglede v prostorske odnose in skladnost odkrite infrastrukture z evidentirano GI. Podobmočje KV8 leži na stičišču Levstikove in Aškerčeve ulice, med

trgovskim centrom na severu in večstanovanjskim poslopjem na jugu ter obsega površino 650 m² (glej sliko 148). Pri izvajanju geofizikalnih meritev je bil od celotnega sestava in opreme, opisane v razdelku, uporabljen le georadarski sistem SIR (GSSI) – 3000 ter 400 MHz monostatična antena z merilnim kolesom, s katerim je bila zagotovljena domena proženja signala v odvisnosti od dolžine. Izmerjenih je bilo 58 vzporednih profilov z medsebojno oddaljenostjo med posameznimi georadarskimi profili $\approx 0,5$ m. Meritve so bile izvedene na ravni asfaltni površini z majhnim naklonom ob hitrosti premikanja ≈ 1 m/s. Dolžine profilov so znašale od 13,5 do 24,2 m. Sestava in debelina plasti konstrukcije parkirno/pohodnih površin ni bila znana.

6.3.1 Obdelava radargramov

Obdelave nismo posebej prilagajali zahtevam testnega okolja, uporabljeni so bili parametri obdelave, opredeljeni v modelu za 400 MHz anteno. Začetek je vseboval izračun in popravek ničelnega časa (4,80 ns), odstranitev zamika signala (55–65 ns) in filter odstranitve ozadja. Uporabljena sta bila ročna korekcija amplitude (0–32 dB) in frekvenčno pasovnoprepustno filtriranje koničastega kosinusnega okna (220/330/570/770 MHz). Z lateralnimi refleksijami plasti voziščne konstrukcije, z metodo izbiranja (glej razdelek 4.22), je bila določena povprečna debelina plasti obravnavanega območja (glej sliko 149). S povprečenjem vseh profilskih ocenjenih debelin plasti se debelina krovne plasti (AC surf) ocenjuje na 5,6 cm in spodnje nevezane nosilne plasti tamponskega drobljenca na 19,6 cm, kar kaže na uporabnost metode tudi pri določevanju debelin voziščnih konstrukcij v realnih okoljih. Na testnem območju je bila kot osnova za oceno hitrosti širjenja EMV uporabljena metoda ujemanja hiperbol, kar je služilo kot prvi približek ocenjeni povprečni hitrosti širjenja EMV izbranega testnega območja in znaša 0,1 m/ns. Posledično so, verjetno zaradi podcenjene hitrosti širjenja EMV, določene na podlagi refleksij v nosilnih tleh, podcenjene globine odkrite GI. Kljub izredno majhnim naklonom je bila izvedena topografska korekcija.

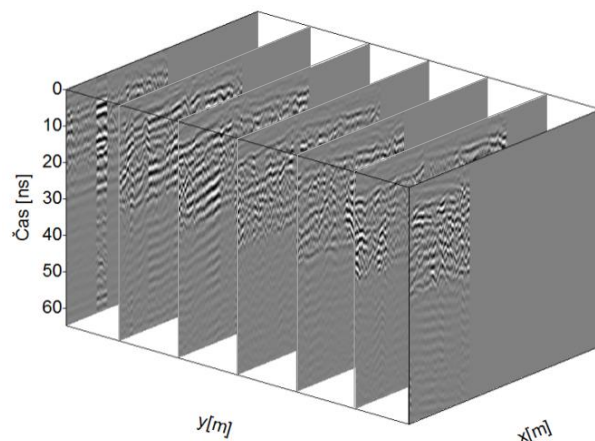


Slika 149: Delno obdelan radargram 5. profila 400 MHz antene: a) Prikaz uporabljene metode ujemanja hiperbol za oceno hitrosti širjenja EMV; b) Ocena hitrosti širjenja EMV z metodo določevanja hitrosti po plasteh voziščne konstrukcije; c) Prikaz debeline plasti (5,1 cm – modra, 20,6 – rdeča) po metodi izbiranja lateralnih refleksij.

Figure 149: Partially processed radargram of 5th profile using 400 MHz antenna; a) Method of hyperbola adjustment applied for the estimation of EMW propagation velocity; b) Estimation of velocity of EMW propagation based on velocity determination by layers of the pavement structure; c) Presentation of layer thickness (5,1 cm – blue, 20,6 – red) by the lateral reflection selection.

Postopek odstranitve povprečja signala (glej razdelek 4.14) je povsem zadovoljivo ublažil izrazite horizontalne refleksije, zaradi česar v nadaljevanju ni bil uporabljen f-k-filter, ampak se je takoj

pristopilo k ročnemu izbiranju ciljnih objektov oziroma prepoznavni analizi. Pred 3D-vizualizacijo in prikazom prostorskih prerezov, prikazanih na sliki 150 se je pristopilo k izračunu ovojnice s Hilbertovo transformacijo.

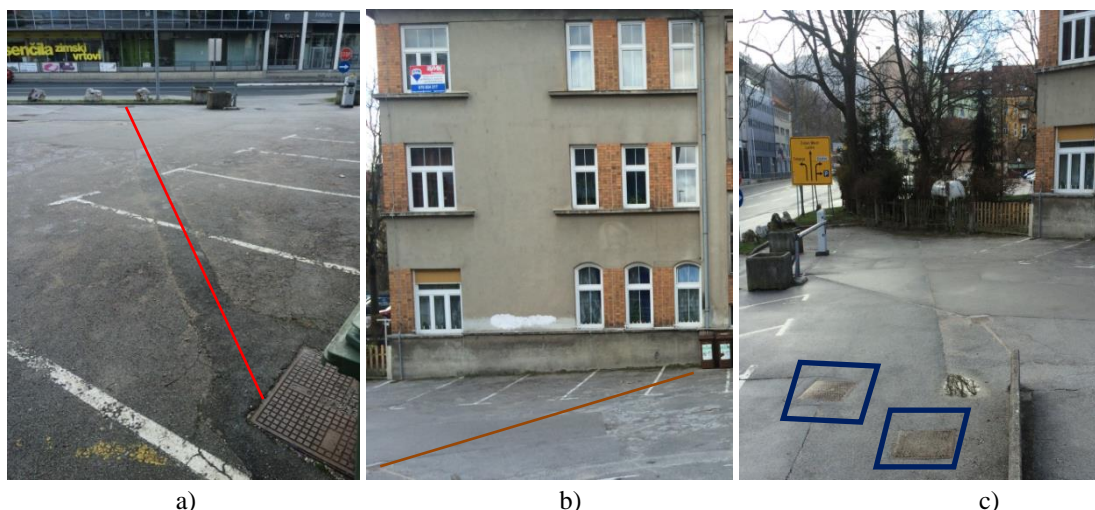


Slika 150: Prikaz prostorskih prerezov preiskovane prostornine tal (serija vzporednih georadarskih profilov: 1, 10, 20, 30, 40, 50 in 58) v lokalnem koordinatnem sistemu.

Figure 150: Presentation of sections of monitored volume of the ground (series of parallel GPR profiles: 1, 10, 20, 30, 40, 50 and 58) in local coordinate system.

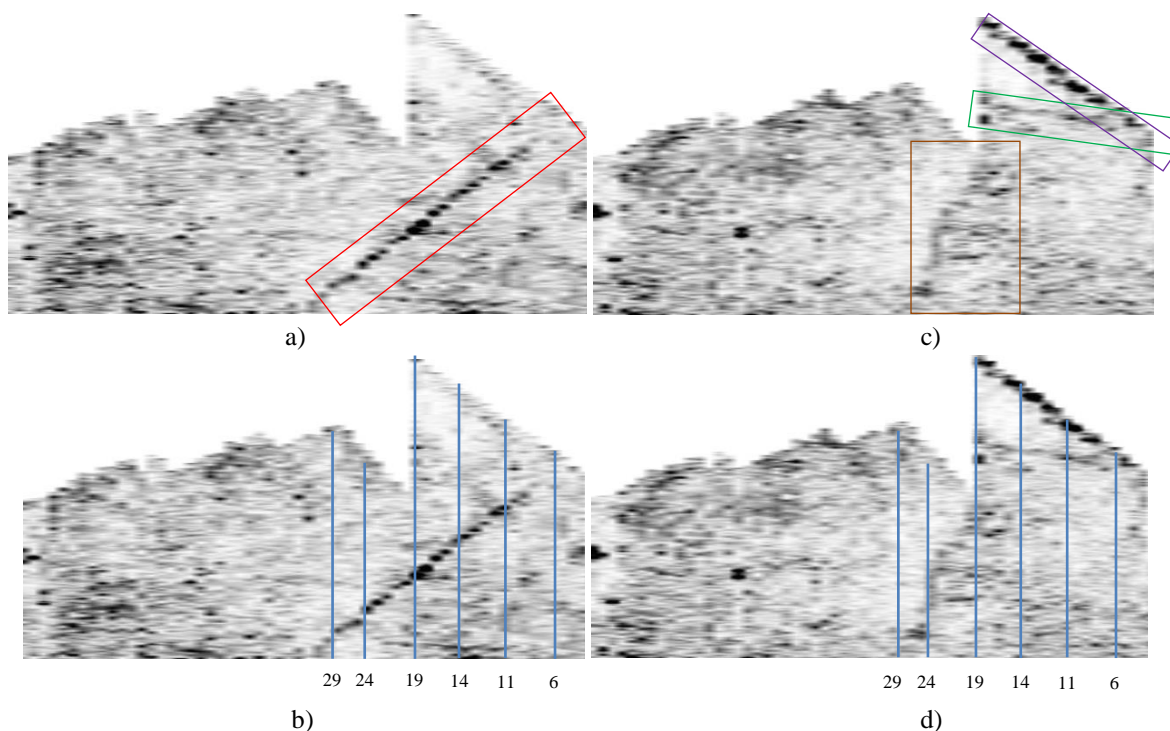
6.3.2 Rezultati in diskusija

3D-vizualizacija nam omogoča vpogled v prostorske odnose in ob ocenjeni hitrosti (glej razdelek 6.3.1) prikaz časovnih rezov na izbranih globinah. Vidno je precej odbojev, ki bi lahko predstavljali GI, v nadaljevanju prikazujemo najizrazitejše. Na globini 0,61 m se precej izrazito pojavijo cilindrične refleksije v obliki hiperbol, ki si kontinuirano sledijo čez celotno podobmočje, na slikah 152 in 153 so prikazane v rdečem kvadratu. Po evidentirani globini sklepamo, da gre za cevno kanalizacijo elektronskih komunikacij. Predpostavko podkrepimo s površinskim slikovnim materialom, ki jasno nakazuje začetek in konec odkrite GI, ki poteka od začetnega do končnega jaška elektronskih komunikacij v smeri zakrpane asfaltne zmesi, prikazane na sliki 151a. Na globini 0,92 m se precej izrazito pojavijo cilindrične refleksije, ki si kontinuirano sledijo na robnem delu podobmočja, na slikah 152 in 153 prikazane v vijoličastem kvadratu, in manj izrazite refleksije, ki so na slikah 152 in 153 prikazane v rjavem in zelenem kvadratu. Zaradi podobnih predpostavk povezav med jaški elektronskih komunikacij predvidevamo, da predstavlja GI na slikah 152 in 153, označena z vijoličasto barvo, elektronske komunikacije. Pri GI v rjavem kvadratu lahko z veliko verjetnostjo trdimo, da gre za meteorno kanalizacijo oziroma vodo, ki se odvaja iz strešnega žleba do bližnjega meteornege jaška, kot to prikazuje slika 151b, in sicer zaradi podobnih predpostavk. Zaradi precejšnjega nihanja v višini oziroma globini sklepamo, da predstavlja infrastruktura, prikazana na slikah 152 in 153 in označena z zeleno barvo, vod oziroma kabel. Predvidevamo, da gre znova za elektronske komunikacije zaradi bližine jaškov, in ker bi v primeru električnega voda bili odboji oziroma hiperbole precej bolj izrazite. Slika 151c prikazuje dva jaška elektronskih komunikacij, ki sta izrazito dobro vidna tudi na profilih radargramov števil 19 in 14, prikazanih na sliki 153.



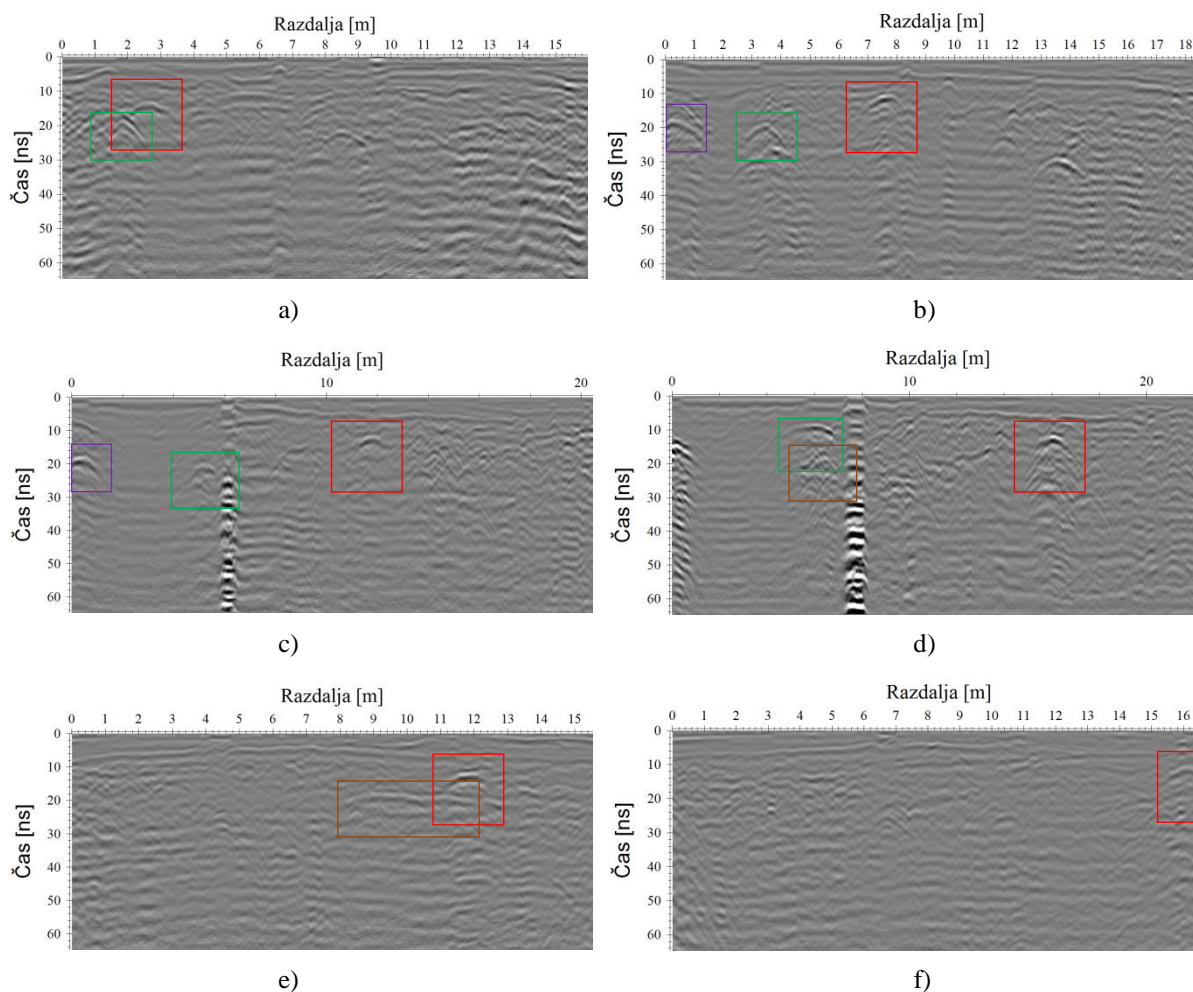
Slika 151: a) Prikaz jaška elektronskih komunikacij in krpana asfaltna zmes v smeri odkrite GI na globini 0,61 m; b) Prikaz predvidene povezave na podlagi georadarskih podatkov jaška meteorne kanalizacije in žleba; c) Prikaz dveh jaškov elektronskih komunikacij.

Figure 151: a) Presentation of electronic communications duct and mended asphalt in the utilities infrastructure at the depth of 0.61 m; b) Envisaged connection based on GPR data of duct for rainwater drainage and gutter; c) Two electronic communications ducts.



Slika 152: Prikaz časovnih rezov in profilov: a) Globina 0,61 m (označene refleksije cilindričnega objekta – rdeč kvadrat); b) Prikaz točkovnih refleksij na globini 0,61 m z označenimi št. profilov iz slike 148; c) Globina 0,92 m (označene refleksije cilindričnih objektov – rjav, zelen in vijoličasti kvadrat); d) Prikaz točkovnih refleksij na globini 0,92 m z označenimi št. profilov iz slike 148).

Figure 152: Presentation of depth slices and profiles: a) Depth of 0.61 m (marked reflections of cylindrical objects – red square); b) Numbers of profiles of selected radargrams of point reflections (see figure 148); c) Depth of 0.92 m (marked reflections of cylindrical objects - brown, green and purple square); d) Numbers of selected radargrams of the point reflections (see figure 148).



Slika 153: Vidne refleksije v obliki hiperbol radargramov georadarskih profilov 400 MHz antene (barva posameznega kvadrata predstavlja cilindrični objekt iste barve kvadrata na časovnem rezu): a) Radargram 6. profila; b) Radargram 11. profila; c) Radargram 14. profila (vidna refleksija jaška); d) Radargram 19. profila (vidna refleksija jaška); e) Radargram 24. profila (rjavi kvadrat – lateralna refleksija, posledica merjena vzdolž cilindričnega objekta); f) Radargram 29. profila.

Figure 153: Visible reflections in the shape of hyperboles of radargrams of 400 MHz antenna profiles (the colour of individual square shows cylindrical object of the same colour of the square on the depth slices); a) Radargram of profile 6; b) Radargram of profile 11; c) Radargram of profile 14; d) Radargram of profile 19; e) Radargram of profile 24; f) Radargram of profile 29.

Predlagan georadarski model obdelave (faza 3 – glej poglavje 5), preizkušen v tem delu doktorske disertacije, nam ob dobrih pogojih in vestni ter nadzorovani uporabi daje jasne vpoglede v podpovršje in s tem prostorske odnose GI, kar smo delno potrdili tudi s pričujočim tesnim območjem III.

6.4 Pregled in diskusija rezultatov testnih območij

Pri pregledu rezultatov smo se osredotočili predvsem na testni območji I in II, medtem ko je testno območje III uporabljeno zgolj v namene preizkusa predlaganega modela v fazi obdelave radargramov in ne v preizkusu njegove skladnosti z obstoječo evidentirano GI.

Danes je zelo težko pridobiti objavljeno znanstvenoraziskovalno ter strokovno literaturo s področja testiranja zmogljivosti ter položajne in višinske točnosti georadarske metode v urbanem okolju. Poznano nam je le eno delo, ki se dotika georadarske metode odkrivanja podzemne GI in ocene njene zmogljivosti in točnosti. Cheng et al. (2013) navajajo meritve z 270 MHz in 400 MHz anteno z umerjenim merilnim kolesom na povsem horizontalnem ravninskem reliefu treh izbranih resničnih testnih urbanih območij. Vse razdalje, izmerjene z merilnim kolesom georadarja, so bile naknadno umerjene na znane razdalje predhodno vzpostavljene ortogonalne mreže. V naknadni obdelavi podatkov se kljub nelinearnemu predpostavi strogo linearno gibanje od začetne do končne točke profila. Metode izmere in njene natančnosti referenčnih položajev cevi in ortogonalne mreže ne navajajo. Radargrami so obdelani s postopki popravka ničelnega časa, nizkoprepustnim filtrom s končnim impulznim odzivom FIR (angl. finite impulse response), visokoprepustnim filtrom z neskončnim impulznim odzivom IIR (angl. infinite impulse response), dekonvolucijo, migracijo in postopki ojačitve signala. Metoda določevanja hitrosti EMV in uporabljena metoda izbiranja objektov v mediju nista navedeni. Povprečna položajna točnost 400 MHz antene treh zaznanih cevi, podana z radialnim RMSE, znaša 33,5 cm, medtem ko povprečna višinska točnost treh zaznanih cevi in enega električnega kabla znaša 61,3 cm, podana z višinskim RMSE.

Prednosti predlaganega modela za evidentiranje GI, razvitega v tej disertaciji, v smislu kinematičnega zajema podatkov z geodetskimi metodami, ocenjevanja latence in povezovanja georadarskih in geodetskih nizov podatkov glede na vzpostavljanje ortogonalnih mrež, so predstavljene že v razdelku (5.3) in veljajo tudi za primere v realnem okolju. Z uporabo f-k-filtrov, topografske korekcije, uporabo Hilbertove transformacije, vpeljavo metode določevanja hitrosti EMV po plasteh, metod za oceno dimenzij ciljnih objektov in 3D-vizualizacije je predlagani model zagotovo močnejše orodje v fazi obdelave ter interpretacije podatkov od predstavljene obdelave v Cheng et al. (2013). Boljšo položajno točnost prepoznane GI v realnem okolju s predlaganim modelom lahko pripišemo celotnemu sklopu izboljšav, predstavljenih v poglavju 5.

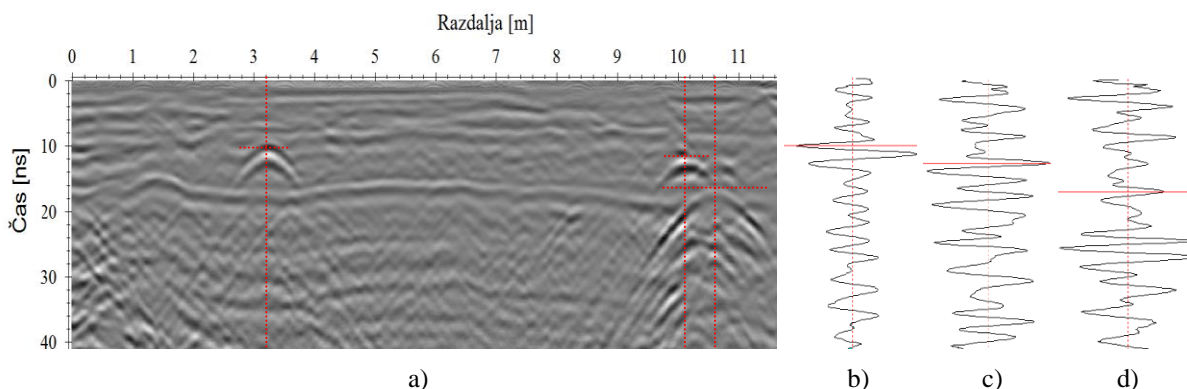
Položajna točnost 14,60 cm in 11,15 cm ter višinska točnost 13,41 cm in 10,15 cm, podana z radialnim in višinskim RMSE, je na obeh testnih območjih podobna. Praga $3 \cdot \text{RMSE}$ ni preseglo nobeno položajno in višinsko odstopanje. Zaradi oteževalnih okoliščin testnega območja I v smislu prisotne vlage in podtalne vode je slabša položajna in višinska točnost pričakovana. Predvsem pa je prisotnost vlage vplivala na zmanjšano prepoznavnost prisotnih ciljnih objektov in globinski doseg georadarskih opazovanj. Od devetih predhodno evidentiranih ciljnih objektov GI sta prepoznana in evidentirana le dva v plitvih delih testnega območja I, kar priča o omejenosti georadarske metode. Na testnem območju II so prepoznani vsi predhodno evidentirani ciljni objekti ter dodatno še dva objekta meteorne kanalizacije. V testnem območju III ne posedujemo referenčnih podatkov oziroma ti niso na voljo. S predlaganim modelom smo prepoznali kanalizacijske cevi elektronskih komunikacij, kabel elektronskih komunikacij in meteorno kanalizacijo.

Relativno odstopanje polmerov ΔR_{rel} v kombinaciji obeh metod ujemanja referenčne hiperbole in hitrosti širjenja EMV v cevi znaša za šest cevi, od tega pet na testnem območju II in ene na testnem območju I, 13,2 %. Točnost naklona s predlaganim modelom znaša $1^\circ 21' 06''$ naklonskega kota v primeru testnega okolja II in $0^\circ 30' 08''$ v primeru testnega okolja I, podanega z naklonskim $\text{RMSE}_{\Delta n}$. V testnem okolju II sta upoštevani le vodovodna in plinska cev, za kateri predvidevamo, da imata nedvoumno podani višini temenskih točk.

Predlagani model nam deloma omogoča odkrivanje vrste materiala in tipa podzemne GI. Ker odkrivanje materiala podzemne GI ni bil primarni cilj te doktorske disertacije, smo predlagani model

testno preizkusili le na testnem območju I in II. Področje odkrivanja materialov je precej neraziskano ter posledično slabo razvito, odločitve pa pogosto slonijo na subjektivni presoji raziskovalca. Kot podlaga za oceno so nam v pomoč oblike refleksijskih hiperbol, negativni ali pozitivni vrhovi refleksijskih sledi ter vrednosti amplitud (glej razdelek 2.6.3).

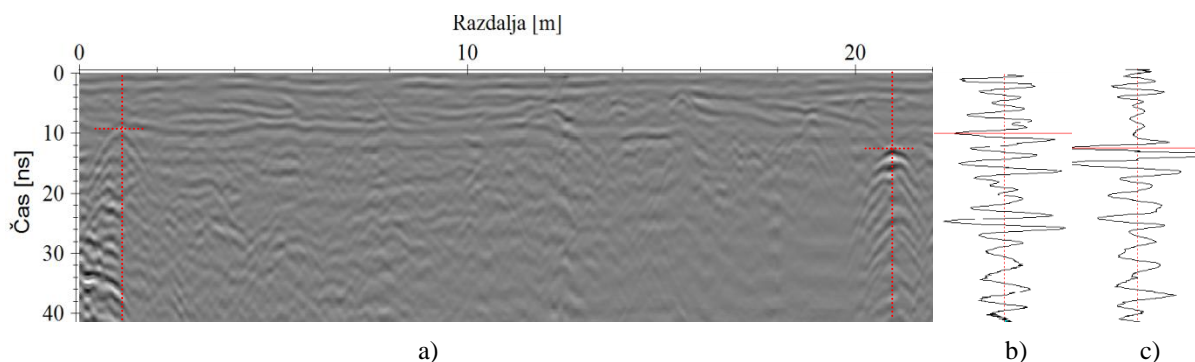
Slika 154a prikazuje delno obdelan radargram 4. profila 400 MHz antene testnega območja II z označenimi refleksijskimi hiperbolami. Iz leve proti desni si sledijo polipropilenska cev meteorne kanalizacije, polivinilkloridna cev kabelske kanalizacije, v kateri je signalni kabel, in litoželezna vodovodna cev. V nadaljevanju so prikazane spremembe amplitude pripadajočim cevem oziroma hiperbolam vzdolž 163. sledi, 508. sledi in 532. sledi. Iz slike 154b je razviden negativni prvi maksimalni vrh, ki pripada meteorni kanalizaciji, kar nakazuje že vrhnji temni segment hiperbole na radargramu. Iz pravila negativne refleksije sklepamo, da ima voziščna konstrukcija oziroma tamponski drobljenec TD 32, v katerem leži meteorna cev, višjo relativno dielektričnost. Ocena relativne dielektričnosti na podlagi hitrosti širjenja EMV tamponskega drobljenca TD 32 (glej razdelek 6.2) ter enačbe (30) znaša 8,1. Ob predpostavki, da bi imela betonska cev podobno ali višjo relativno dielektričnost, lahko trdimo, da gre za eno od PVC-, PP- ali PE-cevi, katerih relativne dielektričnosti so precej manjše (glej preglednico 1). Posledično lahko iz maksimalnega negativnega vrha trdimo, da meteorna cev ni zapolnjena s polnilom, npr. vodo. Trditvi lahko pritrdimo ob dejstvu, da smo meritve izvajali v suhem vremenu. Amplituda temenske refleksije je kljub izredno majhni globini manjša od amplitude cevi kabelske kanalizacije oziroma signalnega kabla, prikazane na sliki 154a. Iz analize oblike refleksijske hiperbole cevi kabelske kanalizacije oziroma signalnega kabla lahko sklepamo, da gre za cev manjšega premera. Vrhni svetli segment refleksijske hiperbole na radargramu nakazuje na pozitivni prvi maksimalni vrh, ter posledično sklepanje, da gre za cev ali kabel, kar potrjuje tudi visoka vrednost temenske amplitude na 508. sledi, in je razvidno iz slike 154c. Prisotne kovine povzročajo visoke vrednosti amplitude in ponavljajoče refleksije v nadaljevanju. Ponavljajoče refleksije so delno zakrite s tretjo refleksijsko hiperbolo, ki pripada vodovodni cevi. Iz slike 154d je mogoče razbrati znova pozitivni prvi maksimalni vrh ter svetli vrhnji segment refleksijske hiperbole na radargramu, ki sta posledica polnila (vode) in materiala, ki ima višjo relativno dielektričnost od zemljine, v kateri leži.



Slika 154: a) Delno obdelan radargram 4. profila 400 MHz antene testnega območja II z označenimi refleksijskimi hiperbolami (iz leve proti desni si sledijo meteorna kanalizacija, cev kabelske kanalizacije in vodovodna cev); Pripadajoče spremembe amplitud vzdolž: b) Sled 163; c) Sled 508; d) Sled 532.

Figure 154: a) Partially processed radargram of the 4th profile of 400 MHz antenna of testing area II with marked reflection hyperbolas. From left to right follow, rainwater drainage, cable duct pipes and water pipe; Corresponding changes of amplitudes along: b) 163. trace; c) 508. trace; d) 532. trace.

Slika 155a prikazuje delno obdelan radargram 6. profila 400 MHz antene testnega območja I z označenimi refleksijskimi hiperbolami. Iz leve proti desni si sledita cev meteorne kanalizacije in polivinilkloridna cev tehnološke kanalizacije. V nadaljevanju so prikazane spremembe amplitude pripadajočim cevem oziroma hiperbolam vzdolž 53. in 1049. sledi. Sliki 155b in 155c prikazujeta negativni prvi maksimalni vrh, ki pripada meteorni in tehnološki kanalizaciji. Podobno kot na sliki 154 na podlagi hitrosti širjenja EMV ocenimo relativno dielektričnost v zemljini, v kateri sta cevi, ki znaša 11,8. Na podlagi pravila negativne refleksije in predpostavke velike vlage, kjer bi tudi relativna dielektričnost betonske cevi zavzela visoko vrednost, lahko sklepamo, da gre za PVC-, PP- ali PE-cevi, katerih relativne dielektričnosti so precej manjše.



Slika 155: a) Delno obdelan radargram 6. profila 400 MHz antene testnega območja I z označenimi refleksijskimi hiperbolami (iz leve proti desni si sledita meteorna in tehnološka kanalizacijska cev); Pripadajoče spremembe amplitud vzdolž: b) Sled 53 in c) Sled 1049.

Figure 155: a) Partially processed radargram of the 6th profile 400 MHz antenna of testing area II with marked reflection hyperbolas. From left to right follow, rainwater drainage and technological sewage pipe. Corresponding changes of amplitudes along: b) 53. trace c) 1049. trace.

7 SKLEP

Eden od glavnih dosežkov te doktorske disertacije je, da smo s predlaganim povezovanjem nizov postopkov in algoritmov v model georadarskih opazovanj omogočili in dokazali, da je objekte gospodarske infrastrukture (GI) mogoče prepoznati in evidentirati s priporočeno oziroma zahtevano položajno in višinsko natančnostjo.

Dolgoletne praktične izkušnje iz širokega spektra vzpostavitve, vodenja in vzdrževanja zbirnega katastra gospodarske javne infrastrukture (ZKGJI) in dnevnega dela pri evidentiranju GI so nas vodile k razmišljanju o nujnosti uporabe nedestruktivnih metod evidentiranja. Na podlagi tega smo razvili in predstavili izvorni model nadgradnje georadarske opreme, povezovanja geodetskih in georadarskih opazovanj in nizov postopkov obdelave algoritmov ter interpretacije in vizualizacije rezultatov, s čimer smo dodali avtorski prispevek v mozaik raziskav na tem področju.

Testni bazeni, zgrajeni za potrebe te doktorske disertacije, so konstrukcijsko zelo dober približek voziščnih konstrukcij regionalnih in lokalnih cest ter pohodnih površin in ponujajo odlično okolje za ugotavljanje dometa in izdelavo optimalnega modela georadarskih opazovanj za odkrivanje vgrajene gospodarske infrastrukture ob nadzorovanih pogojih. Ob izdelavi modela se je izkazalo, da imajo bazeni manjše konstrukcijske napake v smislu prevelikega števila vgrajenih cevi in vodov. Zaradi horizontalne in vertikalne ločljivosti uporabljenih centralnih frekvenc georadarskih (GPR) anten bi bilo smiselno uporabiti cilindrične objekte večjih premerov. Težave nastopijo tudi zaradi betonskih sten bazenov, od katerih pri širjenju elektromagnetnega valovanja (EMV) nastanejo številne refleksije, ki precej prekrivajo dejanske refleksijske hiperbole ciljnih objektov.

V celotnem predlaganem modelu je pri prepoznavanju in identifikaciji GI ključna obdelava georadarskih podatkov oziroma radargramov. Analiza in obdelava pridobljenih bazenskih podatkov sta podali optimalno zaporedje postopkov pridobivanja, obdelav in uporabljenih parametrov. Predlagani model georadarskih opazovanj za odkrivanje GI nakazuje posebnosti v smislu analize hitrosti in določitve 2D-hitrostnega polja, odstranjevanja stenskih refleksij in ročnih ojačitev pri obdelavi radargramov. Analiza hitrosti širjenja EMV v voziščni konstrukciji je podala večplastni lateralni model. Od zgoraj navzdol si običajno do temeljnih tal sledijo površinsko visoko hitrostne plasti, obrabne/zaporne, vezane nosilne in nevezane nosilne plasti. Hitrostno polje s predlagano metodo določevanja hitrosti po plasteh v modelu daje boljše rezultate od metode ujemanja hiperbol v smislu določevanja višin ciljnih objektov, medtem ko si moramo v nosilnih tleh pomagati z metodo ujemanja hiperbol ali poznano globino enega od ciljnih objektov.

V tej disertaciji smo z laboratorijskimi merjenji relativne dielektričnosti in volumenskega deleža na Kemijskem inštitutu Ljubljana ter na Inštitutu za hmeljarstvo in pivovarstvo Slovenije opredelili točnost določevanja globin oziroma metode določitve hitrosti po plasteh. Odvisna je predvsem od poznavanja dejanskih debelin plasti voziščnih konstrukcij pri gradnji in doslednosti ter natančnosti pri določevanju njihovih linearnih refleksij na radargramih. Večji koren srednjega kvadratnega pogreška (RMSE) relativne dielektričnosti ter posredno globine je zaznati pri asfaltnih zmeseh, kar pripisujemo tanki plasti ter natančnosti določevanja laterne refleksije in posledično napaki pri določevanju dvojnih časov širjenja EMV v plasti.

Težavo stenskih refleksij nam je v modelu v določeni meri uspelo rešiti z uporabo f-k-filtra, ki ga predlagamo tudi v smislu odstranjevanja zračnih in neposrednih refleksij. V modelu smo preišljeno porabili več energije in predlagali uporabo ročne ojačitve signala pri obdelavi radargramov v

predlaganem modelu, ker si s tem olajšamo nadaljnjo interpretacijo ciljnih objektov in prihranimo marsikateri zaplet pri vizualizaciji. V testnih bazenih je sicer primerjava radargramov, posnetih z vsemi tremi antenami, podala dober vpogled v pod površje. Prostorska ločljivost in globinski doseg sta obratno sorazmerna, kar lahko predstavlja oviro v realnih urbanih okoljih. Večina GI je v globinah od 0,4 do 2,5 m, kjer predlagamo uporabo centralnih frekvenc GPR-anten od 900 do 400 MHz, ob danih dobrih pogojih v smislu strukture in fizikalnih lastnosti voziščnih konstrukcij in nosilnih tal, v katerem so. Zaradi večjega globinskega dosega in posledično slabše prostorske ločljivosti ter predpisanih globin vgradnje in manjših dimenzij vgrajene GI smo 270 MHz anteno, kot smo to predvideli že v uvodu, izključili iz obdelave. Predlagani model se je ob uporabi anten s centralnimi frekvencami 400 MHz in 900 MHz izkazal za uporabnega vsaj do globine 2,5 m, kjer je danes večina GI.

Vsi postopki v modelu so opredeljeni na empirični in iterativni način, kar je neizogibno za doseganje dobrih končnih rezultatov. Zaporedje posameznih korakov pri obdelavi podatkov ni točno določeno in je odvisno od georadarskih meritev, ki jih določajo fizikalne lastnosti medija, in ciljev, ki jih zasledujemo. V model so vpeljane tudi metode 3D-vizualizacije, ki omogočajo definiranje prostorskih odnosov ciljnih objektov in nazornejšo interpretacijo rezultatov.

Vsi postopki analiz kakovosti pridobljenih položajev (2D) in višin značilnih točk ciljnih objektov zahtevajo kakovostno določene referenčne koordinate točk, ki smo jih zagotovili z geodetsko terestrično metodo izmere, tj. z visokokakovostnimi postopki določitve koordinat. Pridobivanje položajnih in višinskih podatkov objektov GI s predlaganim modelom je omejeno na terestrično kinematično metodo izmere s pomočjo motoriziranega elektronskega tahimetra, ki omogoča samodejno prepoznavanje in sledenje reflektorja. Povezovanje geodetskih kinematičnih in georadarskih opazovanj je bilo omogočeno z nizom naših programskih rešitev, razvitih v sklopu te naloge. Prednosti in uporabo izbrane kinematične metode upravičujemo z dejstvom, da zahtevane položajne natančnosti ne izpolnjujejo enofrekvenčni GNSS-sprejemniki. Pri dvofrekvenčnih sprejemnikih so GNSS-metode izmere (RTK ali RTK-VRS) omejene zaradi interference georadarskih in GNSS-valovanj, omejenega sprejema signala in vpliva večpotja na opazovanja v urbanem okolju. Zaradi nedostopnosti instrumentov na trgu je bila uporaba metode RLPS (angl. Rotary Laser Positioning System) onemogočena.

V tej disertaciji smo uspešno predstavili in preverili oceno latence z uporabo preproste GPR-tehnike meritev tja in nazaj. Z uporabo matematično-statističnih metod korelacijskega koeficienta in srednje kvadratne napake (MSE) ter subjektivne metode smo določili ocenjeno latenco našega sestava pri uporabi 400 in 900 MHz antene. Ocena sistemske latence je odvisna od komponent celotnega sestava oziroma hitrosti uporabljene strojne in programske opreme ter tipa povezave med robotskim elektronskim tahimetrom (TPS) in georadarjem (GPR). Za izračun ujemanja in poravnave radargramov ter vrednotenje rezultatov in uspešnost slikovnega ujemanja smo razvili lastno programsko rešitev. Latenca velja za testirani sestav, preizkušen v tej doktorski disertaciji, če zamenjamo katero koli komponento iz konfiguracije, se lahko latenca drastično spremeni, kar ima znaten vpliv na končne rezultate. Neupoštevanje latence ob hitrosti gibanja 0,5 m/s lahko privede do položajnih napak v rangi 0,25 m, kar je lahko ključnega pomena pri vrednotenju rezultatov določevanja položaja GI.

Ena od očitnih prednosti predlaganega modela za evidentiranje GI, razvitega v tej doktorski disertaciji, je, da ni treba vzpostavljati ortogonalne mreže raziskovanega območja, na katero oziroma na njene načrtovane profile danes običajno naknadno lineariziramo in umerjamo dolžine izmerjenih profilov. Druga očitna prednost predlaganega modela je, da v skladu z gostoto zajetih položajnih in višinskih

točk beleži trajektorijo gibanja georadarja, s katero se dejansko približamo izmerjenemu profilu. Tretja prednost je v pridobivanju višinskega profila vzdolž celotne georadarske trajektorije, s katerim zajamemo vse reliefne spremembe, ki so ključnega pomena pri uporabi topografske korekcije.

Predlagani model georadarskih opazovanj večinoma izpolnjuje priporočene položajne in višinske natančnosti ali se jim vsaj približa. Ocenjena položajna in višinska točnost GI predlaganega modela, podani s cenilko točnosti RMSE v testnih bazenih, znašata 7,6 cm in 11,5 cm, v testnem realnem okolju I 14,6 cm in 13,4 cm ter v testnem realnem okolju II 11,4 cm in 10,1 cm. Glede na izračunano točnost v testnih bazenih in realnih testnih okoljih je predlagani model zadovoljil naša pričakovanja in je glede na priporočila primeren za evidentiranje in odkrivanje podzemnih objektov GI v Sloveniji in tujini. Model se je izkazal kot dobro orodje za določevanje dimenzij ter naklonov vodov in cevi GI, ki pa je omejeno z višinsko natančnostjo same metode. V model smo pri določevanju naklona vpeljali linearno regresijsko analizo.

Metoda hitrosti širjenja EMV v cevi, ki služi kot ena od metod določanja dimenzije cilindričnih objektov, se je v praksi kot uporabna izkazala le v redkih primerih. Uporabo metode določajo različne danosti, kot so polnilo cevi, količina polnila in material cevi. Pri določevanju dimenzij cilindričnih objektov se je kot uporabnejša izkazala metoda ujemanja referenčne hiperbole s prilagajanjem polmera ciljnega objekta. Ob tem je treba opozoriti, da lahko v nekaterih primerih precenimo premer infrastrukture pri radarskih profilih, ki ne sekajo infrastrukturnega voda pod kotom 90° . Poleg položaja, višine, naklona in premera pomaga pri določitvi vrste podzemnega voda tudi amplituda radarskega odboja, ker je odvisna od materiala cevi ter zapoljenosti in polnila cevi. Na osnovi amplitud radarskih odbojev lahko npr. zanesljivo ugotovimo, ali gre za kovinsko ali nekovinsko cev. Kovinski vodi in cevi povzročajo izrazitejša radarska odboja.

Na podlagi podatkov o položajni in višinski natančnosti koordinat ciljnih objektov, pridobljenih s predlaganim modelom v urbanem okolju, smo ocenili, da je lahko georadarska metoda, ob upoštevanju njenih lastnosti in omejitev, odlično orodje za odkrivanje in evidentiranje vseh vrst GI. Metodo in predlagani model je smiselno aplicirati v postopkih zemljiškoknjižnih sporov v smislu služnostnih pravic in poti, odkrivanj ter evidentiranj GI in izboljšanja položajne in višinske natančnosti že evidentiranih podpovršinskih objektov v lastniških, sektorskih in ZKGJI-katastrih. Nedestruktivnost metode bi bila lahko odlično orodje pri preprečevanju nesreč, neposredne ter posredne škode na GI, ki je posledica poškodb infrastrukture. Verjamemo, da smo z razvitim modelom in dobljenimi rezultati prispevali k boljšemu poznavanju, prepoznavnosti in varovanju podpovršinske GI. Spodbudno je dejstvo, da je georadarska metoda zagotovo finančno ugodnejša kot gradbeni posegi in vnovične rekonstrukcije urbanih območij, ob dejstvu, da položaj trase GI ob posegu nastopa kot neznanka.

Primer izbranega urbanega okolja na območju pocinkovalnice Maksim, d. o. o., Celje, kjer sta dušenje in disperzija EMV nastala zaradi velike namočenosti, v nekaterih primerih celo zaradi debeložrnatega kamninskega tampona v mediju, dokazuje, da se lahko odzivnost in s tem prepoznavnost ciljnih objektov bistveno zmanjšata. Podobne ugotovitve veljajo za drugo izbrano urbano območje, na katerem je zaradi krpanja asfaltne površine pri rekonstrukciji GI in posledično neprimerne vzdrževanja, voda vstopila v cestno telo. V najslabših primerih toliko, da je georadarska metoda neuporabna.

S posameznimi zadržki lahko potrdimo osnovno hipotezo doktorske disertacije, da lahko s preudarnim povezovanjem nizov »standardnih« postopkov obdelave georadarskih signalov, ob podpori naprednih algoritmov za obdelavo signalov na izbranih segmentih radargrama, natančneje določimo neznanke

(položaj, višino, obliko, naklon in velikost ciljnega objekta) pri evidentiranju GI tudi v znatno oteženih okoliščinah urbanega okolja. Zadržki se nanašajo na primere, kjer je prisotna voda v mediju, majhen koeficient odbojnosti in izredno majhne dimenzije ciljnih objektov. Uspešnost metode je precej odvisna od vremenskih razmer, nivoja podtalnice urbanega okolja, fizikalnih lastnosti medija, skozi katerega se širi EMV, in uporabljene centralne frekvence antene.

S to disertacijo smo potrdili, da imamo s predlaganim novim modelom pred sabo postavljen nov izziv in potencial v interdisciplinarnem povezovanju različnih strok. To znanje bo pomagalo vsem akterjem na področju GI pri usmerjanju lastnega znanstvenega in strokovnega razvoja, tako da bodo znali razumeti pomembnost predlaganega modela in uporabljene metode ter njene sposobnosti zagotoviti primerne geoprostorske podatke in podatke o lastnostih podzemne GI. Predlagani model hkrati s sistematičnim in enostavnim pristopom vzpostavlja osnovne pogoje, da georadarska metoda prevzame tehtnejšo vlogo pri proizvodnji podatkov o GI in posledično dopolnjevanju obstoječih katastrov GI.

Izvirni znanstveni prispevek predlagane teme doktorske disertacije je optimalno sestavljen model za pridobitev informacij o dimenziji, globini, naklonu in položaju vodov in cevi v različnih zahtevnejših okoliščinah urbanega okolja, ki je odvisen od debeline in sestave voziščne konstrukcije ter prisotnosti nenadzorovanih spremenljivk naravnega okolja, kot sta vlaga in relativna dielektričnost. Med izvirne prispevke te doktorske disertacije štejemo tudi pridobitev rezultatov raziskave na osnovi problemsko odzivnih kombinacij algoritmov za prepoznavanje karakterističnih oblik odbojev in amplitud povratnih signalov ter kakovostno interpretacijo za cilje raziskave relevantnih georadarskih rezultatov. S predlaganim modelom je objektivno določena kakovost (predvsem parametra natančnosti in točnosti) pridobljenih informacij in ocenjena primernost inovativnih postopkov obdelave podatkov opazovanj za praktično uporabo. Model georadarskih opazovanj glede na do zdaj znane nedestruktivne modele in metode omogoča evidentiranje vse obstoječe gospodarske infrastrukture in zaradi natančnosti meritev preprečevanje posredne in neposredne škode, ki je posledica nepoznavanja položaja podzemne infrastrukture pri posegih v prostor.

Vprašanja in vrzeli, ki jih odpira interdisciplinarni predlagani model georadarskih opazovanj za evidentiranje GI, v katerem se prepletajo plitva geofizika, gradbeništvo v smislu nizkih gradenj in komunalnega gospodarstva, geodezija, fotogrametrija, daljinsko zaznavanje, obdelava posnetkov ter računalništvo in informatika, bo treba v prihodnosti izpolniti in dodelati v smislu:

- uporabe in testiranja dodatnih algoritmov za obdelavo radargramov v smislu samodejnega prostorskega prepoznavanja in klasifikacij hiperbol na radargramu za potrebe določevanja premera in temen ciljnih objektov,
- natančnejše ocene latence izbrane konfiguracije (Predlagamo laboratorijsko eksperimentalno določevanje latence merskega sestava s pomočjo vodoravnih referenčnih tirnic, s katerimi bi zagotovili identični položaj profilov oziroma radargramov tja in nazaj. Predlagana laboratorijska ocena latence bi izboljšala tudi končni rezultat določevanja položaja. Pri oceni latence bi bilo treba poleg matematično-statističnih metod, preizkušenih v tej doktorski disertaciji, preizkusiti in raziskati še HVS-metodo (angl. Human Visual System), in sicer SSIM-metodo (angl. Structural SIMilarity index method). Metoda deluje na primerjavi radargramov na podlagi lokalnih korekcij svetlobe, kontrasta in strukture.),
- izboljšanja modela v vključevanju filtriranja in glajenja podatkov, pridobljenih v kinematičnih terestričnih procesih (smiselno bi bilo raziskati vpliv Kalmanovega filtra na končne rezultate ciljnih objektov),

- uporabe programsko nadgrajenih elektronskih tahimetrov, ki bi omogočali zajem meritev z višjo frekvenco od 5 Hz in s tem povečati gostoto zajema položaja in višine georadarja ter posledično izboljšati položajno in višinsko natančnost ciljnih objektov.

Predvidevamo, da imajo rezultati raziskave georadarske metode in predlagani model ob stopnji razvoja, kot se kaže v zadnjih nekaj letih, velik potencial na mnogih področjih. Metoda bo spodbudila nekatere za današnji čas nepredstavljive družbene posledice. Družbene posledice predlaganega modela vidimo v smereh prostorskega načrtovanja, posegih v prostor, pridobivanja gradbenih dovoljenj, varovanja in zavarovanja podzemne lastnine, preprečevanja škode in podobno. Vprašljivi bodo postali tudi odškodninski zahtevki zaradi nastale posredne in neposredne škode na GI. Prva posledica, ki bi se lahko zelo hitro zgodila, je, da bo moral investitor ali upravljavec oziroma lastnik podzemne GI v fazi načrtovanja posega v prostor oziroma pridobitve ustrezne dokumentacije (npr. gradbenega dovoljenja), ob nepoznavanju ali slabi položajni natančnosti obstoječe GI na območju posega, izvesti posnetek podpovršinskega stanja obstoječih infrastruktur, ki bi služil kot podlaga za projektiranje. S tem bi se izognili pogostim konfliktom, poškodbam in gmotni škodi v prostoru, ki nastopijo zaradi nepoznavanja položaja o obstoječi podzemni GI. Danes je to že skoraj praksa na prostorskih območjih oziroma območjih pravnih režimov varstva kulturne dediščine, kjer se georadarska metoda široko uporablja v smislu predhodnih arheoloških raziskav kulturne dediščine, ki je v končni fazi ekonomsko ugodnejša kot sami posegi v prostor.

PRILOGA A: DIMENZIONIRANJE ASFALTNIH VOZIŠČNIH KONSTRUKCIJ

Dodatek o dimenzioniranju asfaltnih voziščnih konstrukcij v Sloveniji je namenjen predvsem kot dopolnilo istoimenskega razdelka 3.2.2. V prvem delu dodatka gre za podrobnejši opis lastnosti uporabljenega kamenega agregata za posteljico, načrtovanih kakovosti materialov, prometnih obremenitev, klimatskih ter hidroloških pogojev ter spodnje nevezane nosilne plasti za uporabo v novih asfaltnih voziščnih konstrukcijah. Drugi del dodatka je namenjen opisu, področju uporabe in projektnim debelinam asfaltnih krovnih plasti glede na tehnične specifikacije v Sloveniji.

A.1 Pogoji uporabe v novih voziščnih konstrukcijah

A.1.1 Lastnosti uporabljenega drobljenega kamenega agregata za posteljico

Lastnosti uporabljenega drobljenega kamenega agregata 0–125 mm za posteljico po standardu SIST EN 13242:2003+A1:2008 prikazuje preglednica 28.

Preglednica 28: Lastnosti uporabljenega drobljenega kamenega agregata 0–125 mm.

Table 28: Features of used crushed limestone aggregate 0–125 mm.

Proizvodni obrat	Kamno lom Liboje
Oznaka proizvoda	drobljeni kameni agregat 0–125 mm
Velikost agregata	0–125 mm
Zrnastost	G _A 85
Čistost – vsebnost finih delcev	f ₅
Surovina	apnenec
Odpornost proti zmrzovanju in tajanju	MS ₁₈

A.1.2 Kakovost osnovnih materialov voziščnih konstrukcij

Kakovost materialov, načrtovanih za uporabo v novih asfaltnih voziščnih konstrukcijah, mora ustrezati zahtevam, določenim v uveljavljeni tehnični regulativi. Medsebojna razmerja odpornosti teh materialov proti utrujanju, ki so odvisni od prometne in klimatske obremenitve, so t. i. količnik ekvivalentnosti materiala ali količnik zamenjave (a_i), prikazani so v preglednici 29. Količniki omogočajo potrebne primerjave pri določanju vrste in dimenzij posameznih plasti v voziščni konstrukciji (TSC 06.520:2009, 2009).

Preglednica 29: Povprečne vrednosti količnika ekvivalentnosti osnovnih gradbenih materialov (TSC 06.520:2009, 2009).

Table 29: Average values of equivalence ratio of basic construction materials (TSC 06.520:2009, 2009).

	Vrsta materiala	Količnik ekvivalentnosti a_i
Obrabna plast	bitumenski beton	$a_0 = 0,42$
	drobir z bitumenskim mastliksom	$a_0 = 0,42$
Zgornja vezana nosilna plast	bitumizirani drobljenec	$a_{zV} = 0,35$
	bitumizirani prodec	$a_{zV} = 0,28$
Spodnja vezana nosilna plast	z bitumnom	$a_{sV} = 0,24$
	s cementom	$a_{sV} = 0,20$
Spodnja nevezana nosilna plast	drobljenec	$a_{sn} = 0,14$
	prodec	$a_{sn} = 0,11$ (omejen z debelino 40 cm)

Pri bistvenih odstopanjih kakovosti plasti voziščnih konstrukcij asfaltnih zmesi je treba določiti ustrezne količnike ekvivalentnosti s pomočjo navedenih diagramov v preglednici 30.

Preglednica 30: Diagrami določitve količnika ekvivalentnosti (TSC 06.520:2009, 2009).

Table 30: Diagrams of defining equivalence ratio (TSC 06.520:2009, 2009).

Vrsta materiala	Diagram
Bitumenski beton	stabilnost po Marshallu [kN]
Bitumizirani drobljenec	
Bitumizirani prodec	stabilnost po Marshallu [kN]
Zmes kamnitih zrn, stabilizirano z bitumnom	
Zmes kamnitih zrn, stabilizirano s cementom	tlačna trdnost po 7 dneh [MN/m ²]
Nevezana zmes kamnitih zrn (drobljenec, prodec)	vrednosti CBR (%)

A.1.3 Prometna obremenitev

Tehnična specifikacija za prometno obremenitev javne ceste TSC 06.511:2009 določa postopek za iz vrednotenje merodajne prometne obremenitve v načrtovani dobi trajanja n let (T_n), na osnovi katere se določijo dimenzije plasti voziščnih konstrukcij z asfaltno in cementno-betonsko krovno plastjo.

Prometna obremenitev izbranega odseka se določi za načrtovano dobo trajanja, ki za voziščne konstrukcije z asfaltno krovno plastjo znaša 20 let. Razvrstitev povprečnih dnevni in merodajnih (skupnih) prometnih obremenitev v načrtovani dobi trajanja voziščnih konstrukcij ($n = 20$ let) v značilne skupine je prikazana v preglednici 31.

Preglednica 31: Razvrstitev prometnih obremenitev v skupine.

Table 31: Groups of traffic load classification.

Skupina prometne obremenitve	Število prehodov nominalne osne obremenitve 100 kN	
	na dan (T_d)	v 20 letih (T_n)
Izredno težka	nad 3000	nad 2×10^7
Zelo težka	nad 800 do 3000	nad 6×10^6 do 2×10^7
Težka	nad 300 do 800	nad 2×10^6 do 6×10^6
Srednja	nad 80 do 300	nad 6×10^5 do 2×10^6
Lahka	nad 30 do 80	nad 2×10^5 do 6×10^5
Zelo lahka	do 30	do 2×10^5

A.1.4 Klimatski in hidrološki pogoji

Dimenzioniranje voziščne konstrukcije zaradi zmrzovanja in odtajanja je odvisno od:

- globine prodiranja mraza (h_m),
- hidroloških razmer,
- občutljivosti materialov na zmrzovanje, ki jo opredelimo z razredi,
- debeline na zmrzovanje neobčutljive voziščne konstrukcije.

Da bi bila voziščna konstrukcija zavarovana proti škodljivim učinkom zmrzovanja oziroma poškodbam, mora biti v določeni debelini zgrajena iz odpornih materialov. Najmanjša potrebna debelina voziščne konstrukcije h_{min} oziroma odpornih materialov ni enaka izmerjeni največji globini

prodiranja mraza h_m , ampak večinoma zadostuje manjša skupna debelina plasti na zmrzovanje odpornih materialov h_{min} , kot to prikazuje preglednica 32.

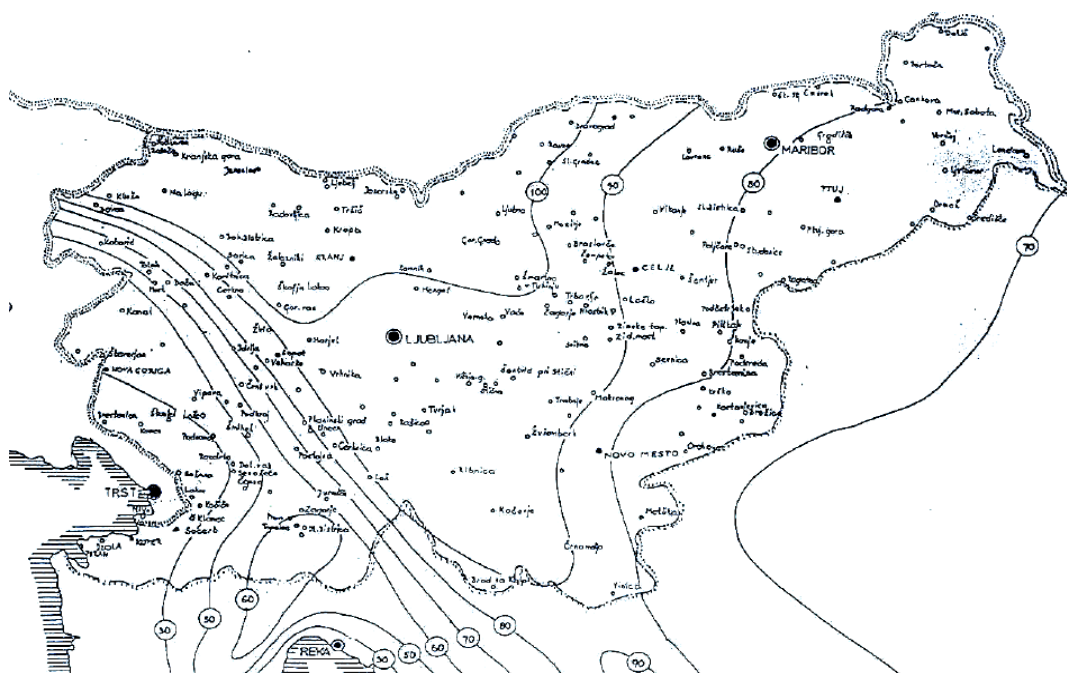
Preglednica 32: Najmanjše potrebne debeline voziščnih konstrukcij h_{min} (Jurgele, 2012).
 Table 32: Minimum required thicknesses of the pavement structure h_{min} (Jurgele, 2012).

Odpornost materiala proti zmrzovanju in tajanju	Hidrološki pogoji	Debeline voziščnih konstrukcij h_{min}	
		do nadmorske višine 600 m	nad nadmorsko višino 600 m
Odporen	ugodni	$\geq 0,6 h_m$	$\geq 0,7 h_m$
	neugodni	$\geq 0,7 h_m$	$\geq 0,8 h_m$
Neodporen	ugodni	$\geq 0,7 h_m$	$\geq 0,8 h_m$
	neugodni	$\geq 0,8 h_m$	$\geq 0,9 h_m$

A.1.4.1 Globina prodiranja mraza

Obseg sprememb pri zmrzovanju in odtajanju v cestno telo vgrajenih materialov je odvisen predvsem od značilnih dogajanj pri teh procesih. Proces zmrzovanja in odtajanja je odvisen predvsem od značilnosti materialov in lokalnih klimatskih in hidroloških razmer. Klimatske razmere je mogoče opredeliti z globino zmrzovanja (prodiranja mraza) h_m ali indeksom mraza I_m .

Za meritve globine zmrzovanja so uveljavljeni postopki s sondo, z merilnimi stekleničkami ali indikatorjem globine zmrzovanja ter električno sondo. Na osnovi ugotovljenih največjih globin prodiranja mraza v značilnih okoljih v Sloveniji je izdelana karta (glej sliko 156) informativnih globin prodiranja mraza (Žmavc, 2007), ki omogoča določitev merodajne globine prodiranja mraza v določenem okolju.



Slika 156: Karta informativnih globin prodiranja mraza h_m [cm] (TSC 06.512:2003, 2003).

Figure 156: Informative depths of cold penetration h_m [cm] (TSC 06.512:2003, 2003).

A.1.4.2 Hidrološke razmere

Hidrološke vplive razvrščamo v ugodne, če so izpolnjeni pogoji (TSC 06.512:2003, 2003): nasip ceste, visok najmanj 1,5 m, gladina talne vode, stalno globlje od globine zmrzovanja h_m , plitev ukop dobro odvodnjan in nad gladino talne vode preprečeno dotekanje vode v cestno telo s strani (iz vodnih žil) ali površine.

Hidrološke razmere so neugodne, če je nasip ceste nižji od 1,5 m, gladina talne vode v območju globine zmrzovanja h_m , plitev ukop slabo odvodnjan, ukop globok in omogočeno kapilarno dviganje vode ali dotekanje vode s strani ali površine.

A.1.4.3 Občutljivosti materialov na zmrzovanje

Material je treba oceniti kot občutljiv na zmrzovanje, če zaradi učinkovanja mraza v njem nastanejo ledene leče ali plasti ledu, bolj ali manj vzporedne z mejo zmrzovanja, ki na vozišču povzročijo zmrzlinke dvige, ali če se pri odtajanju zmanjša njegova nosilnost. Občutljivost materiala na zmrzovanje je odvisna od: zrnivosti, oblike zrn, zgoščenosti, vrste mineralov v finih frakcijah in mineraloško-kemijskih lastnosti. Na osnovi kriterijev za zrnavost in mineraloških kriterijev so materiali, uporabljeni v cestogradnji, razvrščeni v tri razrede občutljivosti na zmrzovanje (glej razpredelnico 2).

Na osnovi količnika neenakomernosti oblikovanosti presejne krivulje materiala $U = d_{60}/d_{10}$ in deleža drobnih zrn (velikosti do 0,063 mm) je narejena podrobnejša razmejitev razredov občutljivosti materiala F1 in F2. Po razvrstitvi materialov, prikazanih v preglednici 33, so vsi grobozrnati materiali, ki vsebujejo do 5 m.-% zrn, velikosti do 0,063 mm, neobčutljivi na zmrzovanje. Prav tako neobčutljivi ali zanemarljivo občutljivi so mešani materiali, ki vsebujejo do 15 m.-% drobnih zrn, če znaša količnik neenakomernosti oblikovanosti presejne krivulje $U = d_{60}/d_{10} \leq 6$. Če je količnik U od 6 do 15, je treba dopustni delež drobnih zrn v materialu linearno interpolirati med 15 m.-% in 5 m.-%. Če pri mešanih materialih ta kriterij ni izpolnjen, jih je treba uvrstiti v razred občutljivosti F2.

Preglednica 33: Razvrstitev občutljivosti materialov na zmrzovanje (TSC 06.512:2003, 2003).

Table 33: Classification of materials on the basis of frost sensitivity (TSC 06.512:2003, 2003).

Razred	Občutljivost	Delež zrn do 0,063 mm m.-%	Klasifikacija
F1	neobčutljiv	manjši od 5	GW (dobro graduiran prod), GP (slabo graduiran prod), SW (dobro graduiran pesek), SP (slabo graduiran pesek)
F2	malo do srednje občutljiv	od 5 do 15	GC (glinast prod), GM (meljast prod), SC (glinast pesek), SM (meljast pesek), CL (meljna glina, tudi pusta glina, peščena glina), CH (visoko plastična glina)
F3	zelo občutljiv	večji od 15	SM (meljast pesek) – ML (čist, malo peščen ali zelo malo glinast melj), ML (čist, malo peščen ali zelo malo glinast melj), MH (visoko plastičen melj), CL (meljna glina, tudi pusta glina, peščena glina).

A.1.5 Spodnja nevezana nosilna plast asfaltnih voziščnih konstrukcij

Namen nevezane nosilne (tamponske) plasti voziščne konstrukcije med posteljico in obrabnim slojem je zagotoviti (Žmavc, 2007): potrebno nosilnost, trajno nosilnost in zaščito občutljivih materialov v

podlagi pred škodljivimi učinki mraza. V nevezane nosilne plasti se predvsem vgrajuje zmesi kamnitih zrn. Trajno nosilnost se zagotovi z izbrano zmesjo kamnitih zrn, ki je obstojna v vodi in na mrazu. Vodovpojnost nevezane zmesi zrn velikosti nad 4 mm mora biti $\leq 0,5$ m.-%. Potrebno nosilnost pa je treba zagotoviti, zato da je omogočena ustrezna kakovostna vgraditev materialov v nadgrajenih plasteh voziščne konstrukcije.

Računska debelina spodnje nevezane nosilne plasti zmesi zrn uporabljenega prodca mora znašati za asfaltne voziščne konstrukcije, obremenjene:

- s težkim prometom, najmanj 25 cm,
- s srednjim ali lahkim prometom, najmanj 20 cm.

A.2 Asfaltna krovna plast

A.2.1 Vrste bitumenskih veziv krovnih plasti testnih bazenov

Poznamo več vrst veziv, najpogosteje se uporabljata cestogradbeni in polimerni bitumen. Lastnosti sestavljenih bitumenskih veziv morajo ustrezati opredeljenim lastnostim za izbrani tip cestogradbenega bitumna. Priporočila za uporabo bitumenskih veziv za krovne plasti, uporabljenih v testnih bazenih, (AC 22 base in AC 8 surf), so podana v preglednici 34, kjer + podaja primernost in – neprimernost uporabe.

Preglednica 34: Priporočila za uporabo bitumenskih veziv za bitumizirane zmesi asfaltnih plasti (TSC 06.300/06.400:2009, 2009).

Table 34: Recommendation on usage of bitumen binders for bitumen mixtures of asphalt layers (TSC 06.300/06.400:2009, 2009).

Značilnosti za uporabo		Tip cestogradbenega bitumna					
		20/30	30/50	50/70	70/100	100/150	160/220
Vrsta bitumizirane zmesi	AC 22 base	+	+	+	+	–	–
	AC 8 surf	–	+	+	+	+	+
Razred prometne obremenitve (preglednica 31)	izredno težka	+	+	+	+	–	–
	zelo težka	+	+	+	+	–	–
	težka	–	+	+	–	–	–
	srednja	–	+	+	–	–	–
	lahka	–	–	+	–	+	+
	zelo lahka	–	–	+	–	+	+
Gostota prometa (PLDP)	> 20.000	+	+	+	–	–	–
	10.000–20.000	+	+	+	–	–	–
	5000–10.000	–	+	+	+	–	–
Hitrost prometa	P (počasen)	+	+	–	–	–	–
	H (hiter)	–	–	+	+	+	+
Klimatsko območje	M (mediteransko)	+	+	+	+	–	–
	C (celinsko)	–	–	+	+	+	+

A.2.2 Asfaltna zgornja vezana nosilna plast

Asfaltna zgornja vezana nosilna plast (AC base) je plast voziščne konstrukcije iz bituminizirane zmesi, vgrajena kot vezana zgornja nosilna plast v enem ali več slojih. Vezane zgornje nosilne plasti so vgrajene v voziščne konstrukcije za težje prometne obremenitve.

Za zgornje, nosilne plasti so uporabne bitumizirane zmesi kamnitih zrn: bitumizirani drobljenec, bitumizirani prodec in bitumizirani prodčev drobljenec. Področja uporabe bituminiziranih zmesi za asfaltne nosilne plasti so v odvisnosti od povprečne letne dnevne prometne obremenitve določena v preglednici 35, kjer + podaja primernost in – neprimernost uporabe..

Preglednica 35: Področja uporabe bituminiziranih zmesi za asfaltne nosilne plasti v odvisnosti od povprečne letne dnevne prometne obremenitve (TSC 06.300/06.410:2009, 2009).

Table 35: The scope of usage of bitumen mixtures for asphalt layers depending on average annual daily traffic load (TSC 06.300/06.410:2009, 2009).

Skupina prometne obremenitve	Razred bitumizirane zmesi	Razred zmesi kamnitih zrn	Vrste bitumenskih zmesi		
			AC 16 base	AC 22 base	AC 32 base
Izredno težka	A1	Z4	–	+	+
Zelo težka, težka	A2	Z4	+	+	+
Srednja	A3	Z5	+	+	+
Lahka, zelo lahka	A4	Z6	+	+	–

Pogojene projektne debeline asfaltnih nosilnih plasti so za novogradnje navedene v preglednici 36 (TSC 06.300/06.400:2009, 2009).

Preglednica 36: Pogojene projektne debeline asfaltnih nosilnih plasti (TSC 06.300/06.400:2009, 2009).

Table 36: Conditioned project thicknesses of asphalt base layers (TSC 06.300/06.400:2009, 2009).

Projektna debelina plasti	Enota mere	Vrste bitumenskih zmesi		
		AC 16 base	AC 22 base	AC 32 base
– najmanj	mm	50	60	80
– največ	mm	70	100	140

A.2.3 Prostorske in mehanske lastnosti asfaltne zgornje vezane nosilne plasti

Preglednica 37: Prostorske in mehanske lastnosti uporabljene AC 22 base 50/70 A3 bitumizirane zmesi.

Table 37: Spatial and mechanical characteristics from used AC 22 base 50/70 A3 of bitumen mixture.

Proizvodni obrat	Asfaltna baza A 240-U, Velika Pirešica	
Oznaka proizvoda	AC 22 base 50/70 A3	
Vsebnost prostih votlin – min.	$V_{\min 3,0}$	(3,0 %)
Vsebnost prostih votlin – maks.	$V_{\max 6,0}$	(6,0 %)
Vsebnost votlin, zapoljenih z bitumnom – min.	$WFB_{\max 55}$	(55 %)
Vsebnost votlin, zapoljenih z bitumnom – maks.	$WFB_{\max 74}$	(74 %)
Vsebnost votlin v kamni zmesi	$WMA_{\min 14}$	(14 %)
Občutljivost na vodo	ITSR ₈₀	(80 %)
Odpornost na obrabo z ježevkami	Abr _{NR}	
Odpornost na gorenje	NDP	
Maksimalna temperatura asfaltnih zmesi	180° C	
Zrnavost (presevki):	31,5 mm	(m. %)
22,4 mm	98	(m. %)

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 37

16 mm	86	(m. %)
11,2 mm	73	(m. %)
8 mm	65	(m. %)
4 mm	46	(m. %)
2 mm	34	(m. %)
0,25 mm	14	(m. %)
0,063 mm	7,0	(m. %)
Vsebnost veziva	$B_{\min 3,0}$	(3,0 %)
Odpornost proti trajnemu preoblikovanju		
– stopnja tvorjenja kolesnic	WTS _{AIR NR}	
– sorazmerna globina kolesnic	PRD _{AIR NR}	

A.2.4 Asfaltna obrabna in nosilnoobrabna plast

Za obrabno plast se uporabljajo bitumizirane zmesi, kot so: bitumenski beton, drobir z bitumenskim mastiksom, drenažni asfalt, liti asfalt, tankoplastna in površinska prevleka.

Področja uporabe bituminiziranih zmesi bitumiziranih betonov so v odvisnosti od povprečne letne dnevne prometne obremenitve določena v preglednici 38, kjer + podaja primernost in – neprimernost uporabe.

Preglednica 38: Področja uporabe bituminiziranih betonov v odvisnosti od povprečne letne dnevne prometne obremenitve (TSC 06.300/06.400:2009, 2009)

Table 38: The scope of usage of bitumen concretes depending on average annual daily traffic load (TSC 06.300/06.400:2009, 2009).

Skupina prometne obremenitve	Razred bitumizirane zmesi	Razred zmesi kamnitih zrn	Vrste bitumenskih zmesi			
			AC 4 surf	AC 8 surf	AC 11 surf	AC 16 surf
Izredno težka	A1	Z1	–	–	+	–
Zelo težka	A2	Z2	–	+	+	–
Srednja	A3	Z2	–	+	+	–
Lahka	A4	Z3	+	+	+	+
Zelo lahka			+	+	+	+

Pogojene projektne debeline plasti bitumenskih betonov plasti so za novogradnje navedene v preglednici 39.

Preglednica 39: Pogojene projektne debeline asfaltnih obrabnih in nosilnoobrabnih plasti (TSC 06.300/06.400:2009, 2009).

Table 39: Conditioned project thicknesses of asphalt wearing layers (TSC 06.300/06.400:2009, 2009).

Projektna debelina plasti	Enota mere	Vrste bitumenskih betonov			
		AC 4 surf	AC 8 surf	AC 11 surf	AC 16 surf
– najmanj	mm	15	25	35	50
– največ	mm	30	40	50	80

A.2.5 Prostorske in mehanske lastnosti asfaltne obrabne in nosilnoobrabne plasti

Preglednica 40: Prostorske in mehanske lastnosti uporabljene AC 22 surf 50/70 A3 bitumizirane zmesi.

Table 40: Spatial and mechanical characteristics from used AC 22 surf 50/70 A3 of bitumen mixture.

Proizvodni obrat	Asfaltna baza A 240-U, Velika Pirešica	
Oznaka proizvoda	AC 8 surf 50/70 A3	
Vsebnost prostih votlin – min.	$V_{\min 3,0}$	(3,0 %)
Vsebnost prostih votlin – maks.	$V_{\max 6,0}$	(6,0 %)
Vsebnost votlin, zapoljenih z bitumnom – min.	$WFB_{\max 70}$	(70 %)
Vsebnost votlin, zapoljenih z bitumnom – maks.	$WFB_{\max 86}$	(86 %)
Vsebnost votlin v kameni zmesi	$WMA_{\min 14}$	(14 %)
Občutljivost na vodo	ITSR ₈₀	(80 %)
Odpornost na obrabo z ježevkami	Abr _{NR}	
Odpornost na gorenje	NDP	
Maksimalna temperatura asfaltnih zmesi	180 °C	
Zrnavost (presevki):	11,2 mm	
8 mm	100	(m. %)
4 mm	99	(m. %)
2 mm	64	(m. %)
0,25 mm	43	(m. %)
0,063 mm	16	(m. %)
Vsebnost veziva	8,2	(m. %)
	$B_{\min 4,8}$	(4,8 %)
Odpornost proti trajnemu preoblikovanju		
– stopnja tvorjenja kolesnic	WTS _{AIR NR}	
– sorazmerna globina kolesnic	PRD _{AIR NR}	

PRILOGA B: TERMINOLOGIJA

Slovenska strokovna terminologija se srečuje s problemi pri izrazoslovju, saj so slovenski strokovnjaki strokovne termine prevzemali iz tujih jezikov, predvsem iz grščine, latinščine in potem vsaj še iz nemščine, francoščine, srbohrvaščine in angleščine (Podobnikar, 1999). Zaradi lažjega razumevanja ter poenotenja v tej disertaciji uporabljene terminologije je podan besednjak najpogosteje uporabljenih pojmov (dodatek B.1). Krajši slovarček je potrebno dojemati kot pojasnitve in definicije pojmov predstavljene tematike v tej disertaciji. Poleg slovenskih pojmov in opisov so podani njihovi angleški izvorniki, ki pomagajo odpraviti dvome. Pri opisih pojmov pogosto ne citiramo navedene literature, ampak le povzemamo bistveni del opisa pojma. Krajšemu slovarčku sledi seznam glavnih matematičnih oznak in enot (dodatek B.2), uporabljenih v tej disertaciji. Na koncu je podan še seznam uporabljenih kratic (dodatek B.3), predstavljenih v slovenskem in/ali angleškem jeziku.

B.1 Slovarček

<i>Pojem</i>	<i>Angleški izraz</i>	<i>Opis</i>
antena	<i>antenna</i>	je naprava, ki generira in pošilja EMV v medij ter sprejema povratno oziroma odbito EMV iz medija (EuroGPR, 2015). Standardne antene omogočajo oddajanje valovanja s frekvenco od 10 MHz do 2,6 GHz (Xavier in Medeiros, 2006).
aritmetična sredina	<i>arithmetic mean</i>	<i>Glej težišče.</i>
asfaltna krovna plast	<i>asphalt surfacing</i>	je vrhnji del voziščne konstrukcije. Sestavljajo jo obrabnozaprone ali drenažne plasti in pod njo vgrajene vezne in/ali zgornje nosilne, izravnalne in/ali zaščitne plasti iz bituminizirane zmesi (TSC 06.300/06.410:2009, 2009).
asfaltna obrabna in nosilnoobrabna plast	<i>asphalt concrete surface</i>	je plast bituminizirane zmesi, ki je vgrajena kot edina vezana plast na spodnjo (nevezano) nosilno plast; bituminizirana zmes vsebuje poleg bitumenskega veziva zmes naravnih in/ali drobljenih kamnitih zrn (TSC 06.300/06.410:2009, 2009).
asfaltna zgornja vezana nosilna plast	<i>asphalt concrete base course</i>	je plast voziščne konstrukcije iz bituminizirane zmesi, vgrajena kot vezana zgornja nosilna plast (v enem ali več slojih) (TSC 06.300/06.410:2009, 2009).
avtokorelacija	<i>autocorrelation</i>	je mera stopnje vpliva porazdelitve podobnih objektov (iste spremenljivke) v okolici (različne lokacije) določenega objekta (Podobnikar, 2001).
bitumen	<i>bitumen; asphalt cement</i>	je pri predelavi ustreznega zemeljskega olja (nafte) pridobljena težko hlapljiva temnobarvna zmes različnih organskih substanc, katerih elastoviskozno obnašanje se s temperaturo spreminja; je vezivo za bituminizirane zmesi (TSC 06.300/06.410:2009, 2009).

<i>Pojem</i>	<i>Angleški izraz</i>	<i>Opis</i>
bitumizirani drobljenec	<i>bituminous well graded crushed stone,</i>	je bituminizirana zmes za nosilne plasti, sestavljena iz popolnoma drobljenih kamnitih zrn, obvitih z bitumenskim vezivom (TSC 06.520:2009, 2009).
bitumizirane zmesi	<i>asphalt mix/mixture</i>	je zmes kamnitih zrn polnila, peska, drobirja in/ali proda ter bitumenskega veziva in morebitnih potrebnih dodatkov, proizvedena po vročem postopku v asfaltnem obratu (TSC 06.300/06.410:2009, 2009).
brezpilotni letalnik	<i>unmanned aerial vehicle; dron</i>	je naprava za letenje, ki jo obdrži v zraku aerostatični ali aerodinamični vzgon, ki jo vodi računalnik v njem, ali jo daljinsko vodi pilot na zemlji. Brezpilotni letalnik označuje vse letalnike (ali zrakoplove ali zračna plovila – gre za sopomenke), težje in lažje od zraka (ZRCSAZU, 2016).
brežžična povezava	<i>wireless communication</i>	je prenos informacij med komponentami sistema brezžičnih (kabelskih) povezav; npr. (angl. bluetooth) tehnologija brezžične povezave temelji na radijskem (elektromagnetnem) prenosu signala. Oddajnik odda pretvorjen električni signal v elektromagnetne valove, sprejemnik jih sprejme in pretvori nazaj v električni signal).
časovni prirastek sledi	<i>time increment</i>	je časovni prirastek v zaporedju vzorcev posameznih sledi (Jol, 2009).
časovni filter	<i>temporal filter</i>	je filter delujoč vzdolž ene ali več sledi na radargramu v izbranem časovnem intervalu (Jol, 2009).
časovno okno	<i>time window; range</i>	je prednastavljeni maksimalni dvojni čas potovanja signala vzdolž sledi, s čimer posredno opredelimo dolžino oziroma njen globinski doseg.
centralna frekvenca	<i>central frequency</i>	predstavlja sredino oddajanega frekvenčnega spektra oziroma pasovne širine antene (EuroGPR, 2015).
centralna tendenca	<i>central tendency</i>	je lastnost, navadno številske spremenljivke, da se njene vrednosti gostijo okoli neke vrednosti. Mera centralne tendence, s katero se meri centralna tendenca, je navadno kakšna od srednjih vrednosti (modus, mediana, aritmetična, geometrična, harmonična ali kvadratna sredina) (Košmelj, 2001).
debelinski indeks voziščne konstrukcije	<i>pavement thickness-index</i>	je vsota zmnožkov faktorjev ekvivalentnosti (odpornosti proti utrujanju) posameznih materialov (a_i), vgrajenih v voziščno konstrukcijo in debelin plasti teh materialov (d_i) (TSC 06.520:2009, 2009).
determinacijski koeficient	<i>coefficient of determination</i>	je mera, ki vrednoti kakovost regresijskega modela, ki je določen na intervalu med 0 in 1. Ta kaže delež (lahko tudi v %) celotne variance spremenljivke Y, ki je pojasnjen z variiranjem spremenljivke X. Regresijski model je lahko boljši ali slabši. V primeru linearne regresije je enak kvadratu koeficienta korelacije (Kovačič, 2014).

<i>Pojem</i>	<i>Angleški izraz</i>	<i>Opis</i>
digitalni model površja	<i>digital surface models</i>	je računalniška predstavitev nadmorskih višin zemeljskega površja na določenem območju. Predstavlja zemeljsko površje, kot ga vidimo od zgoraj. Poleg samega reliefa prikazuje pojave na terenu, kot so zgradbe in vegetacija, na odprtih območjih pa je ekvivalenten digitalnemu modelu reliefa. (Kraus, 2007).
digitalni model reliefa	<i>digital terrain model</i>	je digitalni opis oblikovanosti zemeljskega površja, natančneje golega reliefa. Ne vsebuje le reliefa samega, ampak lahko tudi njegov opis z nakloni, ekspozicijo ter plastnicami, padnicami, točkami vrhov ter drugimi značilnimi črtami in točkami. (Podobnikar, 2001).
določevanje praga; upragovljanje	<i>thresholding</i>	pomeni določitev ustreznega območja vrednosti (npr. svetilnosti) slikovnih elementov, s čimer ločimo predmete, ki nas zanimajo, od nepomembnih delov slike, t. i. ozadja. Pri tej pretvorbi lahko nastane binarna slika z vrednostmi pikslov bodisi 0 bodisi 1: vrednost 0 dobijo tisti slikovni elementi, ki predstavljajo iskani objekt, preostali, ki predstavljajo ozadje, pa dobijo vrednost 1 (Lepetič et al., 2004).
drobljenec	<i>crushed aggregate</i>	je zmes popolnoma drobljenih kamnitih zrn velikosti do 63 mm (TSC 06.300/06.410:2009, 2009).
dvojni čas potovanja	<i>two-way traveltime</i>	predstavlja čas potovanja EMV od antene do ciljnega objekta in nazaj. Ob poznavanju hitrosti EMV v mediju ga lahko pretvorimo v globino (EuroGPR, 2015).
električna konduktivnost	<i>electrical conductivity</i>	je sposobnost snovi, da prevaja energijo, npr. elektriko, (Pavšič, 2006).
električna prevodnost	/	glej električna konduktivnost.
elektronski tahimeter	<i>electronic tachymeter; total station</i>	je univerzalni geodetski instrument, ki predstavlja kombinacijo elektronskega razdaljemera in teodolita. Z elektronskim tahimetrom merimo razdalje ter horizontalne smeri in vertikalne kote (Uren in Price, 2006).
filter nasičenosti signala	<i>dewow</i>	je nizkoprepustni filter, delujoč nad vsako sledjo, s katere odstrani oziroma popravi inicialni istosmerni tok in/ali poševno tendenco nizkofrekvenčnega dela signala, ki ga povzroča mogoča nasičenost signala s prvimi prihodi zračnih in neposrednih podpovršinskih valov.
filter odstranitve povprečja signala	<i>subtracting average filter</i>	je filter, ki deluje nad izbranimi sledmi v času in prostoru in ga uvrščamo med 2D-filtre (Jol, 2009).

<i>Pojem</i>	<i>Angleški izraz</i>	<i>Opis</i>
Fresnelova cona	<i>Fresnel zone</i>	je pravokotni prerez prostora, ki ga za svoje razširjanje v prostoru oziroma mediju potrebuje EMV glede na smer razširjanja. Mej tega prostora ne moremo preprosto določiti, zato si pomagamo s Fresnelovim elipsoidom, pri georadarskih meritvah imenovani tudi snop eliptičnega stožca, je podolgovati rotacijski elipsoid, ki ima vrh v središču oddajne antene (Leckebusch, 2003).
georadar; GPR	<i>georadar; GPR</i>	je visokoločljivostna geofizikalna elektromagnetna naprava (Brezigar et al., 1995). Sestavljen je iz generatorja elektromagnetnih impulzov, oddajne in sprejemne antene, sprejemnika in kontrolne (centralno-procesna) enote ter prikazovalnika (Gosar in Ravnik, 2007). Pri monostatičnih izvedbah georadarjev sta oddajna in sprejemna antena združeni v skupno anteno za oddajanje in sprejemanje. <i>Glej antena.</i>
georadarska metoda; GPR-metoda	<i>Georadar method; GPR method</i>	je geofizikalna nedestruktivna metoda, ki uporablja radarske impulze, na podlagi katerih pridobimo informacije o podpovršju. Metoda uporablja del spektra EMV, in sicer v mikrovalovnem pasu (UHF/VHF frekvenc) radijskega spektra, in temelji na merjenju časa potovanja odbitega signala od podpovršinskih struktur.
georadarska meritev; GPR-meritev	<i>GPR survey</i>	je proces izvedbe georadarskih opazovanj. Ločimo tri osnovne tipe izvedbe meritev, in sicer: refleksijsko profiliranje, širokokotno refleksijo in refrakcijo in radarsko tomografijo.
georadarski profil	<i>GPR section; GPR profile; survey line</i>	je prostorsko opredeljen skupek sledi, ki definira položaj, orientacijo in dolžino radargrama (Jol, 2009).
georadarski profil ničelnega odmika	<i>zero offset profile</i>	je georadarski profil, kjer sta oddajna in sprejemna antena na ničelni oddaljenosti (EuroGPR, 2015). <i>Glej monostatična antena.</i>
globina zmrzovanja	<i>frost depth</i>	je največja globina do katere seže izoterma 0 °C v dolgotrajnem mrazu (TSC 06.512:2003, 2003).
gospodarska infrastruktura	<i>buried urban infrastructure (utility and facility)</i>	so vsa omrežja gradbenoinženirskih objektov in naprav, ki služijo določeni vrsti gospodarske javne službe državnega, lokalnega ali zasebnega pomena. V gospodarsko infrastrukturo spadajo vsi komunalni, energetske in komunikacijski vodi.
grafični prikaz refleksijske sledi	<i>A-scan</i>	je vizualizacija posamezne refleksije signala v odvisnosti od dvojnega časa potovanja (EuroGPR, 2015; Shahbaz-Khan, 2011).
hodnik za pešce, pločnik	<i>pedestrian pavement; sidewalk</i>	je ena od javnih površin, namenjena pešcem. Pešce se ob cesti ali kolesarski stezi vodi po vzporednih površinah. Za določanje širine hodnika za pešce se uporabljajo predpisi o projektiranju cest.

<i>Pojem</i>	<i>Angleški izraz</i>	<i>Opis</i>
Houghova transformacija	<i>hough transformation</i>	je metoda za modeliranje vizualnih informacij. Prvotno je bila namenjena iskanju kompleksnih vzorcev v binarnih slikah, hitro pa je postala priljubljena metoda za iskanje premic in krivulj. Na radargramu najprej najde robove, nato pa takšni sliki poiščemo zelene krivulje. S transformacijo poskušamo pripisati ter prepoznati, katere robne točke na radargramu pripadajo določeni refleksijski hiperboli. <i>Glej</i> refleksijska hiperbola.
horizontalni rez; grafični prikaz prereza	<i>C-scan; time slice; depth slice</i>	predstavljajo 2D-horizontalne prereze preiskovane prostornine na določeni globini preiskovanega medija (Kohl et al., 2005).
horizontalna ločljivost	<i>horizontal or lateral resolution</i>	predstavlja najmanjšo horizontalno razdaljo med bližnjima ciljima objektoma v horizontalni smeri, da jih je mogoče še razlikovati oz. obravnavati kot dva ločena objekta (Daniels et al., 1988). Odvisna je od hitrosti širjenja EMV in frekvence valovanja, vendar nanjo pomembno vpliva še globina ciljnega objekta. Horizontalno ločljivost je mogoče definirati s prvo Fresnelovo cono (Jol, 2009). <i>Glej</i> vertikalna ločljivost.
izotropnost	<i>isotropic</i>	je lastnost snovi, da ima v vseh smereh enake fizikalne lastnosti (SISJ, 2015). Izotropen medij v vseh smereh enako lomi EMV; nasprotje je anizotropnost.
jakost električnega polja	<i>electric field strength</i>	je vektorska količina, s katero je določeno električno polje (SISJ, 2015). Definirana je kot sila na enoto pozitivnega naboja. Grafično ga predstavimo z vektorjem, položenim tangencialno na silnico električnega polja v izbrani točki. $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{e}$
jakost magnetnega polja	<i>magnetic field strength</i>	je vektorska količina, s katero je določeno magnetno polje (SISJ, 2015). Vrednost jakosti magnetnega polja je v vakuumu določena z gostoto magnetnega polja, v materialu pa je odvisna od njegove lastnosti.
kabelska kanalizacija	<i>cable duct</i>	je horizontalni gradbenoinženirski objekt, sestavljen iz kanalov, v katerem je nameščen infrastrukturni vod ali cev.
kinematična metoda GNSS-izmere	<i>GNSS kinematic positioning method</i>	je dinamična metoda GNSS-izmere, ki temelji na faznih opazovanjih in sočasni izmeri z dvema sprejemnikoma. En sprejemnik je postavljen na dani točki, z drugim (premičnim) sprejemnikom pa izvajamo izmero (IG, 2010).
kontrolna točka	<i>check point</i>	je točka, ki jo lahko prepoznamo na posnetku, karti, podatkovnem sloju in ima znane koordinate v referenčnem koordinatnem sistemu. Na kontrolnih točkah preverjamo točnost georeferenciranja posnetkov (Grigillo, 2009).

Pojem	Angleški izraz	Opis
korelacijski koeficient	<i>correlation coefficient</i>	<p>je mera linearne povezanosti med dvema spremenljivkama. Linearne zato, ker meri »zgoščenost« razsevnega grafikona okoli premice. Njegova vrednost je vedno med -1 in 1, pri čemer absolutna vrednost koeficienta meri moč povezanosti in predznak smer. Čim bliže je korelacijski koeficient -1 ali 1, tem bolj zanesljivo lahko iz vrednosti ene spremenljivke napovemo vrednost druge spremenljivke.</p> $r_{(x,y)} = \frac{C_{(x,y)}}{\sigma_{(x)}\sigma_{(y)}}$ <p>Če je povezava med spremenljivkama linearna in je korelacijski koeficient blizu 0, nam poznavanje vrednosti ene spremenljivke ne pomaga napovedati vrednosti druge (Blejec et al., 2003; Turk, 2011).</p>
koren srednjega kvadratnega pogreška	<i>root mean square error</i>	<p>je mera za odstopanje slučajne spremenljivke od neke standardne oziroma privzete referenčne vrednosti. Predstavlja kvadratni koren srednjega kvadratnega pogreška. Izračunamo ga:</p> $RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_p)^2}$ <p>kjer je x_i posamezna vrednost slučajne spremenljivke z n členi, x_p pa standardna oziroma privzeta vrednost. RMS-pogrešek je uporaben kot mera točnosti (Frančula in Lapaine, 2003). Opazovanja, ki od srednje vrednosti odstopajo za več od trikratnika te vrednosti, se navadno obravnavajo kot grobe napake (IG, 2010). Glej srednji kvadratni pogrešek.</p>
kovarianca	<i>covariance</i>	<p>je mera linearne odvisnosti dveh slučajnih spremenljivk (Turk, 2011).</p> $C_{(x,y)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x) \cdot (y_i - \mu_y)$
latenca	<i>latency</i>	<p>je čas od dražljaja do reakcije na dražljaj (SISJ, 2015). V primeru povezovanja dveh sistemov jo lahko razumemo kot časovni interval od oddaje sporočila v prvem sistemu do sprejema sporočila v drugem sistemu.</p>
lateralna refleksija	<i>lateral reflection</i>	glej refleksija.
linearna regresija	<i>linear regression</i>	Glej regresijska analiza.
magnetna permeabilnost	<i>magnetic permeability</i>	je razmerje med gostoto magnetnega polja v snovi in gostoto magnetnega polja v praznem prostoru (SISJ, 2015).

<i>Pojem</i>	<i>Angleški izraz</i>	<i>Opis</i>
magnetna susceptibilnost	<i>magnetic susceptibility</i>	<p>(1) je snovna konstanta, ki izraža stopnjo magnetizacije v magnetnem polju (Pavšič, 2006).</p> <p>(2) je brezdimenzijska količina. V splošnem je tenzor 2. reda, ki pa ima za izotropne snovi le diagonalne elemente. Iz zgodovinskih razlogov ponavadi zapišemo magnetno susceptibilnost kot $\chi_M = \mu - 1$, kjer smo vpeljali še magnetno permeabilnost μ (Podgornik in Vilfan, 2012).</p>
material, gradivo	<i>material</i>	<p>(1) kar se uporablja za izdelavo česa; snov, surovina za gradnjo, graditev (SISJ, 2015).</p> <p>(2) je katera koli trdna snov, ki se uporablja za gradnjo (npr. voziških konstrukcij, posteljic).</p>
medij		<p>(1) je snov, sredstvo, zlasti kot nosilec fizikalnih ali kemičnih procesov (SISJ, 2015).</p> <p>(2) je zmes materialov z različnimi fizikalnimi lastnostmi. Sestavljen je iz ene ali več plasti, katerih osnovni gradnik je posamezen material. V primeru voziških konstrukcij in posteljic so materiali razporejeni v horizontalnih plasteh (npr. voziška konstrukcija, posteljica in temeljna tla predstavljajo enoten medij za širjenje EMV).</p>
mejna frekvenca	<i>cut-off frequency</i>	je izbrana frekvenca, od katere se odstranijo zelo nizke ali zelo visoke frekvence. <i>Glej</i> pasovni filtri.
metoda širokokotne refleksije	<i>wide angle method; WA method</i>	je način izvajanja georadarske meritve, ki temelji na statični in premikajoči se anteni vzdolž georadarskega profila (Tillard in Dubois, 1995). Metoda omogoča merjenje hitrosti širjenja EMV v mediju. <i>Glej</i> georadarska meritev.
metoda skupne središčne točke	<i>common mid-point method; CMP method</i>	je način izvajanja georadarske meritve, kjer se razdalja med oddajno in sprejemno anteno sistematično povečuje v obe smeri, pri čemer se ohranja točka odboja signalov v središčni točki (Tillard in Dubois, 1995; Onishi et al., 2005). Metoda omogoča merjenje hitrosti širjenja EMV v mediju. <i>Glej</i> georadarska meritev.
migracija	<i>migration</i>	<p>(1) je postopek, pri katerem iz georadarskega profila ničelnega odmika dobimo migriran profil, v katerem so refleksije v pravem prostorskem položaju (Gosar in Ravnik, 2007).</p> <p>(2) je funkcija digitalne obdelave signalov oziroma radargrama, ki postavi refleksije v pravi prostorski položaj.</p>
monostatična antena	<i>monostatic antenna</i>	je antena, kjer sta oddajna in sprejemna antena združeni v skupno anteno za oddajanje in sprejemanje (EuroGPR, 2015).

<i>Pojem</i>	<i>Angleški izraz</i>	<i>Opis</i>
nadmorska višina	<i>height above sea level; altitude</i>	je višina točke nad geoidom oziroma nad srednjim nivojem morja in je definirana z geometrično (višinsko) razliko in s težnostnim pospeškom. Nadmorske višine so normalne-ortometrične višine (IG, 2010).
naklon	<i>inclination</i>	je kot med vodoravno ravnino georadarja in smerjo proti določeni točki, ki leži višje ali nižje od te ravnine (SISJ, 2015).
nazivna (nominalna) osna obremenitev	<i>nominal axle load</i>	je (standardna, nominalna) obremenitev enojne osi vozila s 100 kN, ki se prenaša z dvojnimi kolesi (4 × 25 kN) na vozno površino; opredeljena je kot osnova za primerjave vpliva različnih osnih obremenitev (TSC 06.520:2009, 2009).
natančnost	<i>precision</i>	je stopnja medsebojne skladnosti ponovljenih opazovanj iste količine. Glede na centralno tendenco (težišče) opazovanj je določena z ustreznimi merami. Mera za natančnost je lahko standardni odklon.
neposredni podpovršinski val	<i>direct transmitter to receiver wave</i>	je zelo plitvo podpovršinsko EMV, ki ga GPR-antena sprejme neposredno od oddajne GPR-antene.
ničelna referenčna hiperbola	<i>zero fitting hyperbola</i>	je na radargramu prepoznani objekt s premerom blizu nič, ki ga uporabimo za referenco oziroma izhodišče pri določevanju premerov na podlagi spreminjanja oblike in velikosti preiskovanega objekta.
nizkoprepustni filter	<i>low-pass filter</i>	je filter, ki prepušča vse nižje in odstrani vse višje frekvence od določene mejne frekvence (EuroGPR, 2015).
normalna ortometrična višina	<i>normal-orthometric heights</i>	je definirana na podlagi predpostavk (računskih modelov) o težnostnem polju in je določena brez izmerjenih vrednosti težnostnega pospeška. V slovenskem državnem višinskem sistemu so podane v sistemu normalnih ortometričnih višin z navezavo na višinski datum Trst. V praksi se za normalne-ortometrične višine uporablja izraz nadmorske višine (IG, 2010)
notranja antenska refleksija	<i>feed-point reflection</i>	glej refleksija.
odstranitev zamika signala	<i>DC shift; DC removal</i>	je filter, ki postavi oziroma premakne izhodišče časovne skale posamezne sledi radargrama nazaj na mesto ničelnega časa.
ortofoto	<i>orthophoto</i>	(1) tudi ortofotografija, ortofotokarta; fotogrametrični izdelek, ki ga dobimo s transformacijo posnetka v ortogonalno projekcijo (Kosmatin Fras, 2004). (2) je fotografija oziroma posnetek zemeljskega površja. Geometrično je popravljena z uporabo kontrolnih točk in DMR. Ortofoto je podoben kot karta uporaben za neposredno merjenje (Podobnikar, 2001).

<i>Pojem</i>	<i>Angleški izraz</i>	<i>Opis</i>
oslonilna točka	<i>control point</i>	je točka, ki jo lahko prepoznamo na posnetku, karti, podatkovnem sloju in ima znane koordinate v referenčnem koordinatnem sistemu. Oslonilne točke služijo za georeferenciranje (Grigillo, 2009).
pasovna širina	<i>bandwidth</i>	predstavlja razpon frekvence oziroma širino frekvenčnega spektra. Pasovno širino lahko definiramo kot razmerje zgornjih frekvenc proti spodnjim ali kot kvocient frekvenčnega pasu in centralne frekvence. GPR-sistemi uporabljajo dipolne antene s tipično pasovno širino oziroma spektrom oddanih frekvenc 1,5–2-kratnik centralne frekvence antene (Conyers, 2013).
pasovni filtri, pasovnoprepustni filtri	<i>band-pass filters</i>	so filtri, ki odstranijo zelo nizke in zelo visoke frekvence, od izbranih mejnih frekvenc, pri čemer se ohranja srednji razpon frekvence (EuroGPR, 2015). Pasovnoprepustni filtri izostrijo (slabjenje nizkofrekvenčnih шумov), hkrati pa zgladijo, odstranijo шум v obliki sneženja (slabjenje visokofrekvenčnih шумov) iz radargramov. Delujejo tako v frekvenčni (angl. Bandpass frequency filter) kot v časovni (npr. angl. bandpass Butterworth filter) domeni.
planum	<i>formation</i>	pomeni površino nosilnih tal posteljice z določenimi predpisanimi značilnostmi kakovosti (višina, ravnost, zgoščenost, nosilnost) (TSC 06.300/06.410:2009, 2009).
polarna metoda detajlne izmere		pomeni izračun koordinat detajlnih točk na osnovi neposredno merjenih relativnih prostorskih polarnih koordinat detajlnih točk. Koordinatni sistem določa stojišče instrumenta in eno ali več orientacijskih smeri. Položaj detajlne točke je določen na podlagi sočasnega merjenja horizontalnega kota, zenitne razdalje in poševne dolžine do detajlne točke. Pri meritvah uporabljamo elektronske tahimetre (IG, 2006). <i>Glej elektronski tahimeter.</i>
popravek ničelnega časa	<i>time zero correction</i>	je filter oziroma postopek, ki poravna sledi na skupni ničelni čas. Zamik ničelnega časa se pojavi zaradi inherentnih lastnosti elektronike, ki generira signal, odmika antene od tal in spremembe električnih lastnosti medija, skozi katerega potuje EMV.
posteljica	<i>capping layer; sub-base</i>	je vrhnja (zaključna) plast nasipa ali temeljnih tal, debela do 50 cm, s posebnimi lastnostmi (povečana nosilnost, zmanjšana občutljivost na učinke mraza), doseženimi z ustreznimi gradbenotehničnimi ukrepi (izboljšava, utrditev, stabiliziranje) (TSC 06.520:2009, 2009).
prazen prostor ali vakuum	<i>vacuum</i>	je prostor brez molekul, atomov ali podatomskih delcev. Popolnega vakuumu ni mogoče ustvariti, zato tudi prostor z zelo nizkim tlakom glede na zračnega imenujemo vakuum.
prekrivanje	<i>overlap</i>	je delež površja, ki ga pokrivata posnetka, posneta iz sosednjih položajev (Oštir, 2006).

<i>Pojem</i>	<i>Angleški izraz</i>	<i>Opis</i>
prepoznavanje hiperbol	<i>hyperbola classification</i>	je prostorsko prepoznavanje in razvrščanje hiperbol na radargramu.
prometna obremenitev	<i>traffic loading</i>	pomeni število vozil, ki v določenem časovnem intervalu prevozijo posamezen merski prerez na cesti (Juvanc in Rijavec, 2005).
prostorska ločljivost	<i>spatial resolution</i>	(1) predstavlja velikost najmanjšega predmeta, ki ga na podobi zaznamo (Oštir, 2006). (2) je sposobnost georadarskega sistema ločevati od medija dielektrično različne ciljne objekte. Prostorska ločljivost je sestavljena iz vertikalne Δ_v in horizontalne Δ_l ločljivosti. Prostorska ločljivost v mediju je odvisna od električnih lastnosti medija in dušenja (zmanjševanje amplitude z globino oziroma oddaljenostjo od antene) (Rial et al., 2009; EuroGPR, 2015).
prostorski filter	<i>spatial filters</i>	je filter, delujoč na eni ali več radargramskih sledih hkrati v izbranem intervalu razdalje (Jol, 2009).
radargram	<i>B-scan; radargram</i>	predstavlja 2D-grafični prikaz zaporedno združenih refleksijskih sledi. Razumemo ga lahko kot 2D-grafično predstavitev časovne odvisnosti amplitude odbitih signalov (Shahbaz-Khan, 2011; Conyers, 2013).
razmik med sledmi	<i>step size; scan rate; station interval</i>	je razdalja oziroma razmik med točkami, kjer se izvede proženje impulza vzdolž posameznega georadarskega profila (EuroGPR, 2015). V časovnem načinu zajema je razmik med sledmi odvisen od hitrosti gibanja vzdolž profila in se podaja v sledih na sekundo, medtem ko se v dolžinskem načinu podaja v sledih na meter. Razmik med sledmi podaja gostoto oziroma horizontalno frekvenco vzorčenja nad površino.
razsežnost	<i>dimension</i>	je dimenzija (1-, 2-, 2,5-, 3- in večrazsežnostno). Razsežnost prostora, matrike, tabele, parametra (Podobnikar, 2001).
refleksija; odboj	<i>reflection</i>	(1) je pojav, ko se spremeni smer valovanja v prvi snovi ob vpadu na mejo druge snovi (SISJ, 2015). (2) predstavlja del EMV, ki se na mejnih ploskvah z različnimi relativnimi dielektričnostmi odbije. Delež EMV, ki se odbije na meji dveh različnih materialov oziroma snovi (npr. cevi – cilindričnega reflektorja in medija), je odvisen predvsem od relativne dielektričnosti (manj od električne prevodnosti in magnetne permeabilnosti) in razmerja med valovno dolžino EMV, ki je določena s frekvenco oddajne antene in velikostjo reflektorja. Glede na tip reflektorja (lateralni – meja med pasovi voziščnih konstrukcij, točkovni) ali vrsto refleksije (npr. notranja antenska refleksija), refleksije tudi poimenujemo: lateralna refleksija, refleksija v obliki hiperbole ali notranja antenska refleksija.

<i>Pojem</i>	<i>Angleški izraz</i>	<i>Opis</i>
refleksijska hiperbola; odbojna hiperbola	<i>reflection hyperbole</i>	je tipični odboj od točkastega objekta, ki se kaže v obliki odbojne oziroma refleksijske hiperbole na radargramu.
referenčna točka	<i>reference point</i>	je točka (temenska točka), ki ima znane koordinate v referenčnem koordinatnem sistemu. Koordinate referenčnih točk prevzamemo kot prave vrednosti pri oceni točnosti rezultatov pridobljenih z georadarsko metodo.
regresijska analiza	<i>regression analysis</i>	<p>je prilagajanje ustrezne matematične funkcije empiričnim podatkom. To funkcijo imenujemo regresijska funkcija (Kovačič, 2014). Je statistični proces, ki raziskuje vpliv ene ali več neodvisnih spremenljivk na odvisno spremenljivko. Odvisnost je mogoče izraziti v obliki regresijske enačbe. Slučajno spremenljivko Y lahko zapišemo kot vsoto dveh spremenljivk, kjer spremenljivko X imenujemo neodvisna spremenljivka, slučajno spremenljivko Y pa odvisna spremenljivka, ter ϵ napaka (ali slučajno odstopanje). Če je regresijska funkcija linearna, zapišemo regresijsko enačbo:</p> $Y = f(X) + \epsilon = a + bX + \epsilon$ <p>Z linearno regresijo določimo tiste vrednosti ocen \hat{a} in \hat{b}, da je prileganje regresijske premice spremenljivkam čim boljše.</p> <p>Če zveza med dvema spremenljivkama ni linearna, lahko zapišemo npr. preprosto regresijsko enačbo:</p> $Y = f(X, a, b) + \epsilon = a + bX^2 + \epsilon$ <p>Kjer z nelinearno regresijo določimo tiste vrednosti ocen \hat{a} in \hat{b}, da je prileganje regresijske krivulje spremenljivkam čim boljše (Turk, 2011).</p>
regresijska krivulja	<i>curve fitting; polynomial regression</i>	<i>Glej regresijska analiza.</i>
relativna dielektrična permitivnost; relativna dielektričnost	<i>relative dielectric permittivity; relative permittivity</i>	je razmerje specifične dielektričnosti snovi in dielektričnosti praznega prostora. Tako definirana relativna dielektričnost je brezrazsežno realno število, večje ali enako od 1 (Jol, 2009). Terminološko navajanje oziroma opredeljevanje relativne dielektrične permitivnosti ϵ_r je precej široko. Conyers (2013) jo navaja kot relativno dielektrično permitivnost, Jol (2009) kot relativno permitivnost, Podgornik in Vilfan (2012) ter Malmberg in Maryott (1956) kot dielektrično konstanto, medtem ko se v slovenščini najpogosteje pojavlja kot dielektričnost oziroma relativna dielektričnost (Kokalj in Vrščaj, 2011).

<i>Pojem</i>	<i>Angleški izraz</i>	<i>Opis</i>
segmentacija	<i>segmentation</i>	(1) je postopek delitve podobe na homogena območja (množice sosednjih slikovnih elementov). Segmentacija je navadno prvi korak predmetno usmerjene klasifikacije (Oštir, 2006). (2) gre za razmejevanje podobe na homogena območja z združevanjem sosednjih slikovnih elementov s podobnimi funkcijskimi vrednostmi (npr. barva, kontrast, tekstura).
signal	<i>signal</i>	je v splošnem vsako valovanje ali pulz. Ponavadi z izrazom signal označujemo podatke, ki jih dobimo pri opazovanju, tako pred in med zajetjem, kot tudi pri nekaterih poznejših obdelavah (Oštir, 2006).
sipanja	<i>scattering</i>	pojav, pri katerem vzbudi elektromagnetno valovanje, ki doseže objekt (na primer v mediju), nihanje nabitih delcev v njih. Ti sevajo sipano elektromagnetno valovanje na vse strani (Oštir, 2006).
sled	<i>trace</i>	je posamezna vertikalna linija z danim položajem na radargramu. Prikazuje spreminjanje amplitude odboja kot funkcijo dvojnega časa potovanja signala od oddajnika do sprejemnika (antena) (Jol, 2009).
slikovno ujemanje	<i>image matching</i>	je postopek, v katerem iščemo identične refleksije (vzorci) na dveh ali več radargramih. Za mero slikovnega ujemanja radargramov lahko uporabimo različne kriterije, npr. korelacijski koeficient in srednji kvadratni pogrešek (MSE).
snop eliptičnega stožca		<i>Glej Fresnelova cona.</i>
srednji kvadratni pogrešek	<i>mean square error</i>	je statistični način podajanja točnosti. Predstavlja mero za odstopanje slučajne spremenljivke od neke standardne oziroma privzete referenčne vrednosti. Izračunamo ga: $MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_p)^2$ kjer je x_i posamezna vrednost slučajne spremenljivke z n členi, x_p pa standardna oziroma privzeta vrednost.
standardna elipsa zaupanja	<i>standard deviation ellipse, confidence ellipse</i>	(1) je standardni odklon v 2D (Podobnikar, 2001). (2) je način podajanja razpršenosti 2D-populacije (npr. natančnosti para horizontalnih koordinat). Elipsa je podana s tremi parametri: veliko polosjo elipse (a), malo polosjo elipse (b) ter azimutom velike polosi (θ); gre za elipso, znotraj katere je 39,4 odstotka vseh parov slučajnih spremenljivk iz 2D-populacije (IG, 2010).

Pojem	Angleški izraz	Opis
standardni interval zaupanja	<i>confidence interval</i>	je način podajanja razpršenosti enorazsežne populacije (npr. natančnosti koordinate). Interval je podan z dvakratno vrednostjo dolžine, ki jo določa standardni odklon (σ); gre za interval, znotraj katerega je 68,3 odstotka vseh slučajnih spremenljivk iz 1D-populacije (IG, 2010).
standardni odklon	<i>standard deviation, middle error (v geodeziji)</i>	je mera za natančnost, mera variabilnosti: tudi standardna deviacija. $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2}{n - 1}}$ <p>To je standardiziran odklon (raztros rezultatov) od srednje vrednosti (težišča) in je izračunan kot povprečje kvadratov odklonov določenih vrednosti od aritmetične sredine. Mero je uvedel K. Pearson leta 1893 (Podobnikar, 2001).</p>
šum	<i>noise</i>	je nezaželen element, ki zmanjšuje jasnost signala (Oštir, 2006).
»terenska« ojačitev	<i>header gain</i>	je en ali niz postopkov ojačitve radargramov že v fazi opazovanja oziroma izvedbe na terenu.
terestrična metoda izmere	<i>terrestrial surveying</i>	je detajlna izmera, ki pomeni zajemanje numeričnih koordinat detajlnih točk v lokalnem polarnem in ortogonalnem koordinatnem sistemu. Poznani in splošno uveljavljeni sta polarna in ortogonalna metoda detajlne izmere (IG, 2006). <i>Glej polarna metoda detajlne izmere.</i>
težišče; aritmetična sredina	<i>mean</i>	predstavlja standardno mero centralne tendence številske spremenljivke (Košmelj, 2001), npr. parov koordinatnih odstopanj (aritmetična sredina odstopanj).
točnost	<i>accuracy</i>	je stopnja ustreznosti merjene ali izračunane količine glede na njeno pravo vrednost oziroma glede na vrednosti, ki jih prevzamemo kot resnične. Poleg vplivov slučajnih pogreškov vključuje tudi vpliv sistematičnih pogreškov, ki jih nismo odstranili iz opazovanj. Mero točnosti predstavlja RMSE kot odstopanje od referenčnih točk (Hohle in Potuckova, 2011; Podobnikar, 2001).
trajektorija	<i>trajectory</i>	je krivulja, ki opisuje pot točke v 3D-prostoru od začetka do konca opazovanja (ZRCSAZU, 2016).
ujemanje hiperbole	<i>hyperbola fitting</i>	je prilagajanje oblike in velikosti prepoznane hiperbole na radargramu.
valovna dolžina	<i>wavelength</i>	je razdalja med dvema sosednjima točkama v smeri širjenja valovanja, v katerih je nihanje v valovanju sočasno. Valovna dolžina je obratno sorazmerna s frekvenco valovanja (EuroGPR, 2015; Oštir, 2006).

<i>Pojem</i>	<i>Angleški izraz</i>	<i>Opis</i>
vertikalna ločljivost	<i>vertical resolution</i>	predstavlja najmanjšo vertikalno oddaljenost med bližnjima ciljima objektoma v vertikalni smeri, da jih je mogoče še razlikovati in obravnavati kot dva ločena objekta (Millard et al., 2002).
visokoprepustni filter	<i>high-pass filter</i>	je filter, ki prepušča vse višje in odstrani vse nižje frekvence od določene mejne frekvence (EuroGPR, 2015).
volumenski delež vode	<i>volumetric water content</i>	pove, kakšen je volumen vode glede na skupni volumen medija ali volumen posamezne plasti v mediju.
vozišče	<i>carriageway</i>	je enakomerno neprekinjeno utrjeni del cestišča, primeren za vožnjo vozil (TSC 06.520:2009, 2009).
voziščna konstrukcija	<i>pavement</i>	je del utrditve prometne površine, ki sestoji iz enega ali več nosilnih plasti in obrabne plasti; prevzema in prenaša prometne obremenitve na posteljico in/ali podlago (nasip, temeljna tla) ter preprečuje pronicanje vode do podlage (SCI, 2015).
vzorčenje	<i>sampling rate</i>	(1) je postopek zajemanja zveznega signala v diskretnih trenutkih, katerega rezultat je vzorčeni signal, določen samo v teh trenutkih, ki se uporablja npr. v sistemih digitalnega vodenja (SISJ, 2015). (2) podaja število vzorcev na časovno enoto. Najpogosteje izbrane vrednosti so 128, 256, 512, 1024 in 2048 vzorcev na sled.
vzorec	<i>sample point</i>	je vrednost amplitude signala določene vzdolž sledi v izbrani točki (EuroGPR, 2015).
zaščitna cev	<i>pipe duct</i>	je cev, namenjena fizični zaščiti nameščenih vodov in/ali cevi v njej.
zračni valovi	<i>air waves</i>	so valovi EMV, ki jih generira GPR-antena sama ali imajo izvor v zunanem viru. Najpogosteje so predstavljeni z odboji od predmetov na površini (grajeni objekti, drevesa, daljnovodi itd.), imenovani tudi zračni odboji.
zvonjenje antene	<i>antenna ringing</i>	je nadaljevanje oddajanja impulza v medij, kljub predhodnemu zaključku njegovega proženja. GPR-antena v teoriji ustvarja in proži v časovnem zaporedju kratke visokofrekvenčne elektromagnetne impulze. Vendar v realnosti antena oddaja impulz v medij še po končanju njegovega proženja, zaradi notranjih antenskih odbojev.

B.2 Seznam oznak

A_i	razred bitumizirane zmesi
a_i	faktor ekvivalentnosti materiala
B	gostota magnetnega polja
B	pasovna širina
c_0	hitrost EMV v praznem prostoru
D	gostota električnega polja
D_i	debelinski indeks voziščnih konstrukcij
d_i	debeline plasti
dB	decibel
E	električno polje
ε_r	relativna dielektričnost
F_i	razred občutljivosti materiala
F/m	farad na meter
f	frekvenca valovanja
f_c	centralna frekvenca valovanja
H	magnetno polje
H/m	henri na meter
h	globina
h_{min}	mejna skupna debelina plasti vgrajenih materialov proti škodljivim vplivom zmrzovanja
k	valovno število
k	valovni vektor
λ	valovna dolžina
M	magnetizacija
MHz	megahertz
m.-%	masni delež v % (delež mase presejane snovi v primerjavi z maso celotne zmesi)
m_w	masa vode
m_s	masa suhega vzorca
Ωm	ohm-meter
μ	težišče (centralna tendenca)
P	polarizacija
p_i	uporabnost vozne površine na koncu dobe trajanja
R	faktor klimatskih in hidroloških pogojev / polmer ciljnega objekta
ρ_w	gostota vode
ρ_b	gostota tal
r	korelacijski koeficient
r^2	determinacijski koeficient
S/m	siemens na meter
σ	standardni odklon
T	perioda valovne dolžine
T_n	doba trajanja voziščne konstrukcije ($n = \text{leta}$)
t	čas
V_b	volumen vzorca tal
Z_i	razred zmesi kamnitih zrn

B.3 Seznam kratic

<i>Slovenska kr.</i>	<i>Angleška kr.</i>	<i>Pomen</i>
2D	2D	Dvo-razsežnostni prostor / Two-dimensional space
3D	3D	Tri-razsežnostni prostor / Three-dimensional space
	AASHO	Ameriško združenje za državne avtoceste in transport / American Association of State Highway and Transportation
AC	AC	Bitumenski beton / Asphalt Concrete
	AGC	– / Automatic Gain Control
	ASCE	Ameriško združenje gradbenih inženirjev / American Society of Civil Engineers
	ASCII	Ameriški standardni nabor za izmenjavo informacij / American Standard Code for Information Interchange
AIT		Sistem za avtomatsko iskanje tarče
AST		Sistem za avtomatsko sledenje tarče
AVT	ATR	Sistem za avtomatsko viziranje tarče
BPS	UAV	Mali brezpilotni letalnik / Unmanned Aerial vehicle
	CBR	Kalifornijski indeks nosilnosti / California bearing ratio
	CRIM	Model kompleksnega refrakcijskega indeksa / Complex Refractive Index Model
	DGNSS	– / Differential Global Navigation Satellite System
DMR	DTM	Digitalni model reliefa / Digital Terrain Model
DMP	DSM	Digitalni model površja / Digital Surface Models
DN/ID	DN/ID	Nazivni premer – notranji premer / Diameter nominal-inside diam.
DN/OD	DN/OD	Nazivni premer – zunanji premer / Diameter nominal-outside diam.
	DST	– / Distance (Reflexw file format)
	DZT	– / Data (GSSI data file format)
EMV	EMR	Elektromagnetno valovanje / Electromagnetic radiation
ETRS89	ETRS89	Evropski terestrični referenčni sistem 1989 / European Terrestrial Reference System 1989
FGG		Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo / Faculty of civil engineering and geodesy
MSE	MSE	Srednji kvadratni pogrešek / Mean Squared Error
	NMEA GGA	– / National Marine Electronics Association Global Positioning System (format standard)
	NMAD	Normalizirana mediana absolutnih odklonov / Normalised Median Absolute Deviation
NOO	NOO	Nazivna (nominalna) osna obremenitev / Nominal axle load
	RTK	– / Real Time Kinematic
TD (D)		Tamponski drobljenec (drobljenec)
	TDR	– / Time Domain Reflectometry
TE	TE	Transverzalni električni valovi / Transverse Electric Waves
TM	TM	Transverzalni magnetni valovi / Transverse Magnetic Waves
	TMF	– / Time Marks File
	TPS	– / Terrestrial Positioning System
	GGA	– / Global Positioning System Fix Data
GI		Gospodarska infrastruktura
GIS	GIS	Geografski informacijski sistem / Geographic(al) Information System

<i>Slovenska kr.</i>	<i>Angleška kr.</i>	<i>Pomen</i>
GNSS	GNSS	Globalni navigacijski satelitski sistemi / Global Navigation Satellite System
	GPR	– / Ground Penetrating Radar
	GSM	– / Global System for Mobile communications
	GSSI	– / Geophysical Survey System, Inc.
GURS		Geodetska uprava Republike Slovenije / Surveying and mapping authority of the Republic of Slovenia
	LAN	– / Local-Area Network
LC		Lokalna cesta
LG		Glavne mestne ceste
LK		Krajevne ceste
LZ		Zbirne krajevne ceste
PE	PE	Polietilen / Polyetylen
PP	PP	Polipropilen / Polypropylene
PVC	PVC	Polivinil klorid / Polyvinyl chloride
R1		Regionalna cesta I. reda
R2		Regionalna cesta II. reda
R3		Regionalna cesta III. reda
RC		Regionalna cesta
	RLPS	Rotary Laser Positioning System
RMSE	RMSE	Koren srednjega kvadratnega pogreška / Root mean square error
SDR	SDR	Standardno dimenzijsko razmerje / Standard dimension ration
	SEC	– / Spherical Exponential Compensation
SIGNAL		SlovenIja-Geodezija-NAvigacija-Lokacija / -
	UHF	– / Ultra High Frequencies
	UNCC	– / Utility Notification Center of Colorado
URL	URL	Enolični krajevnik vira / Uniform Resource Locator
	VHF	– / Very High Frequencies
VRS	VRS	Virtualna referenčna postaja / Virtual Reference Station
ZKGJI		Zbirni kataster gospodarske javne infrastrukture

»Ta stran je namenoma prazna«

LITERATURA IN VIRI

Abdel-Qader, I., Krause, V., Abu-Amara, F., Abudayyeh, O. 2014. Comparative study of deconvolution algorithms for GPR bridge deck imaging. *WSEAS Transactions on Signal Processing*, 10 (1), str: 9–20.

<http://www.wseas.org/multimedia/journals/signal/2014/a065714-104.pdf> (Pridobljeno 14. 6. 2014.)

Alharthi, A., Lange J., 1987. Soil Water Saturation: Dielectric Determination. *Water Resources Research*, 23, str: 591–595.

doi.org/10.1029/WR023i004p00591

Al-Nuaimy, W. 1999. Automatic feature detection and interpretation in ground-penetrating radar data. Doktorska disertacija. Univerza v Liverpoolu, Liverpool, Velika Britanija.

ftp://ftp.liv.ac.uk/pub/AlNuaimy/Thesis/AlNuaimy_thesis.pdf

Anderson, T. W., Darling, D. A. 1954. A Test of Goodness-of-Fit. *Journal of the American Statistical Association*, 49, str: 765–769.

Annan, P. A. 2011. *Topographic Correction of GPR Data, Principles, Procedures And Applications*. Sensors&Software Inc, Mississauga.

Annan, P. A. 2003. *Ground Penetrating Radar, Principles, Procedures and Applications*. Sensors and Software Inc, Mississauga, ON, Canada.

Annan, P. A. 2002. GPR—History, trends, and future developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications* 3(4), str.: 1–253.

dx.doi.org/10.1023/A:1020657129590

Anspach, J. H. 2010. Collecting and Converting 2-D Utility Mapping to 3-D. *Pipelines 2010: Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability: Renew, Rehab, and Reinvest*, ASCE, Colorado, str.: 278–284.

[doi.org/10.1061/41138\(386\)28](https://doi.org/10.1061/41138(386)28)

Ambroš, F. 1988. *Katastar telefonskih vodova*. Magistrska naloga, Zagreb, Univerza v Zagrebu, Fakulteta za geodezijo.

Asmussen, L. E., Perkins, H. F., Allison, H. D. 1986. Subsurface description by ground penetrating radar for watershed delineation. *Georgia Agricultural Experiment Station, University of Georgia, Athens, Georgia, Združene države Amerike, Research Bulletin 340*, str: 1–15.

Barzaghi, R., Cazzaniga, N., Pagliari, D., Pinto, L. 2016. Vision-Based Georeferencing of GPR in Urban Areas. *Sensors*, 16(132), str.:1–13.

[doi:10.3390/s16010132](https://doi.org/10.3390/s16010132)

Beck, A., Cohn, A. G., Parker, J., Boukhelifa, N., Fu, G. 2009. Seeing the unseen: delivering integrated underground utility data in the UK, *The GeoWeb Conference*, Vancouver, Institute of Geodesy and Geoinformation Science, str.: 16–24.

<http://www.comp.leeds.ac.uk/mtu/pubs/GeoWeb09.doc> (Pridobljeno 14. 2. 2015.)

- Benedetto, A., Benedetto, F., De Blasiis, M. R., Giunta, G. 2005. Reliability of signal processing technique for pavement damages detection and classification using ground penetrating radar. *IEEE Sensors Journal*, 5(3), str.: 471–480.
doi.org/10.1109/JSEN.2005.846176
- Birchak, J. R., Gardner, C. G., Hipp, J. E., Victor, J. M. 1974. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture, *Proceedings of the IEEE*, 62, str: 93–98.
doi.org/10.1109/PROC.1974.9388
- Boniger, U., Tronicke, J. 2010. On the Potential of Kinematic GPR Surveying Using a Self-Tracking Total Station: Evaluating System Crosstalk and Latency. *Geoscience and Remote Sensing*, 48, str.: 3792–3798.
doi.org/10.1109/TGRS.2010.2048332
- Brezigar, A., Tomšič, B., Štern, J., Rašković, G. (1995). Georadar – visokoločljiva geofizikalna elektromagnetna naprava. *Geologija* 37(38), str.: 437–458.
- Bristow, C. S., Jol, H. M. 2003. An introduction to ground penetrating radar (GPR) in sediments. Geological Society, London, Velika Britanija, 319 str.
- Cabrera, D., A., Herrera, Izquierdo, Pérez-García, R. 2013. Location of buried plastic pipes using multi-agent support based on GPR images. *Journal of Applied Geophysics* 75, str.: 679–686.
doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.024
- Caratelli, D., Yarovoy, A., Ligthart, P. L. 2008. Full wave modeling of buried pipe detection with low-frequency ground penetrating radar. Orfeus publications, Delft University of Technology, The Neatherland, str.: 177–182.
http://www.orfeus-project.eu/publications/modeling_buried_pipe_detection_IWAGPR09.pdf
(Pridobljeno 21. 1. 2015.)
- Collins, M. E., Doolittle, J. A., Rourke, R. V. 1989. Mapping depth to bedrock on glaciated landscape with ground penetrating radar. *Science Society of America Journal*, 53, str: 1806–1812.
doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300060032x
- Conyers, L. B. 2013. *Ground-Penetrating Radar for Archaeology – Third Edition*. Altamira Press, Lanham, Združene države Amerike, str.: 241.
- Conyers, L. B., Goodman, D. 1997. *Ground-Penetrating Radar. An Introduction for Archaeologists*. Altamira Press, Walnut Creek, Združene države Amerike, 238 str.
- Cheng, N-F., Tang, H-W., Chan, C-T. 2013. Identification and positioning of underground utilities using ground penetrating radar (GPR). *Sustainable Environment Research*, 23(2), str.: 141–152.
- Clark, Anthony J. 1996. *Seeing Beneath the Soil. Prospecting Methods in Archaeology*. London, United Kingdom, 192 str.
doi.org/10.4324/9780203164983

Clark, D. A., Emerson, D. W., 1991. Notes on rock magnetization characteristics in applied geophysical studies. *Exploration Geophysics*, 22(3), str.: 547–555.
doi.org/10.1071/eg991547

D'Agostino, R. B., Stephens, M. A. 1986. *Goodness of fit Tehnique*, New York: Marcel Dekker.

Daniels, D. J., Gunton, D. J., Scott, H. F. 1988. Introduction to subsurface radar. *IEE Proceedings* 135(4), str.: 278–320.
doi.org/10.1049/ip-f-1:19880038

Daniels, D. J. 2004. *Ground-penetrating radar*, 2nd ed. London, The Institution of Electrical Engineers: 726 str.

Davis, J. D., Annan, A. P. 1989. Ground-enetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37(5), str.: 531–551.
doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x

Diamanti, N., Redman, D. 2012. Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks. *Journal of Applied Geophysics*, 81, str.: 106–116.
doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.006

Dimc, F., Mušič, B., Osredkar, R. 2008. An example of an integrated GPS and DR positioning system designed for archaeological prospecting = Primer integriranega lokacijskega sistema GPS in seštevne navigacije, namenjenega arheološkemu raziskovanju. *Inf. MIDEM*, let. 38(2), str.: 144–148.

Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Hallikainen, M. T., El-Rayes, M. A., (1985). Microwave dielectric behaviour of wet soil. Part II. Dielectric mixing models. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 23, str: 35–46.
doi.org/10.1109/TGRS.1985.289498

Dolphin, L. T., Tanzi, J. D., Beatty, W. B. 1978. Radar probing of Victorio Peak, New Mexico. *Geophysics* 43, str.: 1441–1448.
doi.org/10.1190/1.1440906

Driksen, C. 1999. *Soil physics measurements*. Reiskirchen, GeoScience Publisher, str.: 154.

Dujardin, J. R, Bano, M. 2013. Topographic migration of GPR data: Examples from Chad and Mongolia. *Comptes Rendus Geoscience*, 345, str.: 73–80.
doi.org/10.1016/j.crte.2013.01.003

Eaves, J. L., Reedy, E. K. 1987. *Principles of Modern Radar*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 226–228, str.: 409–420.

Eisenbeiß, H. 2009. *UAV Photogrammetry*. Doktorska disertacija. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Švica.
http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/blaue_Berichte_PDF/105.pdf (Pridobljeno 1. 8. 2015.)

El Said, M. A. H. 1956. Geophysical prospection of underground water in the desert by means of electromagnetic interference fringes, *Proceedings of the IRE*, 44, str.: 24–30.
doi.org/10.1109/JRPROC.1956.274846

Evans, R. D., Frost, M. W., Stonecliffe-Jones, M., Dixon, N. 2007. Assessment of the in-situ dielectric constant of bituminous pavement materials. *Transportation research record: Journal of the Transportation Research Board*, 2037, str.: 128–135
doi.org/10.3141/2037-12

Fenner, T. J. 1992. Recent advances in subsurface interface radar technology. *Geol. Surv. Finland Special Paper*, 16, str.: 13–19.

Ferre, P. A., Rudolph, D. L., Kachanoski, R. G. 1996. Spatial averaging of water content by time domain reflectometry: implications for twin rod probes with and without dielectric coatings. *Water Resources Research*, 32(2), str: 271–279.
doi.org/10.1029/95WR02576

Fitzgibbon, A., Pilu, M., Fisher, R. 1999. Direct least-squares fitting of ellipses. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 21(5), str.: 476–480.
doi.org/10.1109/34.765658

Fisher, S. C., Stewart, R. R., and Jol, H. 1996. Ground-penetrating radar (GPR) data enhancement using seismic techniques. *Journal Environmental and Engineering Geophysics*, 1, str.: 89–96.
doi.org/10.4133/JEEG1.2.89

Fonseca, L. M. G., Manjunath, B. S. 1996. Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, str.: 1049–1056.
doi.org/10.1007/978-3-642-13681-8_13

Fowler, C. M. R. 2004. *The solid earth: An introduction to global geophysics*: Cambridge Univ., Press, 2. izdaja: 472 str.

Frezza, F., Pajewski, L., Ponti, C., Schettini, G. 2011. Application of the cylindrical wave approach to the simulation of buried utilities. *International Journal of Geophysics*, str.: 1–8.
doi.org/10.1155/2011/974518

Gamse, S. 2010. *Uporaba Kalmanovega filtra pri kinematičnih geodetskih meritvah*. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, str.: 1–96.
http://drugg.fgg.uni-lj.si/783/1/GED_0205_Gamse.pdf (Pridobljeno 4. 12. 2014.)

Gaffney, C., Gater, J. 2003. *Revealing The Buried Past. Geophysics for Archaeologists*. Tempus Publishing Ltd., str.: 192.

Gonzales, R. C., Woods, R. E. 2007. *Digital image processing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, str.: 976.

Goshtasby, A., A. 2005. 2-D and 3-D image registration. 1th Edition. Wiley-Interscience publication: 284 str.

Gosar, A. 2000. Uporabna geofizika: seizmične metode. Ljubljana, Naravoslovnotehniška fakulteta: 74 str.

Gosar, A., Ravnik, D. 2007. Uporabna geofizika: geoelektrika. Ljubljana, Naravoslovnotehniška Fakulteta: 218 str.

Graeff, T., Zehe, E., Schlaeger, S., Morgner, M., Bauer, M., Becker, R., Creutzfeldt, B., Bronstert, A. 2010. A Quality assessment of Spatial TDR soil moisture measurements in homogenous and heterogeneous media with laboratory experiments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, str: 1007–1020.

doi.org/10.5194/hess-14-1007-2010

Grandjean, G., Gourry, J., Bitri, A. 2000. Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: Study on a test site. *Journal of Applied Geophysics*, 45(3), str.: 141–156.

[doi.org/doi:10.1016/S0926-9851\(00\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00021-5)

Grasmueck, M. 1996. 3-D Ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss. *Geophysics*, 61(4), str.: 1050–1064.

doi.org/10.1190/1.1444026

Grasmueck, M., Viggiano, D. A. 2007. Integration of Ground-Penetrating Radar and LaserPosition Sensors for Real-Time 3-D Data Fusion. *Geoscience and Remote Sensing*, 47, str.: 2206–2217.

doi.org/10.1109/TGRS.2006.882253

Greal, M. 2006. Resolution of Ground - penetrating Radar Reflections at Differing Frequencies. University of Denver, Department of Anthropology, Denver, USA. *Archaeological Prospection*, 2006, 13, str.: 142–146.

Grigillo, D. 2009. Samodejno odkrivanje stavb na visokoločljivih slikovnih virih za potrebe vzdrževanja topografskih podatkov. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, str.: 1–156.

http://drugg.fgg.uni-lj.si/781/1/GED_0197_Grigillo.pdf (Pridobljeno 14. 2. 2015.)

Gurbuz, A. C. 2008. Feature detection algorithms in computed images. Doktorska disertacija. Institute of Technology Georgia, Atlanta, Združene države Amerike.

Handayani, G. 2015. Work flow of signal processing data of ground penetrating radar case of rigid pavement measurements. *AIP Conference Proceedings*, 1656 (1).

doi.org/10.1063/1.4917153

Hasan, A. E. 2012. The Use of Ground Penetrating Radar with a Frequency 1 GHz to Detect Water Leaks from Pipelines. In *Proceedings of the 16th International Water Technology Conference (IWTC16)*, Turčija, str.: 1–6.

Hausamann, D., Zirnig, W., Schreier, G., Strobl, P. 2005. Monitoring of gas pipelines – a civil UAV application. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, št. 77(5), str.: 352–360.
doi.org/10.1108/00022660510617077

He, X.-Q., Zhu, Z.-Q., Liu, Q.-Y., Lu, G.-Y. 2009. Review of GPR rebar detection. *PIERS Proceedings*, str.: 804–813.

Heincke, V. 2005. Determination of 3-D fracture distribution on an unstable mountain slope using georadar and tomographic seismic refraction techniques. Doktorska disertacija. ETH Zurich, Swiss Federal Institute of Technology.
doi.org/10.3929/ethz-a-005066509

Herkelrath, W. N., Hamburg, S. P., Murphy, F. 1991. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time-domain reflectometry. *Water Resources Research*, 27, str.: 857–864.
doi.org/10.1029/91WR00311

Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. San Diego, Academic Press, str: 1–794.

Hohle, J., Hohle, M., 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), str.: 398–406.
doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.02.003

Hohle, J., Potuckova, M. 2011. EuroSDR No. 60: Assessment of the Quality of Digital Terrain Models. Official publication of European Spatial Data Research, 60, str.: 1–85.
http://www.eurosd.net/sites/default/files/uploaded_files/60_0.pdf (Pridobljeno 5. 5. 2015.)

Huisman, J. A.; Hubbard, S. S.; Redman, J. D., Annan, A. P., (2003). Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review. *Vadose Zone Journal*, 2, str: 476–491.
doi.org/10.2136/vzj2003.4076

Hyun, S.-Y., Jo, Y.-S., Oh, H.-C., Kim, S.-Y., Kim, Y.-S. 2007. The laboratory scaled-down model of a ground-penetrating radar for leak detection of water pipes. *Measurement Science and Technology*, 18, str.: 2791–2799.
doi.org/10.1088/0957-0233/18/9/008

Jain, S. 1986. Some interesting conclusions from a study of Q-attenuation. *Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysicists*, 22, str.: 17–32.
http://csegjournal.com/assets/pdfs/archives/1986_12/1986_Jain_S_study_q-attenuation.pdf
(Pridobljeno 3. 4. 2015.)

Jaw, S. W., Hashim, M. 2013. Locational accuracy of underground utility mapping using ground penetrating radar. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, str.: 20–29.
doi.org/10.1016/j.tust.2012.11.007.

Jaw, S. W., Hashim, M. 2011. Accuracy of Data Acquisition Approached with Ground Penetrating Radar for Subsurface Utility Mapping. In: *Proceedings of 2011 IEEE International RF and Microwave (RFM 2011)*, Seremban, Malezija, str.: 1–8.

Jaselskis E. J., Grigas J., Brilingas A. 2003. Dielectric properties of asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(5), str.: 427–434.
[doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:5\(427\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:5(427))

Johnson, R. W., Glaccum, R. Wojtasinski, R. 1979. Application of ground penetrating radar to soil survey. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings*, 39, str.: 68–72.
doi.org/10.2136/sh1982.3.0017

Jol, H. 2009. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier B.V. Oxford, Velika Britanija, str: 1–524.

Jurgele, M. 2010. Asfaltne voziščne konstrukcije – kaj prinašajo nove tehnične specifikacije. 10. slovenski kongres o cestah in prometu. Ljubljana, DDC Svetovanje inženiring, d. o. o.: 944 str.

Jurgele, M. 2012. Flexible pavement design workshop. Flexible pavement design in Slovenia. Ljubljana, DRI upravljanje investicij, Družba za razvoj infrastrukture, d. o. o.

Juvanc, A., Rijavec, R. 2005. Temeljni pogoji za določanje cestnih elementov. Ljubljana, Prometnotehniški inštitut – Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Kirschner, H., Stempfhuber, W. 2008. The Kinematic Potential of Modern Tracking Total Stations - A State of the Art Report on the Leica TPS1200+. 1st International Conference on Machine Control & Guidance 2008, Kinematic Measurement and Sensor Technology I (Local Systems): str.: 1–10.
http://www.mcg.ethz.ch/papres/Kirschner_Stempfhuber_05.pdf (Pridobljeno 8. 7. 2014.)

Kogoj, D. 2005. Merjenje dolžin z elektronskimi razdaljmeri. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, str.: 159.

Kohl, C., Krause, M., Maierhofer, C., Wöstmann, J. 2005. 2D-and 3D-visualisation of NDT-data using data fusion technique. *Materials and Structures*, 38(9): str.: 817–826.
doi.org/10.1007/BF02481654

Kokalj, A., Vrščaj, S. 2011. Osnove elektrotehnike. Učbenik. Ljubljana, Zavod IRC, str.: 1–163.
http://www.impletum.zavod-irc.si/docs/Skriti_dokumenti/Osnove_elektrotehnike-Vrscaj_Kokalj.pdf (Pridobljeno 26. 10. 2014.)

Koler, B., Medved, K., Kuhar, M., 2007. Uvajanje sodobnega višinskega sistema v Sloveniji. *Geodetski vestnik*. 51(4), str.: 777–792.
http://www.geodetski-vestnik.com/51/4/gv51-4_777-792.pdf (Pridobljeno 1. 5. 2014.)

Koler, B., Savšek, S., Ambrožič, T., Sterle, O., Stopar, B., Kogoj, D. 2010. Realizacija geodezije v geotehniki. *Geodetski vestnik*, 54(3), str.: 450–468.
doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2010.03.450-468

Koler, B., Vardjan, N., Urbančič, T. Savšek, S. 2011. Analiza stanja pri uvajanju sodobnega višinskega sistema. *Geodetski vestnik*, 52(2), str.: 215–225.
http://www.geodetski-vestnik.com/55/2/gv55-2_215-225.pdf (Pridobljeno 16. 1. 2015.)

Kohlrausch, F. 1985. *Praktische Physik*. Band 2, 23. Edition, Teubner Stuttgart.

Komel, P., Pavlič, M. 2008. Uporaba georadarja v geotehnikih, geologiji in gradbeništvu ob praktičnih primerih. Zbornik petega posvetovanja slovenskih geoteknikov, Nova Gorica, str.: 22–34.

Kosmatin Fras, M., Vežočanik, R., Gvozdanović, T., Kogoj, D. 2008. Avtomatizacija celotnega postopka relativne orientacije stereopara. *Geodetski vestnik*, 52(2), str.: 241–253.
http://www.geodetski-vestnik.com/52/2/gv52-2_241-253.pdf (Pridobljeno 6. 5. 2015.)

Kozmus, K., Stopar, B. 2003. Načini določanja položaja s satelitskimi tehnikami. *Geodetski vestnik*, 47(4), str.: 404–414.
http://www.geodetski-vestnik.com/47/4/gv47-4_404-413.pdf (Pridobljeno 26. 2. 2014.)

Kraus, K. (2004): *Photogrammetrie, Band 1, Geometrischs Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. Walter de Gruyter, Berlin- New York.

Lee, K.-F., Wang, T.-K., Kang, Y.-M., Wang, C.-S., Lin, K.-A. 2013. Identification of Pipelines from the Secondary Reflect Wave Travel Time of Ground-Penetrating Radar Waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 21(4), str.: 417–422.
doi.org/10.6119/JMST-012-0522-2

Kumar, R. Rattan, M. 2012. Analysis Of Various Quality Metrics for Medical Image Processing. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2(11), str.: 137–144.
http://www.ijarcse.com/docs/papers/11_November2012/Volume_2_issue_11_November2012/V2I11-0160.pdf (Pridobljeno 18. 7. 2014.)

Kvamme, K. L. 2001. Current Practices in Archaeogeophysics: Magnetism, Resistivity, Conductivity, and Ground-Penetrating Radar, objavljeno v Goldberg, P., Holliday, V.I. Ferrng, R.. *Earth Sciences and Archaeology: Kluwer/PlenumPublishers, New York*, 2, str.: 353–384.

Le Bastard, C., Baltazart, V., Wang, Y., Saillard, J. 2007. Thin pavement thickness estimation using GPR with high and super resolution methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(8), str.: 2511–2519. doi.org/10.1109/TGRS.2007.900982

Ledieu, J., P. De Ridder, P. De Clercq, and S. Dautrebande. 1986. A method of measuring soil moisture by time domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, 88, str.: 319–328.
[doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90097-1](http://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90097-1)

Leckebusch, J. 2003. Ground Penetrating Radar: A Modern Three-dimensional Propection Method. *Archaeological Propection*, 10, str.: 213–240.
doi.org/10.1002/arp.211

Leckebusch, J. (2000). Two and Three-Dimensional Ground Penetrating Radar Surveys across a Medieval Choir: A Case Study in Archaeology. *Archaeological Propection*, 7, str.: 189–200.
[doi.org/10.1002/1099-0763\(200009\)7:3<189::AID-ARP134>3.0.CO;2-N](http://doi.org/10.1002/1099-0763(200009)7:3<189::AID-ARP134>3.0.CO;2-N)

Lehmann, F., Green, A. G. 2000. Topographic migration of georadar data: implications for acquisition and processing. *Geophysics* 65(3), str: 836–848.

doi.org/10.1190/1.1444781

Lehmann, F., Green, A. G. 1999. Semiautomated georadar data acquisition in three dimensions. *Geophysics*, 64(3), str.: 719–731.

doi.org/10.1190/1.1444581

Lehmann, F., Muhll, D. V., Van der Veen, M., Wild, P., Green, A.G. 1998. True Topographic 2-D Migration of Georadar Data. *SAGEEP*, 11, str.: 107–114.

doi.org/10.4133/1.2922491

Leick, A. (1995). *GPS satellite surveying*. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. Canada.

Leng, Z., Al-Qadi, L. 2010. Railroad Ballast Evaluation Using Ground-Penetrating Radar - Laboratory Investigation and Field Validation. *Journal of the Transportation Research Board*, 2159, str.: 110–117.

doi.org/10.3141/2159-14

Lester, J., Bernold, L. E. 2007. Innovative process to characterize buried utilities using Ground Penetrating Radar. *Automation in Construction*, 16, str.: 546–555.

doi.org/10.1016/j.autcon.2006.09.004

Li, S., Cai, H. & Kamat, V.R. 2015. Uncertainty-aware geospatial system for mapping and visualizing underground utilities. *Automation in Construction*, 53, str: 105–119.

doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.011

Liu, G., Jia, Y., Liu, H., Qiu, H., Qiu, D., Shan, H. (2002). A case study to detect the leakage of underground pressureless cement sewage water pipe using GPR, electrical and chemical data. *Environmental Science & Technology*, 36, str.: 1077–1085.

doi.org/10.1021/es001954s

Lopera, O., Milisavljevic, N. 2007. Prediction of the effects of soil and target properties on the AP landmine detection performance of ground-penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 63, str.: 13–23.

doi.org/10.1016/j.jappgeo.2007.02.002

Macarol, S. 1977. *Praktična geodezija*, Tehnička knjiga, Zagreb, str.: 1–723.

Maijala, P. 1992. Application of some Seismic data processing methods to ground penetrating radar data. *Geological Survey of Finland Special Paper*, 16, str.: 103–110.

<http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=61471> (Pridobljeno 9. 11. 2014.)

Malmberg, C. G., Maryott, A. A. 1956. Dielectric Constant of Water from 0° to 100 °C. *Journal of research of the National Bureau of Standards*, 56(1), str.: 1–8.

doi.org/10.6028/jres.056.001

- Marvin, S., Slater, S. 1997. Urban infrastructure: The contemporary conflict between roads and utilities, *Progress in Planning*, 48(4), str: 247–318.
[doi.org/10.1016/S0305-9006\(97\)90019-2](https://doi.org/10.1016/S0305-9006(97)90019-2)
- McClymont, A. F., Green, A. G., Streich, R., Horstmeyer, H., Tronicke, J., Nobes, D., Pettinga, D., Campbell, J., Langridge, R. 2008. Visualization of active faults using geometric attributes of 3D GPR data: An example from the Alpine Fault Zone, New Zealand. *Geophysics*, 73(2), str: B11–B2.
doi.org/10.1190/1.2825408
- Meats, C. 1996. An appraisal of the problems involved in three dimensional ground penetrating radar imaging of archaeological features. *Archaeometry*, 38(2), str.: 359–379
doi.org/10.1111/j.1475-4754.1996.tb00783.x
- Metwaly, M. 2015. Application of GPR technique for subsurface utility mapping: A case study from urban area of Holy Mecca, Saudi Arabia. *Measurement*, 60, str.: 139–145.
doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.064
- Millard, S. G., Shaari, A., Bungey, J. H. 2002. Field pattern characteristics of GPR antennas. *NDT&E International*, 35(7), str.: 473–482.
[doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00023-3)
- Millington, T. M., Cassidy, N. J. 2009. Optimising GPR modelling: a practical, multithreaded approach to 3D FDTD numerical modelling. *Journal of Computers and Geosciences*, 36, str.: 1135–1144.
doi.org/10.1016/j.cageo.2009.12.006
- Millington, T. M., Cassidy, N. J., Soldovieri, F., Crocco, L. 2011. Using FDTD modelling to inform the tomographic imaging of buried utility pipes via GPR investigation. 6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2011), Aachen, Germany.
doi.org/10.1109/IWAGPR.2011.5963866
- Mohsen, J.P., Rockaway, T.D., Gupta, D.K. 2006. Test Field Design and development for GPR Techniques for Infrastructure Asset Identification. Proceedings on the 11th International Conference on Ground Penetrating Radar (2006).
- Monnier, S., Camerlynck, C., Rejiba, F. 2009. Ground-penetrating radar surveys on rock glaciers in the Vanoise Massif (Northern French Alps): methodological issues. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*: str.129–140.
<https://geomorphologie.revues.org/7569> (Pridobljeno 10. 7. 2014.)
- Mušič, B. 2008. Nastavki za kvantitativno analizo rezultatov arheološke geofizike na primeru Sagalassosa, Turčija. *Arheo*, 25, str: 51–65.
http://arheologija.ff.uni-lj.si/music/BMusic_Arheo-25_2008.pdf (Pridobljeno 18. 4. 2015.)
- Mušič, B., Podobnikar, T., Šarlah, N. 2012. Neinvazivni način evidentiranja podzemne gospodarske infrastrukture z georadarsko metodo. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2011–2012*, Znanstvenoraziskovalni center SAZU: str: 213–224.
<http://giam.zrc-sazu.si/sites/default/files/9789612543822.pdf> (Pridobljeno 22. 4. 2015.)

Mušič, B., De Let, V., Martens, F., Similox-Tohon, D., Verstraeten, G., Poblome, J. Talloen, P., Uytterhoeven, I., Waelkens, M., (2008). Geophysics, satellite imagery, urban survey and archaeological excavations: complementary contributions to reconstruct an ancient urban landscape : the case of Sagalassos (SW-Turkey). 13th International Congress "Cultural Heritage and New Technologies" Vienna, Archäologie und Computer, 3.–5. November 2008, Workshop 13. Dunaj: Museen der Stadt Wien - Stadtarchäologie, 2008, str.: 1–23.

http://arheologija.ff.uni-lj.si/music/MUSIC-DE%20LAET-MARTENS%20ET%20AL_1.pdf
(Pridobljeno 2. 4. 2015.)

Mušič, B., Vyncke, K., Vanhaverbeke, H., Degryse, P., De Laet, V., Medarič, I., Mori, M., Waelkens, M., (2010). Geophysical and archaeological survey, satellite imagery and archaeological excavations : complementary contributions to reconstruct a Classical-Hellenistic urban landscape : the case of Duzen Tepe (SW-Turkey). 3. slovenski geološki kongres, Bovec, 16.–18. september 2010. Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Inštitut za raziskovanje Krasa; Ljubljana: Paleontološki inštitut Ivana Rakovca, str.: 35–36.

Neal, A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 66(3), str.: 261–330.
doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004

Novo, A., Grasmueck, M., Viggiano, D. A., Lorenzo, H., (2008). 3D GPR in Archeology: What can be gained from dense Data Acquisition and Processing. 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, Birmingham, Velika Britanija.

Olhoeft, G. R. 1998. Electrical, magnetic and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. *Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Združene države Amerike: str: 477–483.

Olatinsu, O. B., Olorode, D. O., Oyedele K. F. 2013. Radio frequency dielectric properties of limestone and sandstone from Ewekoro, Eastern Dahomey Basin. *Advances in Applied Science Research*, 4(6), str.:150–158.
<http://pelagiaresearchlibrary.com/advances-in-applied-science/vol4-iss6/AASR-20130-4-6-150-158.pdf> (Pridobljeno 28.12. 2014.)

Olhoeft, G. (2000). Maximizing the information return from ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 43, str.: 175–187.
[doi.org/10.1016/S0926-9851\(99\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00057-9)

Onishi, K., Yokota, T., Maekawa, S., Toshioka, T., Rokugawa, S. 2005. Highly efficient CMP surveying with ground-penetrating radar utilising real-time kinematic GPS. *Exploration Geophysics*, 36(1), str.: 59–66.
doi.org/10.1071/eg05059

Orlando, L. 2007. Using GPR to Monitor Cracks in a Historical Building. 4th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, Naples, Italy, *Proceedings on IEEE*, str.: 45–48.
doi.org/10.1109/AGPR.2007.386522

Oštir, K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Založba ZRC, ZRC SAZU, str.: 1–249.

Pasolli, E., Melgani, F., Donelli, M. 2009. Automatic Detection and Classification of Buried Objects in GPR Images Using Genetic Algorithms and Support Vector Machines. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Boston, Združene države Amerike.

doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779044

Pasolli, E., Melgani, F., Donelli, M. 2009. Automatic Analysis of GPR Images: A Pattern-Recognition Approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(7), str.: 2206–2217.

doi.org/10.1109/tgrs.2009.2012701

Pellinen, T., Huuskonen-Snicker, E., Eskelinen, P., Martinez, P.O. 2015. Representative volume element of asphalt pavement for electromagnetic measurements. *Journal of Traffic and Transportation engineering*, 2(1), str.: 30–39.

doi.org/10.1016/j.jtte.2015.01.003

Perez-Gracia, V. 2001. Evaluación GPR para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico. Doktorska disertacija. Polithechnic University of Catalonia, Barcelona, Španija.

<http://hdl.handle.net/10803/6216> (Pridobljeno 16. 9. 2015.)

Perez-Gracia, V. 2009. Resolution in evaluation of structural elements by using ground-penetrating radar. A: *Jornadas Técnicas Internacionales de Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio Construido - "Jornadas Técnicas Internacionales de Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio Construido"*, Bilbao, str.: 511–521.

<http://hdl.handle.net/2117/9508> (Pridobljeno 16. 4. 2015.)

Podobnikar, T. 2001. Digitalni model reliefa iz geodetskih podatkov različne kakovosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Podobnikar, T. 1999. Tërmina natančnost in točnost v geodeziji. *Geodetski vestnik* 43(1), str.: 49–55.

Podgornik, R., Vilfan, A. 2012. Elektromagnetno polje. Ljubljana, DMFA založništvo, str.: 382.

Rakar, A., Šubic-Kovač, M., Mesner, A., Mlinar, J., Šarlah, N. 2010. Zaščita in ohranjanje vrednosti gospodarske javne infrastrukture. *Geodetski vestnik*, 54(2), str.: 242–252.

http://www.geodetski-vestnik.com/54/2/gv54-2_242-252.pdf (Pridobljeno 16. 11. 2014.)

Rakun, J. 2010. Odkrivanje objektov nepravilnih oblik v naravnem okolju s pomočjo prostorsko-frekvenčne analize in elastične poravnave slik. Doktorska disertacija. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, str.: 1–118.

<http://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=13785> (Pridobljeno 2. 12. 2014.)

Rebertus, R. A., Doolittle, J. A., Hall, R. L. 1989. Landform and stratigraphic influence on variability of loess thickness in northern Delaware. *Soil Science Society of America Journal*, 53, str.: 843–847.

doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300030036x

Rees, Huw V., Glover, J. M. 1992. Digital Enhancement of Ground Penetrating Radar. V: Pilon J.A. (ur.). *Ground penetrating radar*. Geological Survey of Canada Paper, 90(4): str.: 187–193.

Reynolds, J. M. 1997. An introduction to Applied and Environmental Geophysics. New York, Wiley, str.: 796.

Rhebergen, J. B., Lensen H. A. R. van Wijk, J. M. H. Hendrickx, L. van Dam, Borchers, B. 2004. Prediction of soil effects on GPR signatures. SPIE digital library, str.: 705–715.
doi.org/10.1117/12.542270

Rial, F. I, Pereira, M., Lorenzo, H., Arias, P., Novo, A. 2009. Resolution of GPR bowtie antennas: An experimental approach. *Journal of Applied Geophysics* 67: 367–373.
doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.05.003

Ristič, A., Petrovački, D., Govedarica, M. 2009. A new method to simultaneously estimated heradius of a cylindrical object and the wave propagation velocity from GPR data. *Computers & Geosciences*, 35, str.: 1620–1630.
doi.org/10.1016/j.cageo.2009.01.003

Ristič, A., Petrovački, D. 2005. Examples of usig ground penetrating radar and GPS technology for detection of underground utilites. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering*, 2(7), str.: 1–8.
<http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2005/ANNALS-2005-2-07.pdf> (Pridobljeno 18. 10. 2014.)

Rogers, C. D. F., Hao, T., Costello, S. B., Burrow, M. N. P., Metje, N., Chapman, D. N., Parker, J., Armitage, R. J., Anspach, J. H., Muggleton, J. M., Foo, K. Y., Wang, P., Pennock, S. R., Atkins, P. R., Swingler, S. G., Gohn, A. G., Goddard, K., Lewin, P. L., Orlando, G., Redfern, M.A., Royal, A. C. D., Saul, A. J. 2012. Condition assessment of the buried utility service infrastructure – a proposal for integration. *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology* 28, str.: 331–344.
doi.org/10.1016/j.tust.2011.10.012

Roth, C. H., Malicki, M. A., Plagge, R. 1992. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content and the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *Journal of Soil Science*, 43, str.: 1–9.
doi.org/10.1111/j.1365-2389.1992.tb00115.x

Rosenblum, M., Pikovsky, A., Kurths, J., Schafer, C., Tass, P.A. 2001. Phase synchronization: from theory to data analysis. *Elsevier Science*, 4(9), str.: 279–321.
doi.org/10.1016/S1383-8121(01)80012-9

Rossum, G. 1995. Python tutorial. Technical Report CS-R9526, Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI), Amsterdam.

Saarenketo, T., Scullion, T. 2000. Road evaluation with ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysic*, 43, str.: 119–138.
doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00052-X

Saarenketo, T., Scullion, T. 1995. Using Electrical Properties to Classify the Strength Properties of Base Course Aggregates. Research Report 1341-2. Texas Transportation Institute, College Station, Texas, str.: 71.
<http://trid.trb.org/view.aspx?id=573554> (Pridobljeno 19. 3. 2015.)

Saarenketo, T. 2006. Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys. Doktorska disertacija. Oulu, University of Oulu, Faculty of Science, Department of Geosciences. Acta Universitatis Ouluensis, str: 1–121.
<http://urn.fi/urn:isbn:9514282221> (Pridobljeno 21. 3. 2015.)

Siebert, S., Teizer, J., 2014. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. Automation in Construction, 41, str.: 1–14.
doi.org/10.1016/j.autcon.2014.01.004

Stampolidis, A., Soupios, P., Vallianatos, F. 2003. Detection of Leaks in Buried Plastic Water Distribution Pipes in Urban Places—a Case Study. In Proceedings of the 2nd International Workshop on Advanced GPR, Delft, The Netherlands, str.: 120–124.
doi.org/10.1109/AGPR.2003.1207303

Sandmeier, K. J. 2014. ReflexW manual, Version 7.5 Windows™9x/NT/XP/7 program for the processing and interpretation of reflection and transmission data: 598 str.
<http://www.sandmeier-geo.de/download.html> (Pridobljeno 23. 1. 2014.)

Sakaki, T., Rajaram, H. 2006. Performance of different types of time domain reflectometry probes for water content measurement in partially saturated rocks. Water Resources Research, 42, str.: 1–15.
doi.org/10.1029/2005wr004643

Savšek, S., Ambrožič, T., Kogoj, D., Koler, B., Sterle, O., Stopar, B. 2010. Geodezija v geotehniki. Geodetski vestnik, 54(1), str.: 31–45.
http://www.geodetski-vestnik.com/54/1/gv54-1_031-045.pdf (Pridobljeno 25. 2. 2014.)

Schenk, T. 1999. Digital Photogrammetry, Volume I, Background, Fundamentals, Automatic Orientation Procedures. Dayton, Univerza Ohio, založba Terrascience: 428 str.

Schmelzbach, C., Huber, E. 2015. Deconvolution of Ground-Penetrating Radar Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(9), str.: 5209–5217.
doi.org/10.1109/TGRS.2015.2419235

Sensors & Software, 2003. EKKO-View Enhanced & EKKO-View Deluxe User's Guide. Sensors & Software, Mississauga.

Shang J. Q., Umana, J. A, Bartlett, F. M., Rossiter J. R. 1999. Measurement of complex permittivity of asphalt pavement materials. Journal of Transportation Engineering, 125(4), str.: 347–356.
[doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1999\)125:4\(347\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1999)125:4(347))

Sharma, P. V. 1997. Environmental and Engineering Geophysics, Cambridge Univerziteti tisk, Cambridge, Anglija: str: 1–475.

Shahbaz-Khan, U. 2011. Interpretation of Ground Penetrating Radar Data for Utilities – Methods Techniques and Implementation. Saarbrucken, Germany, VDM Verlag Dr. Muller GmbH & Co., str.:1–200.

Shaw, M. R., Molyneaux, T. C. K., Millard, S. G., Taylor, M. J., Bungey, J. H. 2003. Assessing bar size of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks. *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 45(12), str.: 813–816.
doi.org/10.1784/insi.45.12.813.52980

Sheng, H. N., Yan, H. H., Kuo, F. L., Da-Ci, L. 2010. Buried pipe detection by ground penetrating radar using the discrete wavelet transform. *Computers and Geotechnics*, 37, str.: 440–448.
doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.01.003

Sheriff, E. G. in Geldart, L. P. 1995. *Exploration Seismology*, (2nd ed.). Cambridge. University Press, Cambridge: 592 str.

Shihab, S. 2005. *Detection and Characterisation of Cylindrical Objects using of Ground Penetrating Radar*. Doktorska disertacija. University of Liverpool.

Shihab, S., Al-Nuaimy, W., Eriksen, A. 2004. Radius estimation for subsurface cylindrical objects detected by ground penetrating radar. In: *Proceedings 10th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Delft, The Netherlands, str.: 319–322.
doi.org/10.1007/s11220-005-0004-1

Singh, A. P., Singh, M. P., Lal, T. 1980. Laboratory measurement of dielectric constant and loss tangent of Indian rock samples. *Annals of Geophysics*, 33(1), str.: 121–140.
doi.org/10.4401/ag-4700

Slokan, I. 2003. *Nizke zgradbe: temeljenje, vodovod, kanalizacija*. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije, str.: 110–162.

Spurgin, J. T, Lopez, J, Kerr, K. 2009. *Utility Damage Prevention – What Can Your Agency Do?* American Public Works Association, Congress Session, str.: 64–69.
<http://www.apwa.net/Resources/Reporter/Articles/2009/9/Utility-Damage-Prevention-What-can-your-agency-do> (Pridobljeno 8.4. 2014.)

Solla, M., Nunez-Nieto, X., Varela-Gonzalez, M., Martinez-Sanchez, J., & Arias, P. 2014. GPR for road inspection: Georeferencing and efficient approach to data processing and visualization. *Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar*.
doi.org/10.1109/icgpr.2014.6970559

Sterle, O., Stopar, B., Pavlovčič Prešeren, P. 2014. Metoda PPP pri statični izmeri GNSS. *Geodetski vestnik*, 58(3), str.: 466–481.
http://www.geodetski-vestnik.com/58/3/gv58-3_sterle.pdf (Pridobljeno 4. 1. 2015.)

Stolte, C., Nick, K., 1994. Eccentricity-migration: a method to improve the imaging of pipes in radar reflection data. *Proceedings 5th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Ontario, Canada, str.: 723–733.

Streich, R. 2007. *Accurate 3-D vector-imaging of ground – penetrating radar data based on exact-field radiation patterns*. Doktorska disertacija. ETH Zurich, Swiss Federal Institute of Technology.

Su, X., Talmaki, S., Cai, H., Kamat, V. R. 2013. Uncertainty-aware visualization and proximity monitoring in urban excavation: a geospatial augmented reality approach. *Visualization in Engineering*, 1(1), str.: 1–13.
doi.org/10.1186/2213-7459-1-2

Szymczyk, M., Szymczyk, P. 2013. Preprocessing of GPR data. *Image Processing & Communication*, 18(2-3), str: 83–90.
doi.org/10.2478/v10248-012-0082-3

Stephens, M. A. 1974. EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons. *Journal of the American Statistical Association*, 69: str: 730–737.
doi.org/10.1080/01621459.1974.10480196

Šarlah, N. 2008. Izmenjevalni formati informacijskega sistema zbirnega katastra gospodarske javne infrastrukture v podporo interoperabilnosti. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
URL: <http://drugg.fgg.uni-lj.si/id/eprint/736>

Šarlah, N., Mesner, A., Kumer, J., Kuzmič, M., Jud, S., Mlinar, J., Klemenčič, G., Šelek, L. 2010. Evidentiranje gospodarske infrastrukture. Priročnik. Gospodarsko interesno združenje geodetskih izvajalcev, Ljubljana, Slovenija.

Šprager, S. 2013. Razgradnja optičnih interferenčnih in inercijskih signalov za analizo človekovih vitalnih funkcij. Doktorska disertacija. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko.
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=40108> (Pridobljeno 2. 9. 2014.)

Talmaki, S., Kamat, V. R., Cai, H., 2013. Geometric modeling of geospatial data for visualization-assisted excavation. *Advanced Engineering Informatics*, 27, 2, str.: 283–298.
doi.org/10.1016/j.aei.2013.01.004

Talmaki, S., Kamat, V. R. 2009. Real-Time Hybrid Virtuality for Prevention of Excavation Related Utility Strikes. *Journal of Computing Civil Engineering*, 28(3) str.: 04014001.
doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000269

Thode, H. C. 2002. *Testing for Normality*. New York, Marcel Dekker: str.: 479.

Tillard, S., Dubois, J. C. 1995. Analysis of GPR data: wave propagation velocity determination. *Journal of Applied Geophysics*, 33, str.: 77–91.
doi.org/10.1016/0926-9851(95)90031-4

Topp, G. C., Davis, J. L., Annan, A. P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content. Measurement in coaxial transmission for calibration of 3D multiphase flow simulation. *Water Resources Research*, 16, str.: 574–582.
doi.org/10.1029/WR016i003p00574

Topp G. C., Ferre P. A. 2002. The soil solution phase. V: Method of soil analysis. Dane J. H., Topp G. C. 2002 (eds.). Wisconsin, Madison, Soil Science Society of America, Inc., str: 417–447.

Thomas, A. M., Rogers, C. D. F., Chapman, D. N., Metje, N., Castle, J. 2008. Stakeholder needs for ground penetrating radar utility location. *Journal of Applied Geophysics*, 67(4), str.: 345–351.
doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.07.006

Thomas, A. M., Lim, H. M., Metje, N., Rogers, C. D. F., Chapman, D. N., Atkins, P. R. 2006. The complexity of GPR data interpretation in railway foundation surveys. *Proceedings of RailFound 06, 1st International Conference on Railway Foundations*, Birmingham, 11th–13th September.

Turkel, V., Yalcinkaya, M., Huseyin, A. 2009. Detection methods of underground pipelines. 24th World Gas Conference, Buenos Aires, Argentina.

Uren, L., Price, W. F. 2006. *Surveying for engineers*, četrta izdaja. Palgrave Macmillan, New York, Združene države Amerike, str: 1–824.

Van der Kruk, J., 2001. Three-dimensional imaging of multi-component GPR data. Doktorska disertacija. Delft University of Technology, Delft, Neatherland.
<http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:24077/eth-24077-01.pdf> (Pridobljeno 22.3.2015.)

Valh, M. M., Marjetič, A., Ježovnik, V., Kogoj, D. 2009. Testiranje višjih stopenj avtomatizacije elektronskih tahimetrov. *Geodetski vestnik*, 53(1), str: 11–22.
http://www.geodetski-vestnik.com/53/1/gv53-1_011-022.pdf (Pridobljeno 12. 7. 2014.)

Valh, M. M., Marjetič, A., Kogoj, D. 2008. Avtomatski elektronski tahimetri ali kam vodi razvoj TPS sistemov. *Geodetski vestnik*, 52(3), str: 487–499.
http://www.geodetski-vestnik.com/52/3/gv52-3_487-499.pdf (Pridobljeno 10. 6. 2014.)

Vickers, R., Dolphin, L.T. 1975. A communication about an archaeological radar experiment at Chaco Canyon: MASCA (Museum Applied Science Center for Archaeology, University of Pennsylvania, Philadelphia) Newsletter 11(1).

Zheng, Y. F., Li, Z., Zhou, L. C., Lv, D., Ying, M., Men, Y. 2011. Increase the accuracy of GPR in tunnel detection. *Advance Materials Research*, 183-185, str.: 1529–1533.
doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.183-185.1529

Zitova, B., Flusser, J. 2003. Image registration methods: A survey. *Image and Vision Computing*, 21, str: 977–1000.
[doi.org/10.1016/S0262-8856\(03\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(03)00137-9)

Žmavc, J. 2007. *Gradnja cest. Voziščne konstrukcije*. 2. izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, str: 262.

Wang, Z., Bovik, A., C. 2009. Mean squared error: Love it or leave it?. *IEEE Signal Processing Magazine*, 26(1), str.: 98–117.
doi.org/10.1109/MSP.2008.930649

Wang, Z., Bovik, A., C. 2002. A universal image quality index. *IEEE Signal Processing Letters*, 9, str.: 81–84.

doi.org/10.1109/97.995823

Ward, R. C., Robinson, M., (2000). *Principles of Hydrology*. 4th Edition. McGrawHill.

Weaver, W., (2006). Ground penetrating Radar Mapping in Clay: Success from South Carolina, USA. *Archaeological Prospection*, 13, str.: 147–150.

doi.org/10.1002/arp.281

Windsor, C. G., Capineri, L., Falorni, P. 2005. The Estimation of Buried Pipe Diameters by Generalized Hough Transform of Radar Data. *Progress In Electromagnetics Research Symposium*, Hangzhou, Kitajska, August 22–26.

doi.org/10.2529/PIERS041117130829

Xavier, N. P., Medeiros, W. E. 2006. A practical approach to correct attenuation effects in GPR data. *Journal of Applied Geophysics*, 59: str.: 140–151.

doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.09.002

Yelf, R., Yelf, D. 2007. Where is true time zero?. *Electromagnetic Phenomena Journal*, 18, str.: 150–157.

doi.org/10.1109/ICGPR.2004.179979

Yilmaz, Ö. 2001. *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*, num. II, *Invest. Geophys.*, št. 10, 2. izdaja, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Združene države Amerike.

Yilmaz, Ö. 1987. *Seismic Data Processing. Investigations in Geophysics 2*. Society of Exploration Geophysicists, str.: 526.

Ostali viri

Ambrožič, T., Turk, G. 2007. Navodila za uporabo programa Win ViM. Ljubljana, UL FGG, Oddelek za geodezijo.

Ambrožič, T., Turk, G., Jamšek, Z. 2007. Navodila za uporabo programa Win GeM. Ljubljana, UL FGG, Oddelek za geodezijo.

ARSO, 2010. Hidrološki letopis Slovenije 2009.

http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/HL09%20III.B.Podzemne%20vo de_Groundwaters.pdf (Pridobljeno 10. 11. 2015.)

ASCE - American Society of Civil Engineering, 2002. Standard Guideline for the Collection and Depiction of Existing Subsurface Utility Data. ASCE Code and Standards Activity Committee (CSAC), New York, Združene države Amerike, str.: 1–18.

<http://www.asce.org/templates/publications-book-detail.aspx?id=8162>

Blejec, M., Lovrečič-Saražin, M., Perman, M., Štraus, M. 2003. Statistika. Višješolski učbenik, Piran, Visoka šola za podjetništvo Piran, str.: 1–150.

EuroGPR, 2015. The EuroGPR Association Glossary of GPR terms. Založba EuroGPR Association, prva izdaja, str.: 1–21.

http://www.eurogpr.org/joomla/images/documents/EuroGPR_Standardised_Glossary%20Issue%201%20March%202015.pdf (Pridobljeno 8. 8. 2015.)

G2-102, 2015. Tehnična dokumentacija rekonstrukcije glavne ceste in pločnika G2-102/1038 Bača – Dolenja Trebuša.

<http://portal.drsc.si/dc/jn/narocila/2415-12-000728/REKO-Baca-Dol.%20Trebusa-popisi-9-11.zip> (Pridobljeno 2. 5. 2015.)

GIZ TS-8, 2014. Usmeritve za gradnjo podzemnih kabelskih vodov. Ljubljana, Gospodarsko interesno združenje distribucije električne energije.

<http://www.giz-dee.si/Portals/0/Tipizacija/GIZ-TS-8-Usmeritve-za-gradnjo-kabelskih-vodov.pdf> (Pridobljeno 6. 8. 2015.)

GIZ TS-01, 2005. Tipizacija omrežnih priključkov. Ljubljana, Gospodarsko interesno združenje distribucije električne energije.

http://www.elektro-primorska.si/sites/www.elektro-primorska.si/files/upload/files/tipizacija_omreznih_prikljuckov.pdf (Pridobljeno 1. 4. 2014.)

GSSI, 2015. Documentation, Brochure.

<http://www.geophysical.com/Documentation/Brochures/GSSI-AntennasBrochure.pdf> (Pridobljeno 10. 10. 2015.)

GSSI, 2006. GSSI Handbook For RADAR Inspection of Concrete. Priročnik, New Hampshire, Geophysical Survey Systems.

<http://www.geophysical.com/Documentation/Manuals/MN72367D1%20Concrete%20Handbook.pdf> (Pridobljeno 6. 6. 2013.)

IG, 2010. Navodilo za določanje višin z uporabo globalnih navigacijskih satelitskih sistemov. Ljubljana, Geodetski inštitut Slovenije, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo in Geodetska uprava Republike Slovenije.

http://www.e-prostor.gov.si/fileadmin/projekti/DGS/2010p/Navodilo_za_GNSS-visinomerstvo_r2.pdf (Pridobljeno 11. 2. 2014.)

IG, 2006. Navodilo za izvajanje klasične geodetske izmere v novem državnem koordinatnem sistemu. Ljubljana, Geodetski inštitut Slovenije in Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

http://www.eprostor.gov.si/fileadmin/ogs/Horiz_koord_sistem_D96/Navodila/Navodilo_za_klasicno_i_zmero.pdf (Pridobljeno 7. 7. 2013.)

Kovačič, G. 2014. Regresija in korelacija – Kvantitativne metode v geografiji in uvod v GIS. Učno gradivo, UP FHŠ, str.: 1–21.

http://studentski.net/gradivo/upr_fhs_ge1_kmg_sno_regresija_in_korelacija_01?r=1 (Pridobljeno 19. 2. 2015.)

Košmelj, B., Arh, F., Doberšek Urbanc, A., Ferligoj, A. 2001. Statistični terminološki slovar. Statistično društvo Slovenije, Študentska založba, str.: 1–200.

Leica TPS1200+, 2008. Navodila za uporabo. Heerbrugg, Leica Geosystems, str.: 1–209.

http://www.surveyequipment.com/PDFs/TPS1200_User_Manual.pdf (Pridobljeno 14. 4. 2014.)

Lepetič, M., Klančar, G., Blažič, S. 2004. Analiza izvedljivosti avtomatizacije poravnave žarilnih nitk z uporabo strojnega vida pri izdelovanju avtomobilskih žarnic. Elektrotehniški vestnik 71(1-2), str.: 7–12.

LC 490124, 2015. Tehnična dokumentacija rekonstrukcije lokalne ceste 490124 Ropasija–Vransko.

<http://www.vransko.si/wp-content/uploads/aktualni-javni-razpisi-narocila-in-objave/Tehnicna-dokumentacija.zip> (Pridobljeno 1. 5. 2015.)

LC 223091, 2015. Tehnična dokumentacija rekonstrukcije lokalne ceste 223091 Žerovinci–Stara cesta.

http://www.obcinaljutomer.si/sites/default/files/datoteke/razpisi/Tehni%C4%8Dno%20poro%C4%8Dilo_0.doc (Pridobljeno 3. 5. 2015.)

LC 406010, 2015. Tehnična dokumentacija rekonstrukcije lokalne ceste 406010 Orehova Vas–Dolga Gora.

<http://www.sentjur.si/f/docs/Razpisi/Tehni-no-poro-ilo-Dolga-Gora---cesta-Gora.pdf> (Pridobljeno 1. 5. 2015.)

LC 038011, 2015. Tehnična dokumentacija rekonstrukcije lokalne ceste 038011 Maistrova 15 do odcepa Anski vrh.

http://moc.celje.si/images/Datoteke/JAVNI_RAZPISI/2015/september/maistrova/tehnico-porocilo_maistrova.pdf (Pridobljeno 1. 5. 2015.)

LC 396201, 2015. Tehnična dokumentacija rekonstrukcije pločnika ob lokalni cesti 396201 Pešnica–Podgrad, Ropasija–Vransko.

http://www.sentjur.si/f/docs/Razpisi/Tehnicno-porocilo_9.pdf (Pridobljeno 2. 5. 2015.)

MUUDS, 2013. Marking Underground Utility Depth System, Industry Statistics for Underground Utility Damages.

<http://www.muuds.com/images/TSCFactsheet.pdf> (Pridobljeno 2. 7. 2013.)

NJUG, 2013. Guidelines on the positioning and colour coding of underground utilities apparatus. National Joint Utilities Group.

<http://www.njug.org.uk/wp-content/uploads/V1-Positioning-Colour-Coding-Issue-8.pdf>
(Pridobljeno 2. 10. 2014).

Mušič, B. 2009. Georadarska metoda. Študijski pripomoček. Ljubljana, UL, Filozofska fakulteta, Oddelek za arheologijo.

Pavšič, J. 2006. Geološki terminološki slovar, Ljubljana 2006. Ljubljana, Naravoslovnotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, Oddelek za geologijo, Inštitut za slovenski jezik Frana Ramovša ZRC SAZU, Založba ZRC, str.: 1–331.

Pravilnik o tehnični izvedbi in uporabi javnih vodovodov (Uradni list RS, št. 14- 648/1998).

<https://www.uradni-list.si/1/content?id=123801> (Pridobljeno 10. 10. 2014).

Pravilnik o tehnični izvedbi in uporabi javnih objektov in naprav za odvajanje in čiščenje odpadnih komunalnih ter padavinskih voda (Uradni list RS, št. 66/2007).

<https://www.uradni-list.si/1/content?id=81617> (Pridobljeno 2. 9. 2014.)

Pravilnik o tehničnih pogojih za graditev, obratovanje in vzdrževanje plinovodov z največjim delovnim tlakom do vključno 16 bar (Uradni list RS, št. 26/2002) z dopolnitvami (Uradni list RS, št. 54/2002).

<https://www.uradni-list.si/1/content?id=32140> (Pridobljeno 8. 10. 2014.)

R1-216. 2015. Tehnična dokumentacija rekonstrukcije regionalne ceste in pločnika R1-216/1175 Krka–Žužemberk.

<http://portal.drsc.si/dc/jn/narocila/2415-12-001044/POPIS.zip> (Pridobljeno 2. 5. 2015.)

R2-428. 2015. Tehnična dokumentacija rekonstrukcije regionalne ceste R2-428/1250 Luče–Sestre Logar.

<http://portal.drsc.si/dc/jn/narocila/2431-13-000133/Specifikacija.zip> (Pridobljeno 2. 5. 2015.)

Sandmeier, K. J. 2015. Elektronsko osebno dopisovanje, (Celje–Karlsruhe) – januar 2015.

Sterling, R. L., Anspach, J., Allouche, E., Simicevic, J., Rogers, C. D. F., Weston, K. 2009. Encouraging Innovation in Locating and Characterizing Underground Utilities, SHRP 2 Report S2-R01-RW, Washington, D. C, Združene države Amerike, Transportation Research Board, str.: 1–128.

http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp2/shrp2_S2-R01-RW.pdf (Pridobljeno 12. 8. 2014.)

SCI, 2015. Slovar cestnih izrazov. Ljubljana, Družba za avtoceste Republike Slovenije.

http://www.dars.si/Dokumenti/Medijsko_sredisce/Slovar_cestnih_izrazov_382.aspx
(Pridobljeno 2. 1. 2015.)

SISJ, 2015. Slovarji Inštituta za slovenski jezik Frana Ramovša ZRC SAZU. Ljubljana, Inštitut za slovenski jezik Frana Ramovša ZRC SAZU.

<http://www.fran.si/> (Pridobljeno 15. 4. 2015.)

TS, 2000. Navodila za graditev kableske kanalizacije iz PE cevi s profilirano zunanostjo in gladko notranjo površino, Ljubljana, Telekom Slovenije d.d.

TSC 03.200:2003. Temeljni pogoji za določanje cestnih elementov v odvisnosti od voznodinamičnih pogojev, ekonomike cest, prometne obremenitve in prometne varnosti ter preglednosti (predlog). Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste, str.: 1–10.

TSC 06.300/06.410:2009. Smernice in tehnični pogoji za graditev asfaltnih plasti. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste, str.: 8–28.

http://www.di.gov.si/uploads/media/TSC_06_300_410_2009_Smernice_in_tehnicni_pogoji_za_graditev_asfaltnih_plasti.pdf (Pridobljeno 1. 4. 2015.)

TSC 06.511:2009. Tehnična specifikacija za prometno obremenitev – določitev in razvrstitev. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste, str.: 1–10.

http://www.di.gov.si/fileadmin/di.gov.si/pageuploads/Tehnicne_specifikacije_z_cest/TSC_06_511_2009_Prometne_obremenitve_Dolocitev_in_razvrstitev.pdf (Pridobljeno 1. 4. 2015.)

TSC 06.512:2003. Tehnična specifikacija za projektiranje – klimatski in hidrološki pogoji. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste, str.: 4–11.

http://www.di.gov.si/fileadmin/di.gov.si/pageuploads/Tehnicne_specifikacije_z_cest/TSC_06_512_2003_Projektiranje_klimatski_in_hidroloski_pogoji.pdf (Pridobljeno 1. 4. 2015.)

TSC 06.520:2009. Tehnična specifikacija za projektiranje - dimenzioniranje novih asfaltnih voziščnih konstrukcij. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste, str.: 8–22.

http://www.di.gov.si/fileadmin/di.gov.si/pageuploads/Tehnicne_specifikacije_z_cest/TSC_06_520_2009_Projektiranje_Dimenzioniranje_novih_asfaltnih_voziscnih_konstrukcij.pdf
(Pridobljeno 6. 4. 2015.)

TSC 08.311:2005. Redno vzdrževanje cest/Vzdrževanje prometnih površin – asfaltna vozišča. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste, str.: 1–43.

http://www.fg.uni-mb.si/cpg/wp-content/uploads/2013/04/TSC-08-311_2005.pdf
(Pridobljeno 2. 4. 2015.)

TSC 06.720:2003. Meritve in preiskave – deformacijski moduli vgrajenih materialov. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste, str.: 1–14.

http://www.di.gov.si/fileadmin/di.gov.si/pageuploads/Tehnicne_specifikacije_z_cest/TSC_06_720_2003_Meritve_in_preiskave_Deformacijski_moduli_vgrajenih_materialov.pdf (Pridobljeno 6. 6. 2014.)

Turk G. 2011. Verjetnostni račun in statistika. Ljubljana, UL FGG, Učbenik (delovna različica), str.: 1–236.

UNCC, 2015. Perspectives on Facility Damage 2014, Utility Notification Center of Colorado, Golden, Colorado, str.: 1–85.

<http://colorado811.org/documents/18/3e2d5222-eddc-4e88-abc1-4b55f74705d0>

(Pridobljeno 1. 10. 2015.)

Uredba o merilih za kategorizacijo javnih cest. (Uradni list RS, 49/1997).

http://www.mzi.gov.si/fileadmin/mzi.gov.si/pageuploads/DC_splosno/uredba_merila_kategorizacija.pdf (Pridobljeno 1. 11. 2014.)

Zakon o javnih cestah. Uradni list RS, št. 33/2006.

<http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO1366#> (Pridobljeno 15. 6. 2014.)

Zakon o elektronskih komunikacijah (ZEKom-1). (Uradni list RS, št. 109/2012).

URL: http://zakonodaja.gov.si/rpsi/r01/predpis_ZAKO3781.html (Pridobljeno 15. 3. 2013).

ZAS, 2010. Priročnik za asfalterška dela. Ljubljana, Združenje asfalterjev Slovenije, str.: 32–64.

ZRC SAZU, 2016. Terminogišče. Spletno mesto Sekcije za terminološke slovarje Inštituta za slovenski jezik Frana Ramovša ZRC SAZU.

<http://isjfr.zrc-sazu.si/sl/terminologisce#v> (Pridobljeno 15. 4. 2014.)