

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/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Špeglič, D. 2013. Občutljivostna analiza kamnitih zidov z uporabo georadarja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Bosiljkov, V., somentorica Cotič, P.): 71 str.

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 original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Špeglič, D. 2013. Občutljivostna analiza kamnitih zidov z uporabo georadarja. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bosiljkov, V., co-supervisor Cotič, P.): 71 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

DAMJAN ŠPEGLIČ

**OBČUTLJIVOSTNA ANALIZA KAMNITIH ZIDOV Z
UPORABO GEORADARJA**

Diplomska naloga št.: 3296/KS

**PERFORMANCE BASED ASSESSMENT OF STONE
MASONRY WITH GPR**

Graduation thesis No.: 3296/KS

Mentor:

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentorica:

asist. Patricia Cotič

Član komisije:

prof. dr. Bogdan Zgonc

asist. Darja Šemrov

prof. dr. Bojan Majes

viš. pred. mag. Rok Fazarinc

Ljubljana, 26. 04. 2013

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Ta stran je namenoma prazna.

STRAN Z IZJAVAMI

Spodaj podpisani Damjan Špeglič izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Občutljivostna analiza kamnitih zidov z uporabo georadarja«.

Izjavljam, da je tiskana različica v vsem enaka elektronski različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 1. april 2013

Damjan Špeglič

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK: 621.396.9:691.5:692.2(043.2)
Avtor: Damjan Špeglič
Mentor: izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov
Somentor: asist. Patricia Cotič, udig.
Naslov: Občutljivostna analiza kamnitih zidov z uporabo georadarja
Tip dokumenta: diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 71 str., 7 preg., 46 sl., 11 en., 7 pril.
Ključne besede: kamniti zid, neporušne metode preizkušanja, georadar, podometna tekstura zidu, morfologija zidu, odstopanje ometa

Izvleček

V diplomski nalogi je predstavljena občutljivostna analiza ometanih troslojnih kamnitih zidov z uporabo georadarja. Namen naloge je bilo ugotoviti ustreznost georadarske metode za potrebe prenosa metode na preiskave objektov kulturne dediščine, ki so pogosto podvrženi mehanskim poškodbam. Pravočasno zaznavanje še nevidnih anomalij lahko bistveno prispeva k ohranjanju te stavbne dediščine, zato je uporaba neporušnih metod, kot je georadarska metoda, s konstrukcijskega in arhitektonskega vidika, ključnega pomena. V uvodnem delu je predstavljen splošni pregled neporušnih metod preizkušanja s poudarkom na opisu georadarske metode. Slednja predstavlja še precej neraziskano področje neporušnega preizkušanja kamnitih zidanih konstrukcij. V praktičnem delu naloge so opisani preiskovani kamniti zidovi in sam način izvajanja georadarskih meritev. Prav tako je podan podroben opis postopka obdelave podatkov, pridobljenih z georadarskimi meritvami. Glavni namen občutljivostne analize georadarskih podatkov je bilo zaznavanje debeline, morfologije in podometne teksture večslojnih zidov ter spremljanje odstopanja ometa med strižnim preizkusom zidov. Georadarska metoda se izkaže kot zelo ustrezna tehnika za pridobivanje teh podatkov, saj je z veliko natančnostjo zaznala debelino zidu ter pri povezanih zidovih jasno ločila, za te zidove značilne, vezniške od smerniških zvez. Metoda je pravilno določila geometrijo odstopanega dela ometa. Kljub uspešni aplikaciji metode pa se je potrebno zavedati, da je kot neporušna metoda preizkušanja omejena na kvalitativne rezultate.

Ta stran je namenoma prazna.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION WITH ABSTRACT

UDC: 621.396.9:691.5:692.2(043.2)
Author: Damjan Špeglič
Supervisor: Assoc. Prof. Vlatko Bosiljkov, Ph.D.
Co-advisor: Assist. Patricia Cotič, B.Sc.
Title: Performance based assessment of stone masonry with GPR
Document type: Graduation thesis – University studies
Scope and tools: 71 str., 7 tab., 46 fig., 11 eq., 7 ann.
Keywords: stone masonry wall, non-destructive testing methods, ground penetrating radar, texture of the wall, morphology of the wall, plaster delamination

Abstract

In the graduation thesis, performance based assessment of plastered three-layered stone masonry walls through ground penetrating radar (GPR) is presented. The thesis purpose was to determine the suitability of GPR for its application on buildings of cultural heritage, often being subjected to mechanical damage. Since an early detection of hidden anomalies in the walls structure could be associated to the starting phase of a degradation process of the wall, the detection could significantly contribute to the preservation of the architectural heritage. Therefore, from the structural and architectural point of view, the use of non-destructive testing (NDT) methods, such as GPR, is crucial. The first part of the thesis gives a general overview of NDT methods, with an emphasis on the description of GPR. In the literature, the results of the application of this method on stone masonry walls are rare. The practical part of the thesis describes the examined stone masonry walls and the conduction of GPR measurements. A detailed description of the processing of data obtained from measurements is given as well. The main aim of the analysis of GPR data was the detection of the walls thickness, morphology and texture under the plaster as well as the monitoring of the propagation of the plaster delamination during the shear test. Due to the high accuracy of the GPR data for the detection of the walls thickness as well as the structural visualization of the courses with through stones, GPR proved effective. The through stones, which are typical for the walls with well connected outer leaves, could be clearly separated from runners. Moreover, the method correctly determined the geometry of plaster delamination area. However, despite the successful application of the method, one has to be aware that results provided by GPR as a NDT method are limited to qualitative results.

Ta stran je namenoma prazna.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Vlatku Bosiljkovu za mentorstvo in nasvete pri izdelavi diplomske naloge. Posebej bi se rad zahvalil somentorici asist. Patricii Cotič za vso pomoč, nasvete in usmerjanje pri izdelavi diplomske naloge, ki je nastala v sklopu njenega doktorskega dela.

Zahvaljujem se tudi mojim študijskim kolegom, brez katerih bi bila pot do diplome veliko težja.

Posebna zahvala gre vsem domačim za podporo, ki sem je bil deležen med študijem.

Hvala tudi tebi Tina, da si mi ves čas študija stala ob strani in mi pomagala.

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	NEPORUŠNE METODE PRESKUŠANJA KONSTRUKCIJ, KONSTRUKCIJSKIH ELEMENTOV IN MATERIALOV	3
2.1	Elektromagnetne metode.....	4
2.1.1	Detekcija kovin (angl. magnetometry).....	4
2.1.2	Prosto elektromagnetno sevanje (angl. Free ElectroMagnetic Radiation - FEMR).....	5
2.1.3	Infrardeča termografija (angl. infrared thermography).....	5
2.1.4	Geoelektrična tomografija (angl. geoelectrical tomography)	6
2.2	Akustične metode	7
2.2.1	Metoda z ultrazvokom (angl. ultrasonics).....	8
2.2.2	Metoda s kladivom (angl. sonic pulse test)	9
2.2.3	Metoda udarec – odmev (angl. impact – echo method)	10
2.3	Mikro-seizmične metode.....	11
2.4	Fotogrametrične metode.....	14
2.5	Jedrske metode	15
3	GEORADAR (angl. GPR – Ground Penetrating Radar)	17
3.1	Princip delovanja georadarja	17
3.2	Za georadar pomembne elektromagnetne lastnosti materiala.....	20
3.3	Hitrost širjenja radarskih valov	24
3.4	Izbira antene.....	26
3.5	Izgube energije elektromagnetnega valovanja	26
3.6	Ločljivost rezultatov meritev z georadarjem	27
3.7	Prednosti in slabosti georadarske metode	29
4	PODROČJA UPORABE GEORADARSKE NAPRAVE V GRADBENIŠTVU	31
5	OBDELAVA PODATKOV GEORADARSKIH MERITEV	33
5.1	Proces obdelave.....	34
5.2	Programska oprema	37
5.2.1	Urejanje podatkov.....	38
5.2.2	Odstranitev ojačitve	39
5.2.3	Statična korekcija	39
5.2.4	Ojačitev signala	40
5.2.5	Migracija.....	42
5.2.6	Prikaz radargramov georadarskih profilov za posamezne korake obdelave	43
5.2.7	Združitev obdelanih serij profilov v tridimenzionalni prikaz.....	44
6	PREISKAVE OMETANIH VEČSLOJNIH KAMNITIH ZIDOV	45
6.1	Opis kamnitih zidov	47

6.2	Georadarska oprema in meritve	48
6.3	Rezultati meritev z georadarjem	51
6.3.1	Določitev debeline zidu	52
6.3.2	Vizualizacija podometne teksture kamnitega zidu	53
6.3.3	Zaznavanje odstopanja ometa od zidu.....	57
6.3.4	Zaznavanje in prepoznavanje značilne morfologije povezanega zidu.....	59
6.4	Primerjava rezultatov georadarskih meritev z rezultati infrardeče termografije in bližnje slikovne fotogrametrije.....	61
6.4.1	Vizualizacija podometne teksture kamnitega zidu	61
6.4.2	Zaznavanje odstopanja ometa od zidu.....	62
7	ZAKLJUČEK.....	66
	VIRI	69

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Električna prevodnost in relativna dielektrična konstanta posameznih snovi, izmerjenih pri frekvenci valovanja 100 MHz.....	23
Preglednica 2:	Vrednosti relativne dielektrične konstante materiala, hitrosti širjenja elektromagnetnega valovanja in valovne dolžine v različnih materialih.....	25
Preglednica 3:	Vrednosti dušenja energije valovanja v materialu v odvisnosti od frekvence uporabljene antene za različne materiale	27
Preglednica 4:	Valovna dolžina valovanja v materialu z relativno dielektrično konstanto $\epsilon_r = 7,4$ (hitrost širjenja valovanja v materialu je $v = 0,110$ m/ns), pri uporabi anten z najbolj pogostimi centralnimi frekvencami valovanja.	29
Preglednica 5:	Opis korakov obdelave podatkov georadarskih meritev	35
Preglednica 6:	Pomiki horizontalnega bata v času izvedbe posameznih meritev.....	51
Preglednica 7:	Debeline zidov in ometov.....	52

Ta stran je namenoma prazna.

KAZALO SLIK

Slika 1:	Spekter elektromagnetnega valovanja.....	4
Slika 2:	a) Merilna oprema in b) shematični prikaz delovanja metode detekcije kovin.....	5
Slika 3:	a) Merilna oprema in b) shematični prikaz izvajanja meritev pri metodi termografije.....	6
Slika 4:	a) Primer profila elektrod in b) merilni inštrument za izvajanje geoelektrične tomografije.....	7
Slika 5:	Merilna oprema za izvajanje metode z ultrazvokom.....	8
Slika 6:	a) Merilna oprema za izvajanje meritev in b) shematični prikaz načinov izvajanja meritev po metodi s kladivom. Od leve proti desni : direktn način, pol – direktn način in indirektn način izvajanja meritev.....	9
Slika 7:	Shematični prikaz izvajanja tomografije prereza po metodi s kladivom.....	10
Slika 8:	a) Merilna oprema za izvajanje metode b) in shematični prikaz metode z odmevom na udarec.....	11
Slika 9:	Merilna oprema za izvajanje mikro – seizmičnih metod: a) Seizmograf in b) primer sprejemnika P – valov (zgoraj) in sprejemnika S – valov (spodaj).....	11
Slika 10:	Shematični prikazi razporeditve generatorjev impulzov valovanja (Si) in sprejemnikov (Ri) v profile pri mikro – seizmičnih metodah: a) vertikalni profil, pri metodi mikro – seizmičnega profiliranja, b) paralelna profila, pri metodi mikro – seizmične tomografije in c) profila, pri metodi TSS profiliranja.....	12
Slika 11:	Primer grafičnega prikaza porazdelitve hitrosti po prerezu med profiloma po metodi mikro – seizmične tomografije.....	13
Slika 12:	a) Primer preizkušanca, opremljenega z detajlnimi točkami, na stebrih v okolici preizkušanca so vidne tudi oslonilne točke in b) primer oslonilne točke.....	14
Slika 13:	Projektor, vir gama žarkov, kot del merilne opreme za izvajanje meritev po metodi radiografije.....	15
Slika 14:	Oblika impulza imenovana Ricker wavelet.....	17
Slika 15:	Shematični prikaz širjenja elektromagnetnega valovanja skozi materiale z različnimi dielektričnimi konstantami.....	18
Slika 16:	Merilni sistem georadarja z oddajno – sprejemno anteno: a) generator elektromagnetnih impulzov, sprejemnik in krmilno – procesna enota in b) oddajno – sprejemna antena.....	18
Slika 17:	Shematični prikaz refleksijskega profiliranja pri georadarski metodi.....	19
Slika 18:	Shematični prikaz načinov širokokotne refleksije in refrakcije.....	19
Slika 19:	Shematični prikaz radarskega presvetljevanja ali radarske tomografije.....	20
Slika 20:	Shematični prikaz pojmov horizontalna ločljivost in vertikalna ločljivost.....	28

Slika 21:	Načini grafičnega prikazovanja rezultatov georadarskih meritev; a) grafični prikaz refleksijske sledi v programu Reflex-Win in b) shematični prikaz grafičnega prikaza prereza ter radargrama georadarskega profila	34
Slika 22:	Shematični prikaz procesa obdelave podatkov georadarskih meritev.....	36
Slika 23:	Shematični prikaz procesa obdelave podatkov georadarskih meritev, izvedenega v sklopu diplomske naloge	38
Slika 24:	Opcije za določitev ničelnega časa na sledi.....	40
Slika 25:	Krivulja upadanja amplitude odbojnega signala in pripadajoča ojačitvena krivulja	41
Slika 26:	Tvorba odbojne oziroma refleksijske hiperbole	42
Slika 27:	Prikaz radargramov georadarskega profila po posameznem izvedenem koraku obdelave: a) začetni, b) po odstranitvi ojačitve, c) po korekciji maksimalne faze, d) po zamiku začetnega časa, e) po ojačitvi signala in f) po izvedbi migracije profila	44
Slika 28:	Primeri različnih tekstur kamnitega zidovja: a) zid grajen iz kamna nepravilnih oblik in b) zid grajen iz kamnitih zidakov (delno obdelan kamen)	45
Slika 29:	Prikaz morfologije povezanega zidu med gradnjo v laboratoriju UL FGG: a) smerniška zveza in b) vezniška zveza	47
Slika 30:	Stranski pogled dveh preizkušenih zidov, iz katerih je lepo razvidna različna morfologija: a) nepovezanega zidu, b) povezanega zidu in c) fotografija obeh robov.....	47
Slika 31:	Kamniti zid, pripravljen za preiskovanje	48
Slika 32:	Generator in sprejemnik elektromagnetnih impulzov (MALÅ ProEx) ter krmilno – procesna enota (MALÅ ramac monitor XV11)	49
Slika 33:	Visoko frekvenčna, zaščitena, oddajno – sprejemna antena (MALÅ HF 1,6 GHz shielded)	49
Slika 34:	Merilni kolesček (MALÅ Distance Measuring Wheel HF)	50
Slika 35:	Izvajanje georadarskih meritev	50
Slika 36:	Določitev debeline preizkušanca Zid_4 na radargramu georadarskega profila	53
Slika 37:	Prikaz podometne tekture vseh štirih preiskovanih kamnitih zidov	55
Slika 38:	a) Pozicije prikazanih refleksijskih sledi na grafičnem prikazu podometne tekture preizkušanca Zid_1 na globini 1,3 cm (0,23 ns), b) grafična prikaza refleksijskih sledi c) območje direktnega odboja signala na refleksijskih sledih.....	56
Slika 39:	Širina odstopanja ometa v primeru preizkušanca Zid_1: a) desno zgoraj in b) desno spodaj (oboje pri pomiku bata -10 mm (1. meritev))	57
Slika 40:	Širina odstopanja ometa v primeru preizkušanca Zid_1: a) desni rob in b) levi rob (oboje pri pomiku bata -17,5 mm (2. meritev))	58

Slika 41:	Grafični prikazi prereza preizkušanca Zid_1, na enaki globini (1,3 cm) pri različni stopnji obremenitve: a) referenčna meritev, b) 1. meritev in c) 2. meritev 58	58
Slika 42:	Preizkušanec Zid_3: a) fotografija, iz katere je razvidna dejanska morfologija zidu in pozicija radargrama, b) skica značilne morfologije povezanega zidu (levo) ter radargram georadarskega profila VERTIKALA 01 (desno) in c) grafični prikaz prereza zidu na globini 19 cm..... 60	60
Slika 43:	Podometna tekstura kamnitega zidu (preizkušanec Zid_3, meritve izvedene v referenčnem stanju zidu): a) fotografija podometne teksture, b) georadarski grafični prikaz teksture in c) termografski (fazni) grafični prikaz teksture..... 62	62
Slika 44:	Georadarski grafični prikazi prereza preizkušanca Zid_1, na enaki globini (1,3 cm) pri različni stopnji obremenitve: a) referenčna meritev, b) 1. meritev in c) 2. meritev 63	63
Slika 45:	IR fazne slike prereza preizkušanca Zid_1 pri različnih stopnjah obremenitve: a) referenčna meritev, b) 1. meritev in c) 2. Meritev 64	64
Slika 46:	Fotogrametrične slike površine ometa preizkušanca Zid_1, pri različnih stopnjah obremenitve: a) referenčna meritev, b) 1. meritev in c) 2. Meritev 64	64

Ta stran je namenoma prazna.

1 UVOD

Zidani kamniti objekti predstavljajo precejšen del še obstoječih starejših objektov, mnogi izmed njih predstavljajo del pomembne kulturne dediščine. Veliko kamnitih zidov v teh objektih je po prerezu sestavljenih iz več slojev. Na območju Slovenije se v objektih kulturne dediščine in zidanih objektih nasploh, pogosto pojavijo troslojni zidovi, pri katerih sta zunanja sloja sestavljena iz kamna različne obdelave in zlaganja, notranji sloj zidu pa je zapolnjen z apneno malto in manjšimi kamni. Kamniti zidovi se med seboj razlikujejo po sestavi prereza ter glede na obliko in način zlaganja kamna v posameznem sloju. Ker pa se na ometih kamnitih zidov pogosto nahajajo pomembne poslikave, je za njihovo ohranitev pomembno vedeti, v kakšnem stanju sta preiskovani zid in omet. Znotraj zidu, skrito pod ometom, se lahko namreč ustvari razpoka, votlina ali skriva kakršna koli druga anomalija, ki je s prostim očesom ni mogoče opaziti, vendar lahko ogrozi mehanske lastnosti zidu. Na območju Slovenije je ta del stavbne dediščine še posebno občutljiv na mehanske poškodbe, ki so posledica potresnih vplivov.

V laboratoriju UL FGG so bile zato v sklopu evropskega projekta PREPETUATE (PERformance - based aPproach to Earthquake proTection of cUlturAl heriTage in European and mediterranean countries, www.perpetuate.eu) izvedene obsežne preiskave za določanje potresnega obnašanja ometanih večslojnih kamnitih zidov. Poleg štirih tlačnih in štirinajst cikličnih strižnih preizkusov zidov ter posameznih preiskav kamna, malt in stikov, so se izvedle tudi preiskave s tremi neporušnimi metodami. Za neporušne metode je značilno, da so po večini kvalitativne, da torej ne podajo kvantitativne ocene o mehanskih lastnostih ali drugih lastnostih konstrukcije. Zato je za prenos teh metod v prakso ključnega pomena ocena zanesljivosti metod. Strižna preiskava se izkaže kot odlična možnost za oceno zanesljivosti posameznih sočasno izvajanih neporušnih metod, saj lahko stanje preizkušanca spremljamo ob dobro določenih robnih pogojih. Kot eno izmed najbolj merodajnih meril pri oceni zanesljivosti neporušnih metod za zaznavanje (in posledično prenos v prakso) se izkaže velikost odstopanja ometa. Z uporabo izbranih neporušnih metod pri preiskavah in ustreznim kombiniranjem rezultatov se je poskušalo doprinesti razvoju pristopa za ugotavljanje stanj poškodovanosti zidu in samega ometa.

S pravilno izbranimi metodami neporušnih preiskav je mogoče pridobiti podatke, ki pripomorejo k boljšemu poznavanju konstrukcije preizkušanca, kar vodi k bolj ekonomičnemu načinu projektiranja in izvajanja sanacijskih ukrepov ob sočasno minimalnem posegu v konstrukcijo. Za vizualizacijo podometne teksture kamnitega zidu, zaznavanje in prepoznavanje značilne morfologije povezanega zidu ter za zaznavanje odstopanja ometa so bile na štirih strižno obremenjenih zidovih izvedene naslednje neporušne preiskave:

- meritve z georadarjem (GPR),
- večslikovna metoda bližnje slikovne fotogrametrije in
- aktivna infrardeča termografija.

Hipoteza diplomske naloge je bila ugotoviti ustreznost metodologije izvajanih izbranih neporušnih metod pri občutljivostni analizi kamnitih zidov, za potrebe prenosa metod na preiskave objektov kulturne dediščine. Na tem področju je uporaba neporušnih metod s konstrukcijskega in arhitektonskega vidika namreč ključnega pomena, saj omogoča

pridobitev informacij o notranji strukturi in stanju preizkušanca skoraj brez posega vanj, torej brez poškodb. V diplomski nalogi bodo podrobneje predstavljeni rezultati in ugotovitve preiskav z georadarjem.

Georadarska metoda omogoča vizualizacijo notranje strukture preizkušanca in zaznavanje anomalij oz. diskontinuitet do določene globine preizkušanca. S preiskavami na kamnitih zidovih se je poskušalo preveriti ustreznost metode za:

- določitev debeline zidu,
- vizualizacijo teksture pod ometom,
- zaznavanje odstopanja ometa od zidu in
- zaznavanje in prepoznavanje značilne morfologije povezanega zidu.

Za zagotavljanje večje natančnosti, lažje izvedbe in boljše primerljivosti rezultatov posameznih meritev, so se meritve z georadarjem na ometanih kamnitih zidovih izvajale po mreži vertikalnih in horizontalnih georadarskih profilov. Poleg meritev med strižno preiskavo, ki so bile izvedene pri različnih stopnjah odstopanja ometa, je bila izvedena meritev v neobremenjenem stanju (referenčna meritev). Rezultati referenčne meritve so pri analizi in interpretaciji rezultatov meritev služili za pridobivanje podatkov o strukturi preizkušanca. Za zaznavanje odstopanja ometa, identifikacijo in spremljanje sprememb se z rezultati meritev pri različnih stopnjah odstopanja ometa navezujemo na rezultate referenčne meritve.

Ker je podatke o preizkušancu mogoče pridobiti le s pravilno izbranimi metodami neporušnih preiskav oziroma pravilno kombinacijo le-teh, je potrebno vedeti, katere podatke o preizkušancu je mogoče pridobiti s katero metodo. Zato bodo v diplomski nalogi, za primerjavo z rezultati georadarske metode in presojo ustreznosti metode, v manjšem obsegu predstavljeni tudi rezultati metod aktivne infrardeče termografije in bližnje slikovne fotogrametrije, ki je sicer delo v okviru doktorata P. Cotič.

2 NEPORUŠNE METODE PRESKUŠANJA KONSTRUKCIJ, KONSTRUKCIJSKIH ELEMENTOV IN MATERIALOV

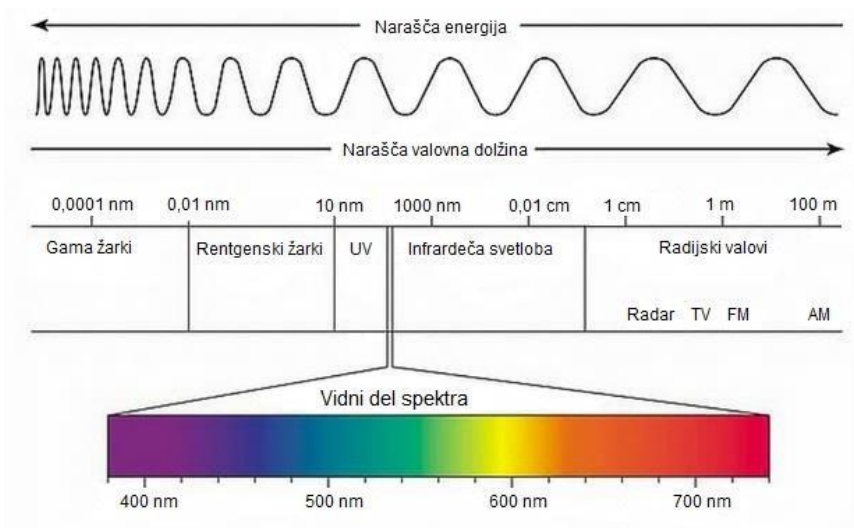
Z uporabo neporušnih metod preskušanja (angl. Non-Destructive Testing (NDT) methods) pridobimo informacije o materialnih ter nekaterih mehanskih lastnostih ter stanju konstrukcije, konstrukcijskih elementov ali materialov uporabljenih v preiskovani konstrukciji brez večjega posega v preiskovani objekt. Glavna prednost neporušnih preiskav pred porušnimi in delno porušnimi preiskavami se torej kaže v tem, da predmet preskušanja ostane nepoškodovan, preiskave je tako mogoče tudi večkrat ponoviti. Zaradi omenjenih prednosti pridobiva uporaba neporušnih metod v gradbeništvu vse večjo veljavo, predvsem na področju preskušanja objektov kulturne dediščine.

Neporušne metode razvrščamo v kategorije glede na to, kakšnemu vplivu je izpostavljen preizkušane med izvedbo preiskav s posamezno metodo. Delimo jih na:

- Elektromagnetne metode
- Akustične metode
- Mikro – seizmične metode
- Fotogrametrične metode
- Jedrske metode

2.1 Elektromagnetne metode

Elektromagnetne metode temeljijo na oddajanju oziroma sprejemanju elektromagnetnega valovanja. Metode izkoriščajo za zaznavanje različne dele spektra, ki jih prikazuje spodnja slika (Slika 1:). Izmed vseh neporušnih metod so elektromagnetne metode najbolj raznovrstne, kar se zadeva obstoječih merilnih tehnik in merilnih sistemov.



Slika 1: Spekter elektromagnetnega valovanja

V nadaljevanju bodo izmed elektromagnetnih metod predstavljene:

- detekcija kovin,
- prosto elektromagnetno sevanje,
- infrardeča termografija in
- geoelektrična tomografija.

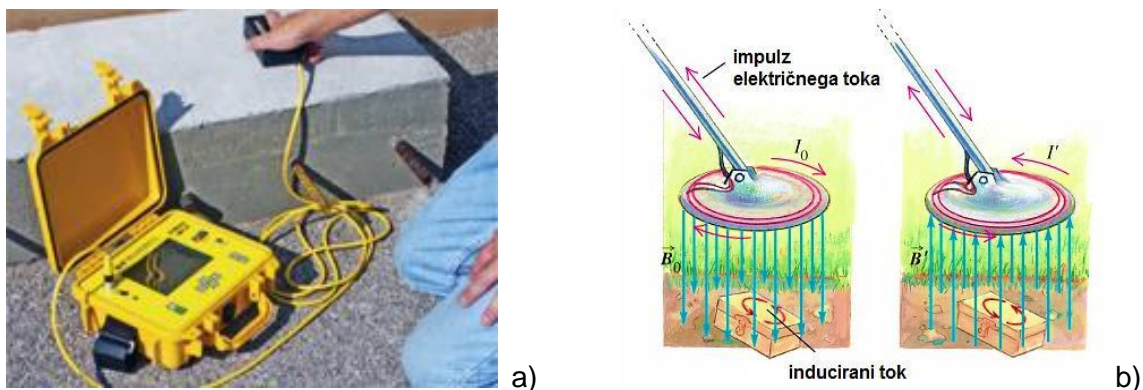
Georadarska metoda je obširneje predstavljena v poglavju 3.

2.1.1 Detekcija kovin (angl. magnetometry)

Detekcija kovin spada med najbolj poznano in preprosto metodo izmed neporušnih metod. Iskalna glava inštrumenta se med preiskavo pomika po površini preizkušanca, vendar za primarni vir polja in sprejemno tuljavo v iskalni glavi ni potrebno, da sta v stiku s površino preizkušanca (Slika 2:). Sprejemna tuljava zaznava aktivne signale elektromagnetnega sevanja, zato omogoča samo odkrivanje prevodnih teles, kot so armaturne palice, cevi in žice znotraj preizkušanca. Aktivne signale predmeti oddajajo, ko so umetno vzbujeni; ti signali so lahko inducirani, lahko pa so posledica direktnega toka skozi prevodnik.

V kolikor so inducirani, pomeni da se prevodni preizkušanelec nahaja v primarnem izmeničnem magnetnem polju, ki ga generira oddajna tuljavo v iskalni glavi inštrumenta. Po

principu elektromagnetne indukcije primarno izmenično magnetno polje v prevodnem telesu pod površino povzroči inducirane vrtilne tokove (angl. eddy currents), ti pa ustvarjajo sekundarno magnetno polje. Vsoto primarnega in sekundarnega magnetnega polja se meri s sprejemno tuljavo. Primarno in sekundarno polje se razlikujeta po amplitudi in fazi. Razlike kažejo na prisotnost prevodnega telesa, na njegovo velikost in obliko ter na njegove električne lastnosti. Fazni premik je tem večji, čim prevodnejše je to telo (Gosar in Ravnik, 2007).



Slika 2: a) Merilna oprema (NDT James, 2012) in b) shematični prikaz delovanja metode detekcije kovin (San Jose State University, 2012)

2.1.2 Prosto elektromagnetno sevanje (angl. Free Electromagnetic Radiation - FEMR)

Metoda prostega elektromagnetnega sevanja je po načinu delovanja zelo podobna detekciji kovin; prav tako temelji namreč na zaznavanju signalov elektromagnetnega sevanja. Poznamo dve vrsti signalov, aktivne signale in pasivne signale. Medtem ko aktivne signale predmeti oddajajo, kadar so umetno vzburjeni, pasivne signale predmeti oddajajo brez dodatnega vzburjanja. Aktivni signali so lahko inducirani, princip indukcije je podoben kot pri metodi detekcije kovin, lahko pa so posledica direktnega toka skozi prevodnik. Po metodi prostega elektromagnetnega sevanja se zaznata obe vrsti signalov, tako aktivni kot tudi pasivni, zato omogoča tudi odkrivanje linijskih elementov, ki niso nujno prevodniki.

Metoda omogoča odkrivanje:

- električnih napeljav, plinskih in vodovodnih cevi,
- jeklenih profilov in armaturnih palic,
- dimniških kanalov, odtočnih kanalov in rezervoarjev.

2.1.3 Infrardeča termografija (angl. infrared thermography)

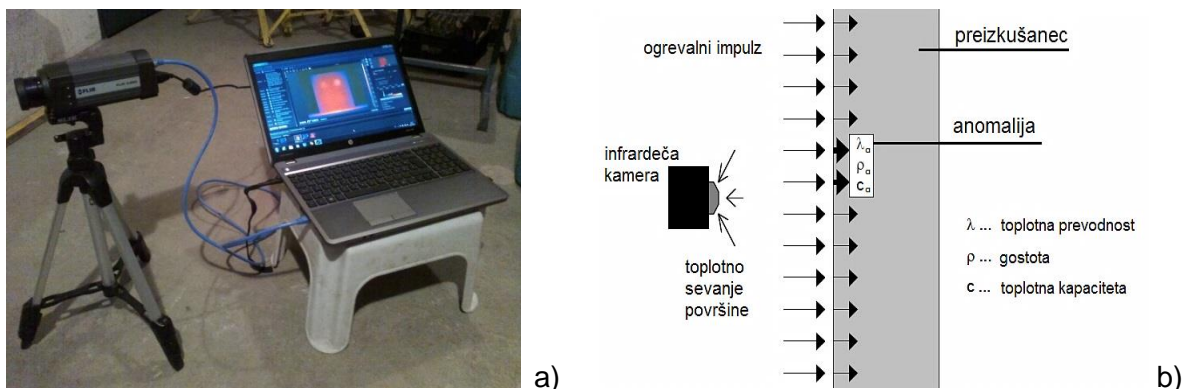
Termografija temelji na merjenju izsevanega infrardečega valovanja od preizkušanca. Ločimo pasivno in aktivno termografijo. Prva ne izkorišča dodatnega vira segrevanja in je

največkrat uporabna za potrebe gradbene fizike, medtem ko je za aktivno termografijo dodaten vir segrevanja potreben. Pri obeh proces segrevanja in ohlajanja preizkušanca pogojujejo trije fizikalni zakoni: prestop toplote (konvekcija), prevajanje toplote (kondukcija) in sevanje (radiacija), ki so odvisni od termičnih lastnosti notranje strukture in emisivnosti površine. Širjenje toplote skozi konstrukcijski element (kondukcija) je odvisno od toplotne prevodnosti in toplotne kapacitete ter gostote materiala, zato se ob spremembi materiala v strukturi spremeni. Nastale motnje v toplotnem toku se odražajo v spremembi temperaturnega profila na površini, katerega zazna infrardeča kamera.

Za opravljanje pasivnih termografskih meritev lahko izkoristimo temperaturno razliko med ogrevano notranjostjo objekta in hladno okolico ali pa kot naravni vir toplotne energije izkoristimo sonce. V kolikor to ni mogoče, lahko uporabimo umetni vir toplotne energije (aktivna termografija).

S termografijo je moč zaznati (Cotič, 2010):

- območja rekonstrukcij oz. sanacij z injektiranjem,
- teksturo zidu pod ometom,
- nepravilnosti v konstrukciji (razpoke, votline, delaminacije in pomanjkanje armature),
- potek inštalacijskih vodov (električna napeljava, vročevod in prezračevalni kanali),
- območja zadržane vode.



Slika 3: a) Merilna oprema in b) shematični prikaz izvajanja meritev pri metodi termografije (Bosiljkov in sod., 2011)

2.1.4 Geoelektrična tomografija (angl. geoelectrical tomography)

Geoelektrična tomografija omogoča merjenje električne upornosti materiala pod površjem, na podlagi česar lahko zaznamo anomalije v strukturi preizkušanca zaradi prisotnosti vlage ali votlin. Metoda temelji na generiranju električnega toka v nekaterih izmed elektrod na površini preizkušanca, na preostalih elektrodah se meri odzivni električni potencial, ki omogoča določitev električne upornosti.

Znotraj geoelektrične tomografije ločimo dve metodi, in sicer:

- presevno tomografijo in
- impendančno ali psevdo prerezno tomografijo.

Presevna metoda se izvaja z elektrodami (Slika 4:a)) razporejenimi v dveh profilih, nameščenih na nasprotnih straneh preizkušanca. Impendančna metoda se izvaja z elektrodami razporejenimi v enem profilu, na eni strani preizkušanca. Pri impendančni metodi se na merilni inštrument za izvajanje geoelektrične tomografije (Slika 4:b)) izmenično priključijo po štiri elektrode. Z dovolj velikim številom kombinacij štirih priključenih elektrod izmed vseh elektrod dobimo podobo električne upornosti pod profilom (termografsko sliko upornosti) in temu pravimo psevdo prerez (Maierhofer in sod., 2004).



a)



b)

Slika 4: a) Primer profila elektrod (Maierhofer in sod., 2004) in b) merilni inštrument za izvajanje geoelektrične tomografije (Directindustry, 2012)

2.2 Akustične metode

Izmed vseh metod neporušnih preiskav so akustične metode najstarejše. Temeljijo na generiranju, širjenju in odboju zvočnega mehanskega valovanja v trdnih snoveh, le-to pa je odvisno od gostote in elastičnih lastnosti preiskovanega materiala ter frekvence uporabljenega valovanja. Slednje pogojuje tudi atenuacijo oz. dušenje valovanja in resolucijo oz. ločljivost. Višja frekvenca namreč vpliva na večjo resolucijo, a obenem tudi na večjo atenuacijo valovanja. Na podlagi zvočnega odziva preiskovanega materiala metode omogočajo določitev votlin, razpok in območij delaminacije, debeline zidov in plošč ter uspešnosti injektiranja cevi za prednapenjanje. V primeru homogenih materialov, za katere velja teoretična povezava med elastičnimi lastnosti materiala in hitrostjo longitudinalnih valov, omogočajo akustične metode določitev tlačne trdnosti in gostote. Akustične metode se med seboj razlikujejo po načinu generiranja in sprejemanja zvočnega valovanja (Cotič, 2010).

V nadaljevanju bodo predstavljene:

- metoda z ultrazvokom,
- metoda s kladivom in
- metoda udarec – odmev.

2.2.1 Metoda z ultrazvokom (angl. ultrasonics)

Metoda je zasnovana na prehodu in odboju ultrazvočnega valovanja, ki ga generira oddajnik ali vrsta oddajnikov, prav tako zaznavanje valovanja poteka s sprejemnikom ali vrsto sprejemnikov. Za uporabo v gradbeništvu so tipične 20-200 kHz ultrazvočne sonde. Oddajniki lahko generirajo tako longitudinalne kot tudi transverzalne valove, katerih širjenje skozi material je odvisno od mehanskih lastnosti materiala. Odboj valov pogojujejo razlike v zvočni impedanci na meji med različnima materialoma. Glede na postavitev merilnih inštrumentov, delimo meritve z ultrazvokom v dve skupini. Kadar sta oddajnik in sprejemnik postavljena na isti strani preizkušanca gre za odmevno tehniko (angl. echo technique), kadar pa sta postavljena na nasprotnih straneh preizkušanca, gre za presevno tehniko (angl. transmission technique).

Metoda z ultrazvokom je zaradi visoke resolucije uporabna za 3D rekonstrukcijo notranje strukture, določevanje debeline zidov ali posameznih plasti, lokalizacijo votlin oz. območja anomalij znotraj preizkušanca ter določitev uspešnosti injektiranja cevi za prednapenjanje. V območju votline pride namreč na meji med dvema materialoma, zrakom in osnovnim materialom preizkušanca do popolnega odboja vpadnega zvočnega valovanja. Iz časa potovanja odbitega valovanja lahko, ob predpostavljeni konstantni hitrosti zvočnega valovanja, določimo globino votlin (Bosiljkov in sod., 2011).



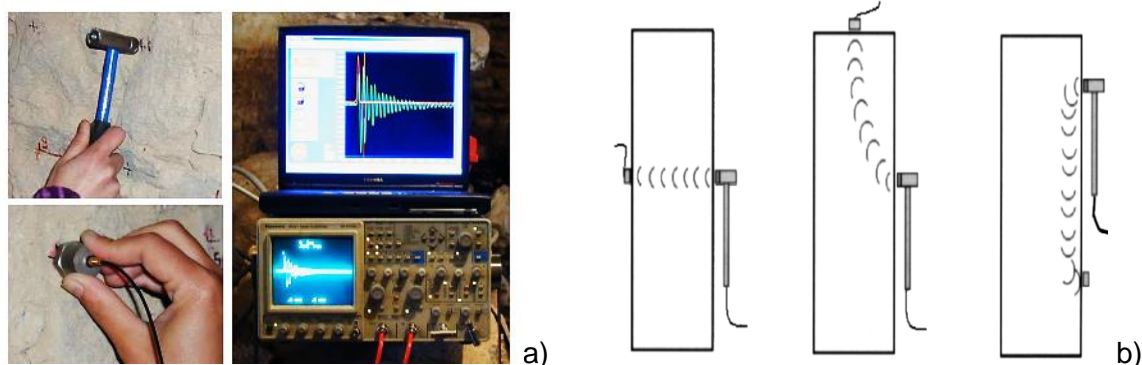
Slika 5: Merilna oprema za izvajanje metode z ultrazvokom (Proceq ultrasonic-pulse velocity, 2012)

2.2.2 Metoda s kladivom (angl. sonic pulse test)

Metoda je zasnovana na merjenju hitrosti primarnega longitudinalnega valovanja (p – valovanja) v frekvenčnem območju med 20 Hz in 20 kHz. Ker je hitrost omenjenega valovanja odvisna od mehanskih karakteristik preiskovanega materiala in pa povezanosti materialne strukture, metoda s kladivom omogoča določitev elastičnega modula in enosne tlačne trdnosti ter povezanosti materialne strukture.

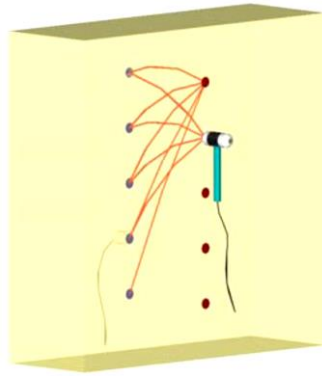
Hitrost je izračunana na podlagi točkovne meritve časa, ki je potreben, da zvočni impulz prepotuje določeno razdaljo. Impulz se ustvari z instrumentalnim kladivcem, s pnevmatično ali elektrodinamično napravo. Izračunana hitrost se nato primerja z referenčno vrednostjo, kjer večje odstopanje od referenčne vrednosti lahko kaže na prisotnost razpok ali delaminacij v merjenem območju.

Točkovne meritve časa se lahko izvajajo na direkten način (angl. direct transmission method), pol – direkten način (angl. semi – direct transmission method) ali indirektni način (angl. indirect transmission method), kot to prikazuje spodnja slika (Slika 6:b)), odvisno od tega, kaj je cilj preiskave (Bosiljkov in sod., 2004).



Slika 6: a) Merilna oprema za izvajanje meritev (Cotič, 2010) in b) shematični prikaz načinov izvajanja meritev po metodi s kladivom. Od leve proti desni : direkten način, pol – direkten način in indirektni način izvajanja meritev (McCann in Forde, 2001)

Kadar želimo določiti povprečne vrednosti hitrosti valovanja za območje določenega prereza preizkušanca, lahko naredimo tomografijo tega prereza, kot to prikazuje spodnja slika (Slika 7:).



Slika 7: Shematični prikaz izvajanja tomografije prereza po metodi s kladivom (Bosiljkov in sod., 2004)

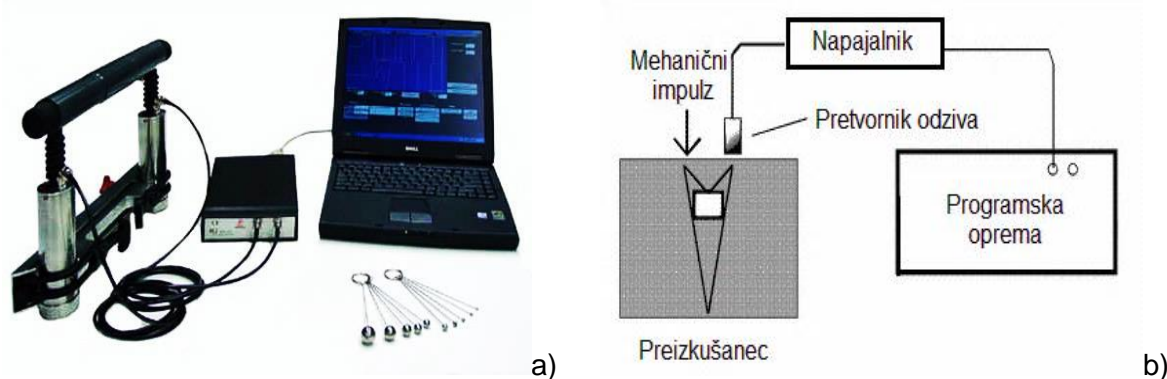
V primerjavi z ultrazvokom ima metoda s kladivom manjšo resolucijo, vendar sposobnost globljega penetriranja.

Metoda s kladivom omogoča (Bosiljkov in sod., 2004):

- zaznavanje nehomogenosti zidu zaradi spremembe v teksturi zidu, območja popravil zidu ali spremembe materiala (Direkten način, tomografija),
- zaznavanje večplastnosti zidu in merjenje debeline posamezne plasti (Tomografija),
- zaznavanje odstopanja zunanjega sloja (Direkten način, tomografija),
- lokalizacijo votlin in dimniških kanalov (Direkten način, tomografija),
- oceno učinkovitosti ukrepov sanacije, kot je na primer injektiranje. (Direkten, pol – direkten način ali tomografija) in
- lokalizacijo poškodovanih območij v zidu in območij razpok. (Direkten, nedirekten način ali tomografija).

2.2.3 Metoda udarec – odmev (angl. impact – echo method)

Metoda z odmevom na udarec je zasnovana podobno kot metoda s kladivom, vendar se meritve izvajajo v nižjem frekvenčnem območju, zaradi česar ima metoda sposobnost globljega penetriranja. Temelji na frekvenčni analizi valovanja, kjer pridobimo spekter amplitud v odvisnosti od frekvence valovanja. Med meritvijo se na površini preizkušanca z mehničnimi impulzi sproža valovanje, ki se nato med potovanjem skozi preizkušanec odbija od notranjih anomalij v strukturi in nasprotni strani preizkušanca. Glavna uporabnost metode z odmevom na udarec je določitev debeline zidov in plošč. Le-to ocenimo na podlagi resonančne frekvence v spektru.

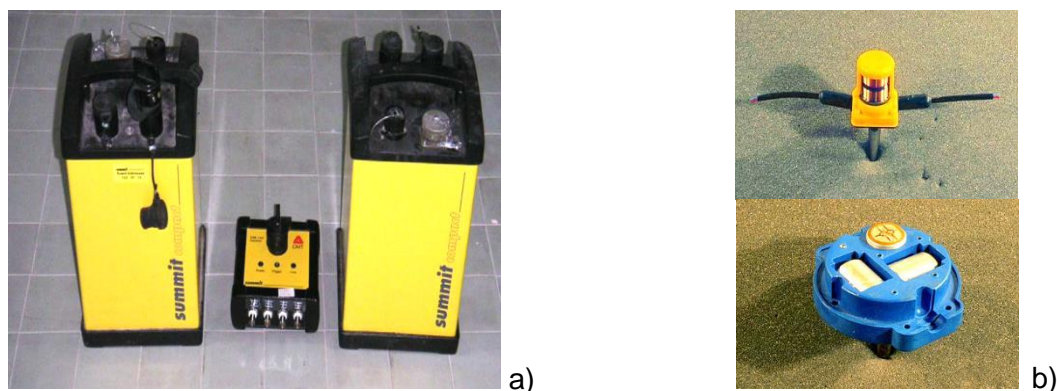


Slika 8: a) Merilna oprema za izvajanje metode (Impact – echo instruments, 2012) b) in shematični prikaz metode z odmevom na udarec

2.3 Mikro-seizmične metode

Mikro – seizmične metode temeljijo na širjenju in zaznavanju vzdolžnega ali longitudinalnega (p – valovi) oz. prečnega ali transverzalnega seizmičnega valovanja (s – valovi). Valovanje se oddaja v obliki impulzov, ki nato potujejo skozi material do sprejemnika oz. skupine sprejemnikov v profilu. Metode se med seboj razlikujejo predvsem glede na postavitev sprejemnikov, pri vseh pa se določa čas, ki je potreben, da valovanje pripotuje od generatorja valovanja do posameznega sprejemnika. Na podlagi izmerjenega časa, se lahko določi hitrost mikro – seizmičnih valov (Cotič, 2010).

Spodnja slika (Slika 9:) prikazuje instrumentarij za izvajanje mikro – seizmičnih metod. V kolikor je namen preiskave samo določitev debeline določenih plasti v strukturi preizkušanca, zadostuje meritev hitrosti vzdolžnega valovanja (p-valov). Kadar pa se želi določiti tudi mehanske lastnosti plasti v strukturi preizkušanca, je potrebno izmeriti hitrosti vzdolžnega valovanja (p-valov) in pa tudi strižnega valovanja (s-valov). Hitrost mikro – seizmičnih valov v homogenem materialu je namreč odvisna od njegovih elastičnih lastnosti in gostote. Določitev hitrosti mikro – seizmičnega valovanja posredno omogoča tudi detekcijo anomalij v materialu.

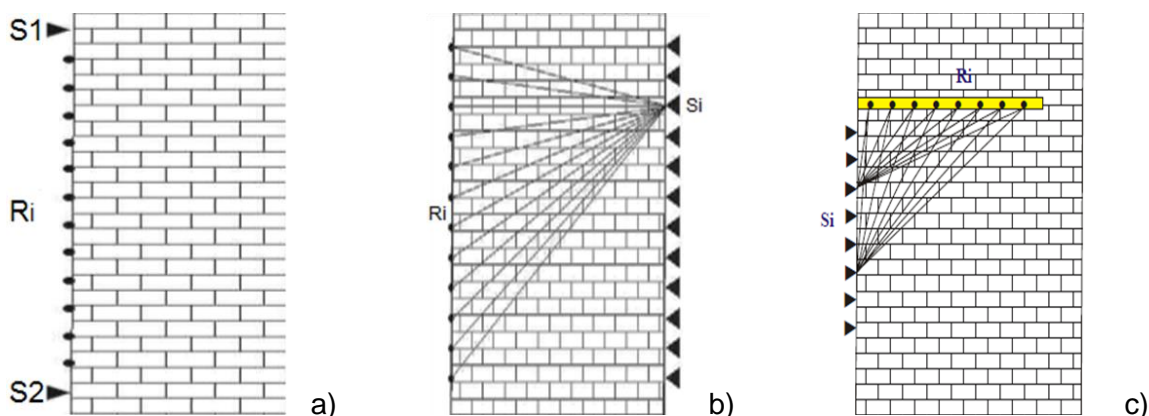


Slika 9: Merilna oprema za izvajanje mikro – seizmičnih metod: a) Seizmograf (Maierhofer in sod., 2004) in b) primer sprejemnika P – valov (zgoraj) in sprejemnika S – valov (spodaj) (CREWES, 2012)

Z namenom izboljšati ločljivost rezultatov meritev, se pojavi potreba po merjenju z valovanjem manjših valovnih dolžin. Tu se kot primerna rešitev pojavi prečno valovanje (s - valovi). Poleg manjše valovne dolžine, je velika prednost s – valov tudi manjša hitrost, zaradi česar so časi prihoda valovanja do dveh sosednjih sprejemnikov večji. Na ta račun se lahko zmanjša razmik med sprejemniki in pa zmanjša čas med impulzi s katerimi se oddaja valovanje. Tomografski prerež lahko na ta način sestavlja tudi do štirikrat več meritev časa potovanja valovanja, kar se v končni fazi odraža v izboljšani ločljivosti rezultatov meritev (Maierhofer in sod., 2004).

V nadaljevanju bodo predstavljene glavne značilnosti in razlike mikro – seizmičnih metod, katerih izvajanje je shematično prikazano na spodnji sliki (Slika 10):

- Mikro – seizmično profiliranje (s p in s - valovi),
- Mikro – seizmična tomografija (s p in s - valovi),
- TSS profiliranje.



Slika 10: Shematični prikazi razporeditve generatorjev impulzov valovanja (Si) in sprejemnikov (Ri) v profile pri mikro – seizmičnih metodah: a) vertikalni profil, pri metodi mikro – seizmičnega profiliranja, b) paralelna profila, pri metodi mikro – seizmične tomografije in c) profila, pri metodi TSS profiliranja (Maierhofer in sod., 2004)

Pri metodi mikro – seizmično profiliranje se zahteva postavitve vertikalne linije sprejemnikov na površini preizkušanca. Tako postavljeni sprejemniki (Ri), z generatorji impulzov valovanja na koncih (Si), tvorijo vertikalni profil. Določanje hitrosti pri tej metodi temelji na odbojnem zakonu seizmičnega valovanja, saj so oddajniki valovanja in sprejemniki na isti strani preizkušanca (Cotič, 2010).

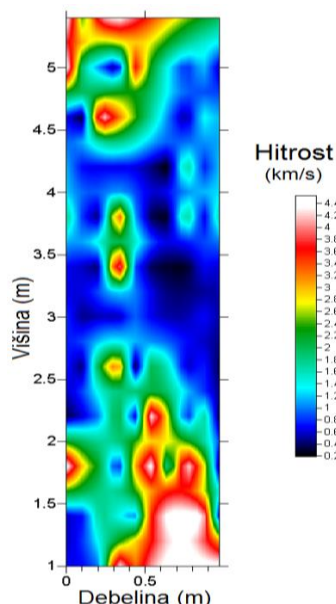
Pri metodi mikro – seizmične tomografije se zahteva dostop do obeh strani preizkušanca, saj je na eni strani postavljena vertikalna linija (profil) sprejemnikov, na drugi strani pa generatorjev impulzov.

Metoda TSS profiliranje zahteva postavitve linije generatorjev impulzov na površini preizkušanca, ti tvorijo en profil. Drugi profil pa tvori linija sprejemnikov, postavljenih v luknjo izvrtano v globino preizkušanca. Zaradi potrebe po izvrtanju luknje v preizkušanec, se

teoretično opisovana metoda uvršča med delno porušne preiskave. Zaradi relativno majhnega posega v preizkušane (potreben premer luknje je majhen) pa se lahko metodo pogojno šteje med neporušne preiskave (Maierhofer in sod., 2004).

S posameznimi sprejemniki izmerjeni časi potovanja valovanja, po metodi mikro – seizmičnega profiliranja, so predstavljeni na diagramu v odvisnosti od razdalje posameznega sprejemnika od generatorja. Takšni diagrami se imenujejo dromokroni (angl. dromochrones), na njih se kažejo posledice različnih diskontinuitet, omogočajo pa tudi določitev hitrosti seizmičnega valovanja. Hitrost seizmičnega valovanja se določi na podlagi naklonov linearnih odsekov diagrama. Zanesljivost metode je večja, kot pri dvotočkovni meritvi z ultrazvokom, saj je hitrost določena na podlagi več rezultatov (večje število linearnih odsekov) (Maierhofer in sod., 2004).

S procesom obdelave časov potovanja valovanja, izmerjenih po metodi mikro – seizmične tomografije, se pridobi numerične rezultate hitrosti valovanja. Te se prikaže na grafični sliki porazdelitve hitrosti po prerezu med profiloma, kot kaže slika spodaj (Slika 11:) (Cotič, 2010).



Slika 11: Primer grafičnega prikaza porazdelitve hitrosti po prerezu med profiloma po metodi mikro – seizmične tomografije (Maierhofer in sod., 2004)

Kot rezultat metode TSS profiliranja pa se pridobi profil hitrosti valovanja vzdolž izvrtane luknje, zato je metoda TSS profiliranja uporabna predvsem za določevanje različnih slojev znotraj preizkušanca (Maierhofer in sod., 2004).

2.4 Fotogrametrične metode

Fotogrametrija je merska tehnika za določitev oblike in velikosti opazovanih objektov iz njihovih fotografij. Za stereoskopsko merjenje izkorišča fiziologijo človeškega vida. Fotogrametrija se deli na bližnj slikovno fotogrametrijo na topografsko fotogrametrijo, slednja se v glavnem ukvarja z določitvijo oblike Zemljinega površja na osnovi podatkov pridobljenih iz letalskih oziroma satelitskih posnetkov, medtem ko se bližnj slikovna fotogrametrija ukvarja z določitvijo oblike precej manjših objektov. Metode bližnj slikovne fotogrametrije so na področju gradbeništva pogosto uporabljene za določanje oblike zgradb in mostov, še posebej uporabne pa so za dokumentiranje kulturne dediščine (Peterman, 2011).

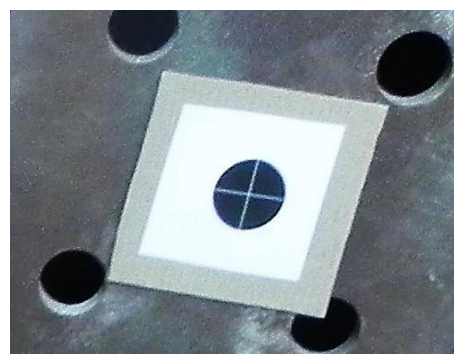
V nadaljevanju bo predstavljena metoda bližnj slikovne fotogrametrije, večslikovna metoda.

Večslikovna metoda je ena izmed metod bližnj slikovne fotogrametrije, pri kateri je potrebno v okolici preizkušanca najprej postaviti oslonilne točke, na samem preizkušancu pa signalizirati detajlne točke (Slika 12:). Metoda temelji na merjenju pomikov preizkušanca, zato je uporabna za določitev deformacij med porušnimi testi. V slednjem primeru se z digitalnimi fotoaparati najprej iz večih stojišč posname fotografije začetnega stanja, prav tako se fotografije preizkušanca posname še med posameznimi stopnjami obremenitve oz. razbremenitve. Na tak način posnete fotografije se obdelajo in na podlagi teh se izračunajo trirazsežne deformacije (Peterman, 2011).

Večslikovna metoda se v zadnjem času uporablja tudi za zaznavanje odstopanja ometa, predvsem fresk. V tem primeru majhne pomike ometa vzbuja z zunanjim virom, najpogosteje kar z zvočnimi signali.



a)



b)

Slika 12: a) Primer preizkušanca, opremljenega z detajlnimi točkami, na stebrih v okolici preizkušanca so vidne tudi oslonilne točke in b) primer oslonilne točke

2.5 Jedrske metode

Uporaba jedrskih metod za preskušanje gradbenih konstrukcij, konstrukcijskih elementov in materialov je zaradi visoke cene in zahtevnosti izvedbe precej redka.

Med jedrske metode spadajo:

- radiometrija,
- radiografija,
- radioskopija.

V nadaljevanju bo predstavljena radiografija (angl. radiography), ki je izmed jedrskih metod v gradbeništvu najbolj uporabljena metoda.

Radiografija je metoda, pri kateri preizkušanece presevamo z visoko energijskimi fotoni, tj. z rentgenskimi ali gama žarki. Za preskušanje konstrukcij, konstrukcijskih elementov in materialov v gradbeništvu je, zaradi višje energije in posledično večje sposobnosti penetracije, bolj uporaben vir gama žarkov (Slika 13:). Vir gama žarkov so radioaktivni izotopi Ir-192, Co- 60 in Cs-137. Metoda temelji na različnih absorpcijskih koeficientih materiala, saj se del valovanja absorbira v skladu z različnimi absorpcijskimi koeficienti materiala, ki so odvisni od gostote, sestave in debeline preizkušanca. Z radiografijo se tako zaznava gostota ter vsebnost vlage v določenem materialu, spremembe pa je moč zaznati precej globoko pod površino preizkušanca. Gostota je določljiva na podlagi spremembe jakosti sevanja, na osnovi zaznavanja vodikovih ionov, ki nastanejo ob presevanju molekul vode, pa je določljiva tudi vsebnost vlage (Cotič, 2010).



Slika 13: Projektor, vir gama žarkov, kot del merilne opreme za izvajanje meritev po metodi radiografije (SENTINEL, 2012)

Znotraj radiografije poznamo glede na način zaznavanja vpadnega valovanja oz. sevanja dve metodi, presevno metodo (angl. through transmission) in odbojno metodo (angl. back scatter). Pri presevani metodi se preizkušanece nahaja med virom visoko energijskih fotonov in detektorjem, ki zazna jakost sevanja skozi preizkušanece. Anomalije oz. spremembe znotraj preizkušanca so zato vidne, kot obrisi območij z drugačnimi lastnostmi znotraj preizkušanca.

Žarek vpadnega valovanja mora biti usmerjen pravokotno na detektor, sicer bo nastala slika popačena. Pri odbojni metodi je detektor na isti strani predmeta kot vir visoko energijskih fotonov (Cotič, 2010).

3 GEORADAR (angl. GPR – Ground Penetrating Radar)

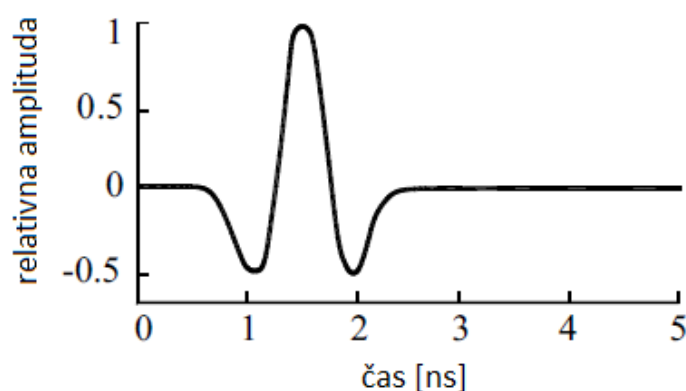
Georadar je kot neporušna metoda preiskovanja konstrukcij, konstrukcijskih elementov in materialov dosegla svoj hiter razvoj in tehnološko dovršenost v zadnjih treh desetletjih. V tem času je namreč prišlo do razvoja serije naprav za izvajanje georadarskih meritev, predvsem pa do razvoja oddajno – sprejemnih anten.

Še en velik korak v razvoju georadarske metode predstavlja tudi razvoj programske opreme za dvodimenzionalno in tridimenzionalno obdelavo podatkov meritev. Georadar ima zelo širok spekter uporabe, z razvojem računalniških naprav in programske opreme pa je sedaj omogočena tudi hitra in natančna obdelava sicer obsežnih podatkov meritev (Daniels, 2004).

3.1 Princip delovanja georadarja

Georadarska metoda temelji na oddajanju visokofrekvenčnih elektromagnetnih impulzov in zaznavanju odbojev le teh. Uporabljajo se zelo kratki radarski impulzi, ki trajajo okoli 10^{-8} s. Radarski signal potuje v materialu kot valovanje, ki se na mejnih ploskvah med materiali z različnimi dielektričnimi konstantami lomi (refrakcija), odbija (refleksija) ali uklanja (difrakcija). Visokofrekvenčni radarski signal se z globino hitro duši zaradi sferičnega razširjanja (sferična divergenca) in absorpcije, ki je odvisna od prevodnosti preiskovanega materiala in frekvence radarskega valovanja (Gosar in Ravnik, 2007).

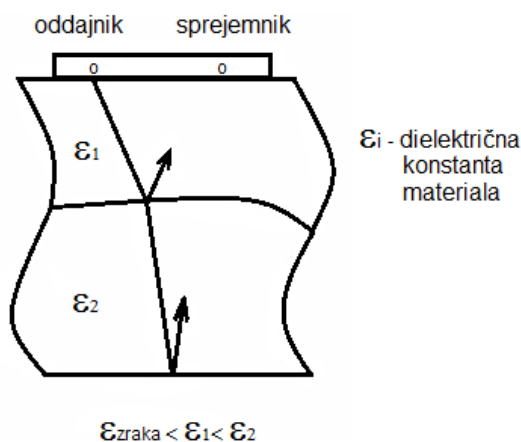
Pri impulznem georadarskem merilnem sistemu se zaporedoma, v zelo majhnih časovnih presledkih generirajo visokofrekvenčni elektromagnetni impulzi. Frekvenca ponovitve takšnih impulzov je precej manjša od frekvence radarskega valovanja. Večina frekvenc impulzov različnih anten georadarskih sistemov se nahaja v razponu 100 MHz – 3000 MHz, medtem ko so frekvence oddajanja impulzov toliko manjše, da se podajajo v enotah kHz. Primer oblike impulza prikazuje spodnja slika (Slika 14:).



Slika 14: Oblika impulza imenovana Ricker wavelet (Yelf & Yelf, 2006)

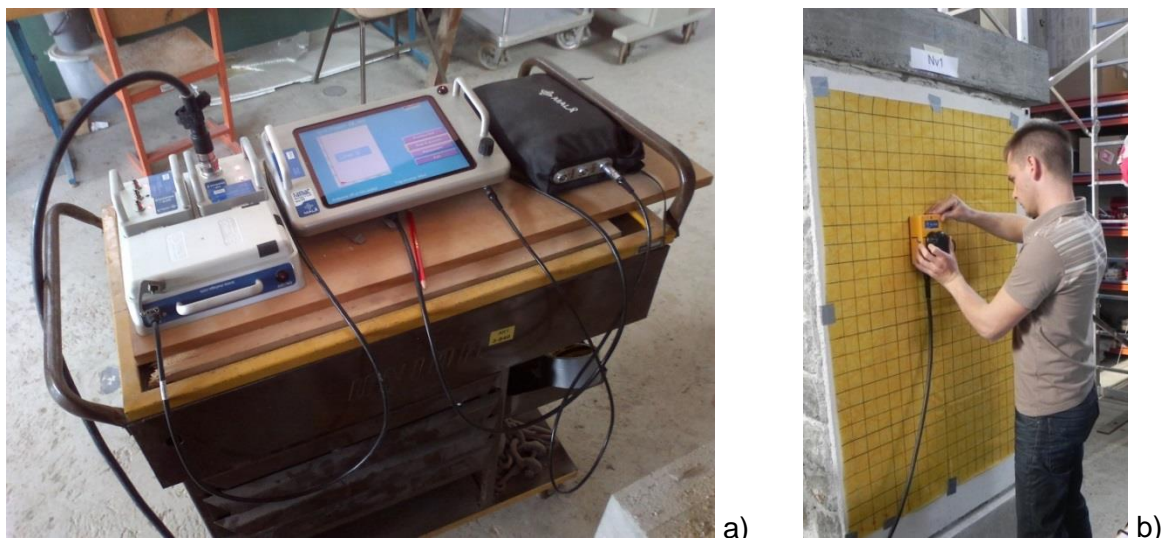
Odziv elektromagnetnega valovanja na meji med dvema materialoma z različnima dielektričnima konstantama prikazuje slika spodaj (Slika 15:). Del valovanja se na meji

odbije, del valovanja pa lomi in penetrira globlje. Tisti del valovanja, ki se odbije, se zazna s sprejemno anteno.



Slika 15: Shematični prikaz širjenja elektromagnetnega valovanja skozi materiale z različnimi dielektričnimi konstantami (Bosiljkov in sod., 2011)

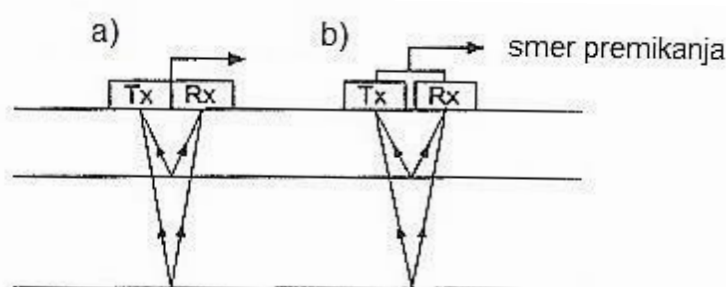
Georadarski merilni sistem sestavljajo generator elektromagnetnih impulzov, oddajna in sprejemna antena (angl. bistatic radar) ali pogosteje uporabljene oddajno – sprejemne antene (angl. monostatic radar) ter sprejemnik in krmilno – procesna enota. Ko anteno premikamo po površini preizkušanca, se radarski signal zapisuje kot funkcija t.i. dvojnega časa potovanja (angl. TWT – two way traveltime). Dvojni čas potovanja predstavlja čas potovanja signal od oddajne antene do mesta odboja in nazaj do sprejemne antene (Gosar in Ravnik, 2007).



Slika 16: Merilni sistem georadarja z oddajno – sprejemno anteno: a) generator elektromagnetnih impulzov, sprejemnik in krmilno – procesna enota in b) oddajno – sprejemna antena

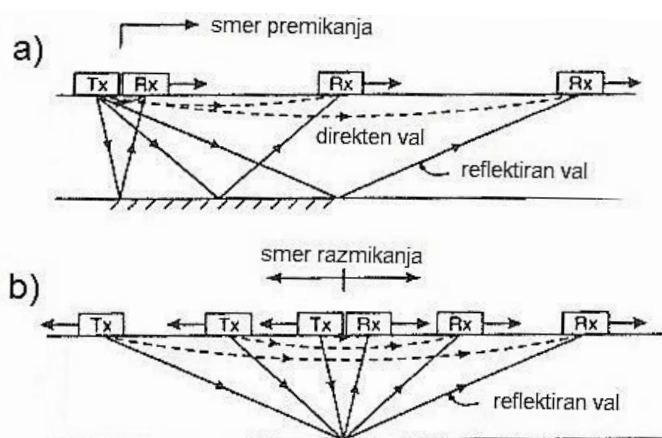
Poznamo tri glavne načine izvajanja georadarskih meritev:

- refleksijsko profiliranje, kjer sta lahko oddajna antena Tx in sprejemna antena Rx združeni v eno oddajno – sprejemno anteno (Slika 17:a)) ali pa ločeni anteni (Slika 17:b)),



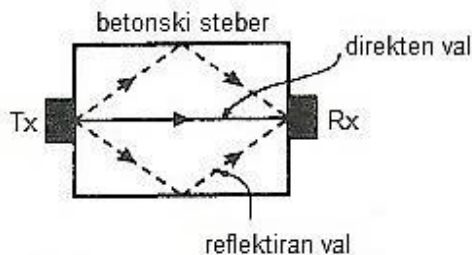
Slika 17: Shematični prikaz refleksijskega profiliranja pri georadarski metodi (Gosar in Ravnik, 2007)

- širokokotna refleksija in refrakcija (angl. Wide angle reflection and refraction), kjer je prvi način izvajanja je takšen, da je oddajna antena Tx fiksna, premika pa se sprejemna antena Rx (Slika 18:a)), pri drugem načinu pa gre za sondiranje s skupno sredinsko točko (angl. Common midpoint) (Slika 18:b)),



Slika 18: Shematični prikaz načinov širokokotne refleksije in refrakcije (Gosar in Ravnik, 2007)

- in radarsko presvetljevanje ali radarska tomografija (angl. transillumination, radar tomography) se v gradbeništvu uporablja predvsem za kontrolo betonskih stebrov. Shematični prikaz izvajanja radarskega presvetljevanja prikazuje spodnja slika (Slika 19:).



Slika 19: Shematični prikaz radarskega presvetljevanja ali radarske tomografije (Gosar in Ravnik, 2007)

Na katerega izmed zgoraj prikazanih načinov se izvajajo georadarske meritve, vpliva predvsem to, kaj je predmet preiskave oziroma kakšen dostop do preizkušanca je mogoč. V splošnem se lahko reče, da je z georadarsko metodo mogoče zaznati vse vrste dielektričnih anomalij znotraj preizkušanca, ne glede na njihovo obliko. Anomalije lahko predstavljajo meje med plastmi, dolgi linijski objekti (npr. cevi) ali pa lokalne anomalije bodisi kvadratnih, okroglih ali poljubnih volumskih oblik. Georadarski merilni sistem lahko, predvsem z izbiro frekvence antene, prilagodimo tako, da prednostno zaznava določeno vrsto anomalije. S tem je mišljena predvsem velikost zaznane anomalije glede na ločljivost (Daniels, 2004).

Na širjenje elektromagnetnega valovanja pomembno vplivajo električne in magnetne lastnosti materiala. Pri penetraciji elektromagnetnega valovanja v globino in pri odbojih na anomalijah se energija elektromagnetnega valovanja razprši in uduši. Amplituda odbitega vala je višja, večja kot je razlika v elektromagnetnih lastnostih med dvema materialoma. Amplituda odboja pa ni odvisna samo od različnih elektromagnetnih lastnosti materialov, skozi katere valovi penetrirajo, ampak tudi od izbire antene, torej od izhodne frekvence in jakosti valov. Količini, ki pomembno opisujeta širjenje elektromagnetnih valov v globino sta še hitrost valov in dušenje ali atenuacija.

Dušenje zmanjšuje količino pridobljenih informacij, saj vpliva na globinski doseg, posledično je interpretacija rezultatov skromnejša. Optimalna sestavljenost merilnega sistema oz. optimalna izbira antene, ki bi pri zahtevanem globinskem dosegu omogočala pridobitev podatkov z največjo možno ločljivostjo, je torej pomemben del načrtovanja meritev z georadarjem. Globina penetracije elektromagnetnih valov je namreč pogojena s frekvenco valovanja. Valovna dolžina valovanja je obratno sorazmerna s frekvenco, odvisna pa je tudi od dielektrične konstante materiala. Valovna dolžina valovanja neposredno določa ločljivost rezultatov meritev.

3.2 Za georadar pomembne elektromagnetne lastnosti materiala

Radargram, zanj se večkrat uporablja tudi izraz georadarski profil, sam po sebi ne predstavlja slike globinskega prereza, izmerjenega z georadarjem. Predstavlja namreč samo časovno odvisen odziv elektromagnetnega valovanja na globinsko strukturo preizkušanca, torej prenos energije elektromagnetnega valovanja v globino, skozi plasti različnih materialov, z različnimi lastnostmi (Jol, 2009).

Pomembno je vedeti, da na globino penetracije in širjenje elektromagnetnega valovanja, poleg frekvence, pomembno vplivajo tudi elektromagnetne lastnosti materiala, skozi katerega se valovanje širi.

Elektromagnetne lastnosti materiala so odvisne od sestave materiala ter od vsebnosti vlage, kar oboje vpliva tudi na hitrost širjenja in na dušenje elektromagnetnega valovanja (Gosar in Ravnik, 2007).

V nadaljevanju bodo izmed elektromagnetnih lastnosti materialov na kratko opisane naslednje lastnosti:

- a) dielektričnost
- b) električna prevodnost
- c) magnetna permeabilnost

a) Dielektričnost

Dielektričnost materiala predstavlja njegovo sposobnost shranjevanja in oddajanja energije elektromagnetnega valovanja v obliki električnega naboja. Dielektričnost materiala se lahko opiše tudi kot sposobnost omejitve prehoda prostih nabojev, ali kot stopnjo polarizacije v materialu pod vplivom električnega polja. Običajno je dielektričnost izražena kot brezdimenzionalna relativna dielektrična konstanta materiala (ϵ_r) in se jo določi po enačbi (3.1):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \quad (3.1)$$

kjer je:

- ϵ_r – relativna dielektrična konstanta materiala,
- ϵ – dielektrična konstanta materiala,
- ϵ_0 – dielektrična konstanta vakuuma.

Dielektrična konstanta brezzračnega prostora ali vakuuma je podana kot vrednost $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ F/m in se praktično ne razlikuje od vrednosti dielektrične konstante zraka. V starejši literaturi je za relativno dielektrično konstanto materiala pogosto uporabljen kar izraz dielektrična konstanta (K), zato je v praksi ta izraz še vedno precej uporabljan (Jol, 2009).

Elektromagnetno valovanje se na meji med dvema materialoma odbije. Za določitev amplitude in faze odbitega valovanja je potrebno poznati relativni dielektrični konstanti materiala obeh materialov, ki določata odbojni koeficient r . Ta se lahko za neprevoden material in konstantno frekvenco valovanja določi po poenostavljeni enačbi (3.2):

$$r = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r2}} - \sqrt{\varepsilon_{r1}}}{\sqrt{\varepsilon_{r2}} + \sqrt{\varepsilon_{r1}}}, \quad (3.2)$$

kjer je:

- r – odbojni koeficient,
- ε_{r1} – relativna dielektrična konstanta materiala 1,
- ε_{r2} – relativna dielektrična konstanta materiala 2.

Kadar velja $\sqrt{\varepsilon_{r2}} > \sqrt{\varepsilon_{r1}}$, je odbojni koeficient pozitiven in faza valovanja se ne spremeni, sicer se spremeni, kar nam pove, da je valovanje na meji, kjer je prišlo do odboja, penetriralo v material z manjšo relativno dielektrično konstanto. To nam nakazuje na to, za kakšen material lahko gre.

b) Električna prevodnost

Električna prevodnost materiala predstavlja njegovo sposobnost pretakanja električnega naboja, kar zaznamo kot električni tok. V kovinah so nosilci naboja prosti elektroni, medtem ko so v raztopinah nosilci naboja kationi in anioni. Med nosilci nabojev prihaja do naključnih trkov, kar povzroča izgube energije, ta se sprošča v obliki toplote. Snovi, ki električnega toka ne prevajajo oz. ga prevajajo slabo imenujemo izolatorji (Jol, 2009).

Električno prevodnost, po enačbi (3.3), izrazimo kot recipročno vrednost specifične električne upornosti.

$$\sigma = \frac{1}{\rho}, \quad (3.3)$$

kjer je:

- σ – električna prevodnost (izražena v enoti $1/\Omega\text{m} = \text{S/m}$),
- ρ – specifična električna upornost (izražena v Ωm).

Hitrost širjenja valovanja je odvisna predvsem od relativne dielektrične konstante snovi, ki jo pogojuje tudi vlažnost materiala. V frekvenčnem območju, v katerem delujejo merilni sistemi georadarja, ima voda relativno dielektrično konstanto približno 80, medtem ko imajo suhi trdni materiali, zemljine in kamnine bistveno nižje relativne dielektrične konstante. Hitrost širjenja valovanja je obratno sorazmerna z vsebnostjo vlage in relativno dielektrično konstanto snovi. Električna prevodnost pa je premo sorazmerno z vsebnostjo vode in relativno dielektrično konstanto snovi. Spodnja preglednica (Preglednica 1:) prikazuje podatke o električni prevodnosti in relativni dielektrični konstanti posameznih snovi, izmerjenih pri frekvenci valovanja 100 MHz.

Preglednica 1: Električna prevodnost in relativna dielektrična konstanta posameznih snovi, izmerjenih pri frekvenci valovanja 100 MHz (Jol, 2009)

Material	Električna prevodnost σ [mS/m]	Relativna dielektrična konstanta materiala ϵ_r [-]
Zrak	0	1
Sladka voda	0,1 – 10	78 (25°C) – 88
Slana voda	4000	81 – 88
Pesek (vlažen)	0,1 – 10	10 – 30
Pesek (suh)	0,0001 – 1	3 – 6
Glina (vlažna)	100 – 1000	15 – 40
Glina (suha)	1 – 100	2 – 20
Beton (vlažen)	10 – 100	10 – 20
Beton (suh)	1 – 10	4 – 10
Opeka (vlažna)	< 0,01	8 – 12
Opeka (suha)	< 0,001	4 – 8
Apnenec (vlažen)	10 – 100	6 – 15
Apnenec (suh)	0,001 – 0,0000001	4 – 8
Granit (zdrobljen in vlažen)	1 – 10	5 – 15
Granit (suh)	0,001 – 0,00001	5 – 8
Peščenjak (vlažen)	0,01 – 0,001	5 – 15
Peščenjak (suh)	0,001 – 0,0000001	4 – 7

Hitrost širjenja valovanja je največja v kompaktnih snoveh, ki ne vsebujejo veliko vode, kjer je tudi dušenje najmanjše. Elektromagnetno valovanje se torej ugodno širi v snoveh z veliko relativno dielektrično konstanto in nizko električno prevodnostjo (Daniels, 2004).

c) Magnetna permeabilnost

Feromagnetni minerali v materialu imajo lahko precejšen vpliv na hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja in pa dušenje le tega. Ker pa je v večini materialov, ki se preiskujejo z georadarjem, vsebnost feromagnetnih mineralov zanemarljiva, magnetna permeabilnost materiala običajno nima velikega vpliva na širjenje elektromagnetnega valovanja. Za njeno vrednost se pogosto privzame kar vrednost magnetne permeabilnosti vakuuma $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,257 \cdot 10^{-6}$ H/m, kjer je H enota električne induktance Henry oziroma Vs/A. Z upoštevanjem, da je $\mu = \mu_0 \mu_r$, slednjemu torej ustreza $\mu_r = 1$ (Jol, 2009).

Dielektričnost in električna prevodnost sta tisti elektromagnetni lastnosti materiala, ki najbolj vplivata na širjenje valovanja, medtem ko magnetna permeabilnost redkeje vpliva na širjenje valovanja. Slabo električno prevodni materiali predstavljajo idealen preizkušane, saj bo v takšnih primerih elektromagnetno valovanje uspelo penetrirati do velikih globin in ponudilo širok spekter informacij o globinski strukturi (Jol, 2009).

3.3 Hitrost širjenja radarskih valov

V kolikor lahko hitrost širjenja valovanja izmerimo ali izračunamo, lahko potem na podlagi izmerjenega t.i. dvojnega časa potovanja (angl. TWT – two way traveltime) določimo debelino plasti ali pa globino anomalije, kar je oboje pogosto namen preiskave (Daniels, 2004).

Temelj za obravnavo hitrosti širjenja elektromagnetnega valovanja predstavlja Maxwellova teorija. Predpostavi se, da sta magnetna permeabilnost in relativna dielektrična konstanta vakuuma konstanti, neodvisni od frekvence valovanja, material pa homogen in izotropen. Material se obravnava kot idealen izolator, pri katerem ni pojava dušenja, ki se sicer pojavi pri širjenju valovanja skozi vsak material (Daniels, 2004).

Hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja se v splošnem določi po enačbi (3.4):

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}, \quad (3.4)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}, \quad (3.5)$$

kjer je:

- v – hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja skozi material,
- μ – magnetna permeabilnost materiala, $\mu = \mu_0\mu_r$,
- ε – dielektrična konstanta materiala, $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$,
- c – hitrost svetlobe v vakuumu, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Ker magnetna permeabilnost materiala običajno nima velikega vpliva na širjenje elektromagnetnega valovanja in lahko predpostavimo $\mu_r = 1$, se lahko hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja skozi homogene in izotropne materiale v_r , ob upoštevanju izraza (3.5), izračuna po enačbi (3.6):

$$v_r = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}, \quad (3.6)$$

Globino anomalije ali debelino plasti d se lahko nato izračuna po enačbi (3.7):

$$d = v_r \frac{t}{2}, \quad (3.7)$$

kjer je:

t – dvojni čas potovanja valov od oddajne antene do anomalije.

Hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja v zraku je praktično enaka tisti v vakuumu $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, zato se pogosto upošteva kar enaka vrednost. Pri metodi z georadarjem se čas potovanja impulza valovanja med oddajno in sprejemno anteno zaradi kratkih razdalj meri v nanosekundah (10^{-9} s) (Daniels, 2004).

Valovna dolžina elektromagnetnega valovanja v materialu se določi po enačbi (3.8):

$$\lambda_m = \frac{v_r}{f}, \quad (3.8)$$

kjer je:

λ_m – valovna dolžina elektromagnetnega valovanja v materialu,
 f – frekvenca valovanja (Daniels, 2004).

Preglednica 2: Vrednosti relativne dielektrične konstante materiala, hitrosti širjenja elektromagnetnega valovanja in valovne dolžine v različnih materialih (Daniels, 2004)

Material	Relativna dielektričnost materiala [-]	Hitrost širjena elektromagnetnega valovanja [cm/ns]	Valovna dolžina valovanja [cm]	
			100 MHz	1 GHz
Zrak	1	30	300	30
Beton	9	10	100	10
Sladka voda	80	3,35	33	3,3

S spremembo frekvence elektromagnetnega valovanja se nekoliko spremeni relativna dielektrična konstanta snovi, zato se za različne frekvence nekoliko spremeni tudi hitrost širjenja valovanja. Vendar pa je v območju frekvenc merilnih sistemov georadarja ta sprememba praktično tako majhna, da jo je moč zanemariti (Daniels, 2004).

3.4 Izbira antene

Ker frekvenca izbrane antene neposredno vpliva na valovno dolžino elektromagnetnega valovanja, se z izbiro antene definira ločljivost merilnega sistema georadarja. Frekvenca antene pa vpliva tudi na dušenje energije elektromagnetnega valovanja in s tem na globino penetracije georadarskih valov. Antena oz. izbira antene merilnega sistema georadarja je zaradi omenjenih vplivov eden izmed ključnih korakov v načrtovanju preiskave z georadarjem.

V merilnih sistemih georadarja se v glavnem uporabljajo antene z oddajno frekvenco v območju 100 MHz – 3 GHz. Ob uporabi antene z nižjo frekvenco, elektromagnetno valovanje penetrira globlje, vendar ker je valovna dolžina tega valovanja velika, je ločljivost meritev s takšno anteno slabša. Ločljivost je definirana kot najmanjša razdalja med dvema spremembama, ki jo je z izbrano anteno še mogoče zaznati, definira pa jo valovna dolžina valovanja. Kadar se uporabi antena z višjo frekvenco, elektromagnetno valovanje ne penetrira tako globoko, vendar ker je valovna dolžina tega valovanja manjša, je ločljivost meritev s takšno anteno boljša.

Izbira antene je torej vedno kompromis med zahtevano globino penetracije elektromagnetnih valov in ločljivostjo, tako da predstavlja pomemben korak pri sestavi merilnega sistema georadarja. Pred izvajanjem meritev z georadarjem je potrebno razmisliti, kaj je predmet preiskave, do katere globine naj valovanje penetrira, oceniti velikost pričakovanih anomalij in določiti zahtevano ločljivost. Na podlagi tega se izbere anteno, ki bo uporabljena v merilnem sistemu georadarja (Jol, 2009).

3.5 Izgube energije elektromagnetnega valovanja

Do izgub energije elektromagnetnega valovanja pride predvsem zaradi absorpcije energije valovanja v materialu ter razprševanja in absorpcije energije med odboji na mejah različnih plasti.

Največji vpliv na izgubo energije valovanja ima absorpcija energije v materialu, ki je premo sorazmerna z električno prevodnostjo materiala in frekvenco. Koeficient dušenja α v enoti Np/m se določi po enačbi (3.9) (Jol, 2009):

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \left(\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon \omega} \right)^2} - 1 \right] \right)^{0,5}, \quad (3.9)$$

kjer je:

- α – koeficient dušenja, Np/m = 8,686 dB/m,
- ω – krožna frekvenca, $\omega = 2\pi f$.

Večja kot je frekvenca valovanja in električna prevodnost materiala, večje je dušenje in posledično manjša globina penetracije elektromagnetnega valovanja. Velikost dušenja energije valovanja v materialu v odvisnosti od frekvence uporabljene antene je za različne materiale prikazana spodaj (Preglednica 3):

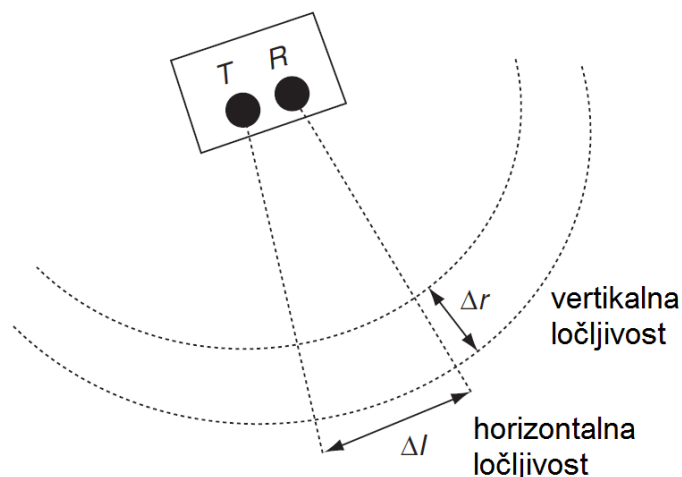
Preglednica 3: Vrednosti dušenja energije valovanja v materialu v odvisnosti od frekvence uporabljene antene za različne materiale (Daniels, 2004)

Material	Izgube pri 100 MHz [dBm ⁻¹]	Izgube pri 1 GHz [dBm ⁻¹]
Pesek (suh)	0,01 – 2	0,1 – 20
Led	0,1 – 5	1 – 50
Sladka voda	0,1	1
Slana voda	100	1000
Beton	0,5 – 2,5	5 – 25
Opeka	0,3 – 2,0	3 – 20

3.6 Ločljivost rezultatov meritev z georadarjem

Ločljivost definira najmanjšo medsebojno razdaljo dveh sosednjih oblik, ki jo je še mogoče zaznati z izbranim merilnim sistemom georadarja. Manjša kot je valovna dolžina valovanja, večja je ločljivost. Valovna dolžina valovanja je po enačbi (3.8) obratno sorazmerna s centralno frekvenco antene.

Kadar se uporablja izraz ločljivost, je potrebno ločevati med vertikalno ločljivostjo in horizontalno ločljivostjo merilnega sistema georadarja. Obe ločljivosti sta funkciji valovne dolžine valovanja in pa lastnosti materiala.



Slika 20: Shematični prikaz pojmov horizontalna ločljivost in vertikalna ločljivost (Jol, 2009)

Vertikalna ločljivost je natančneje definirana kot sposobnost zaznavanja dveh časovno zaporednih signalov in je funkcija valovne dolžine valovanja. Definirana je tudi kot najmanjša vertikalna oddaljenost, na kateri je možno dva georadarska odboja obravnavati kot dve ločeni anomaliji. Kadar so anomalije, od katerih se signal odbije, med seboj oddaljene manj kot polovico valovne dolžine, se odbojni signal združi z drugimi odbojnimi signali, kar se zazna kot t.i. združen odboj. Iz t.i. združenega odboja pa je zelo težko določiti posamezen odziv oziroma odboj od posamezne anomalije (Daniels, 2004).

Za določitev vertikalne ločljivosti se predlaga uporaba izraza $0,5 \cdot \lambda$, kjer se valovna dolžina λ določi po enačbi (3.8).

Horizontalna ločljivost je definirana kot sposobnost razlikovanja med dvema oblikama ali spremembama na enaki globini. Horizontalna ločljivost je prav tako odvisna od hitrosti širjenja elektromagnetnega valovanja in frekvence valovanja, vendar pa na horizontalno ločljivost pomembno vpliva še oddaljenost od antene. Najmanjša razdalja med spremembama na enaki globini, ki jo je še mogoče zaznati z uporabljenim merilnim sistemom se določi po enačbi (3.10) (Jol, 2009):

$$\Delta l = \sqrt{\frac{d \lambda}{2}}, \quad (3.10)$$

kjer je:

- Δl – horizontalna ločljivost,
- d – oddaljenost od antene (globina).

V spodnji preglednici (Preglednica 4:) je prikazano, kako se spreminja valovna dolžina valovanja v materialu z relativno dielektrično konstanto $\epsilon_r = 7,4$ pri uporabi anten z najbolj pogostimi centralnimi frekvencami valovanja. Relativna dielektrična konstanta $\epsilon_r = 7,4$

ustreza zidovini kakršno predstavljajo kamniti zidovi predstavljeni v nadaljevanju diplomske naloge. Razvidno je, da višja kot je frekvenca izbrane antene, manjša je valovna dolžina valovanja in posledično je ločljivost rezultatov meritev večja.

Preglednica 4: Valovna dolžina valovanja v materialu z relativno dielektrično konstanto $\epsilon_r = 7,4$ (hitrost širjenja valovanja v materialu je $v = 0,110$ m/ns), pri uporabi anten z najbolj pogostimi centralnimi frekvencami valovanja.

Frekvenca valovanja (f) [MHz]	Valovna dolžina valovanja (λ) [cm]
900	12,2
1600	6,9
2000	5,5

3.7 Prednosti in slabosti georadarske metode

Prednosti georadarske metode so:

- Popolnoma neporušna preiskava; vse georadarske meritve se izvajajo brez posega v medij, tako da ne povzročajo kakršnegakoli oslavljenja ali poškodbe medija. To je zelo pomembno pri monitoringu betonskih pregrad, betonskih oblog predorov, mostov in voziščnih konstrukcij ter preiskavah stavb kulturne dediščine.
- Meritve so »in – situ«; izvajajo se na intaktnih medijih v njihovem naravnem stanju, tako da posredujejo dejanske geofizikalne lastnosti.
- Neomejena ponovljivost meritev; omogoča namreč neomejeno ponavljanje meritev z enakim merilnim sistemom in enakimi nastavitvami, kar omogoča primerjanje rezultatov različnih meritev na istih mestih. Časovno ponavljanje meritev dopušča kontrolo nad spreminjanjem materialnih lastnosti in strukture preizkušanca s časom.
- Zveznost in prostornost zajema podatkov; kar pomeni, da se lahko posnamejo dvodimenzionalne časovne sekcije (georadarski profili) poljubne oziroma zahtevane dolžine, ki se jih nato z obdelavo pretvori v dvodimenzionalne globinske sekcije. V kolikor so ti profili posneti po vnaprej pripravljeni ortogonalni mreži, se lahko zložijo v tridimenzionalni prikaz. Tridimenzionalni prikaz pa omogoča bistveno lažjo interpretacijo rezultatov (Živanović, 2002).

Slabosti georadarske metode so:

- V nasprotju z zvočnimi valovi, elektromagnetni valovi ne morejo potovati skozi kovino, zaradi tega jih ni mogoče uporabljati za preiskovanje kovin, vseeno pa je mogoče z njimi zaznati kovinske vključke v preizkušancu.

- Elektromagnetno valovanje lahko v suhih in drobnozrnatih materialih penetrira precej globoko, sposobnost penetriranja pa se močno zmanjša v vlažnih in zaglinjenih materialih, materialih z visoko vsebnostjo feromagnetnih snovi in kovinskih vključkov (Cotič, 2010).

4 PODROČJA UPORABE GEORADARSKE NAPRAVE V GRADBENIŠTVU

Georadar se sicer uporablja za širok spekter preiskav, v gradbeništvu pa se uporablja predvsem za preiskovanje temeljnih tal, vse pogosteje pa tudi za preiskovanje konstrukcij in konstrukcijskih elementov iz konstrukcijskih materialov kot so beton, kamen, opeka in asfalt.

Georadarska metoda omogoča:

- preiskave temeljnih tal,
- odkrivanje podzemnih vodov,
- preiskave voziščnih konstrukcij,
- preiskave betonskih oblog v predorih,
- preiskave kamnitih in opečnih zidov,
- preiskave betonskih oz. armirano betonskih elementov.

Z georadarskimi preiskavami temeljnih tal je možno ugotoviti debelino posameznih plasti, oceniti vlažnost ter nivo podtalne vode. Georadarska metoda daje dobre rezultate v prodnatih, prodno – peščenih in peščenih tleh. Za preiskovanje tal, kjer prevladujejo gline in laporji, georadarska metoda zaradi velikega dušenja elektromagnetnih valov ni primerna (Živanović, 2002).

Z georadarskimi preiskavami se lahko hitro, učinkovito in dovolj natančno določijo položaji podzemnih vodov. Na osnovi oblike in velikosti anomalije je možno predvideti vrsto podzemnih vodov. Na podlagi zaznanih sprememb elektromagnetnih lastnosti med suhimi in vlažnimi območji v okolici vodovodnih napeljav ali kanalizacijskih vodov pa je možno locirati mesta iztekanja tekočine (Živanović, 2002).

Georadarska merjenja so tudi učinkovit način, s katerim se lahko prodre v cestno telo in preiskuje plasti asfalta, betona, vrhnje plasti nasipa - posteljice, sam nasip vse do intaktne podlage. Georadarske meritve z visoko ločljivostjo omogočajo določevanje položaja in sledenje meja znotraj umetno proizvedenih plasti asfalta, betona in nasipa, vse do intaktne podlage. Spremembe elektromagnetnih lastnosti znotraj posamezne plasti posredno kažejo na spremembe geomehanskih lastnosti, kot so razpokanost, kompaktnost ali pa večje praznine v plasti. Odvisnost elektromagnetnih lastnosti od vlažnosti, omogoča jasno razlikovanje med suhimi deli plasti in vlažnimi, kar na primer omogoča lociranje območij vdora podtalne vode v plasti posteljice (Živanović, 2002).

Georadar je mogoče uporabiti tudi za preverjanje stanja betonske obloge predora in hribine okoli predora. Pri ugotavljanju stanja betonske obloge se poleg ocene integritete betona lahko ugotovi tudi tako položaj armaturne mreže v betonu, kakor tudi mesta odstopanja betonske obloge od hribine (Živanović, 2002).

Za potrebe ocene stanja gradbenih konstrukcij se georadarska metoda uporablja za preiskave zidov in zahtevnih betonskih konstrukcijskih elementov.

Pri preiskavah kamnitih in opečnih zidov z georadarjem je mogoče:

- zaznati in locirati morebitne votline ali kovinske oziroma lesene vključke v zidu,
- določiti morfologijo zidu in območja rekonstrukcij,
- izvajati kontrolo kakovosti izvedbe injektiranja pri sanaciji zidu,
- določiti debelino posameznih plasti zidu,
- določiti odstopanje posameznih plasti večslojnih zidov,
- določiti debelino zidu, ki je dostopen samo iz ene strani (kletni zidovi),
- določiti potek inštalacijskih vodov (električna napeljava, vročevod in prezračevalni kanali) in dimniških kanalov,
- določiti območja zadržane vode oziroma območja povečane vlažnosti (Bosiljkov in sod., 2011).

Pri preiskavah zahtevnih konstrukcijskih elementov, kot so na primer armirano betonski ali pa sovprežni stebri, je mogoče določiti globino armature in razporeditev armature, pri sovprežnih stebrih pa obliko in orientiranost jeklenega elementa znotraj sovprežnega stebra. Mogoče je tudi oceniti velikost prereza jeklenega elementa znotraj sovprežnega prereza.

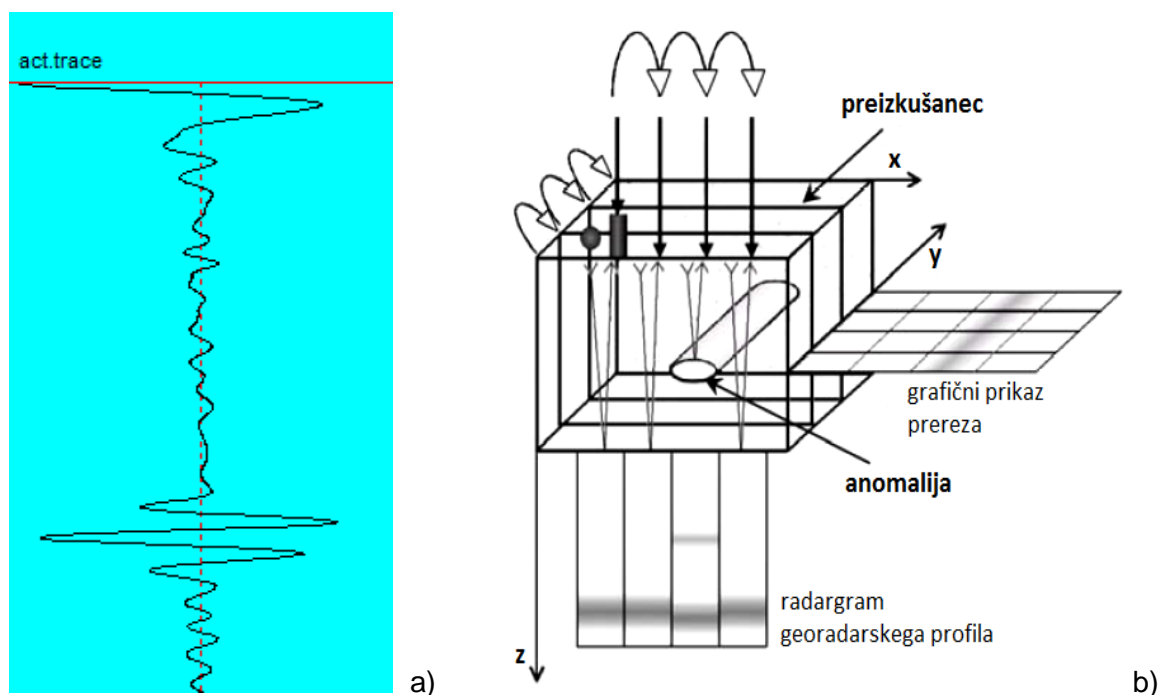
5 OBDELAVA PODATKOV GEORADARSKIH MERITEV

Ker je namen iz surovih podatkov, ki jih pridobimo z georadarskimi meritvami, pridobiti čim več informacij o merjenem območju, jih je potrebno obdelati. Obdelavo podatkov georadarskih meritev skozi niz korakov omogoča široka paleta programske opreme, ki temelji na različnih algoritmičnih obdelave.

Za lažje razumevanje je sprva na kratko podan opis glavnega izrazoslovja, povezanega s podatki georadarskih meritev in njihovo obdelavo:

- **vzorec** (angl. sample) predstavlja amplitudo odboja signala z določenim časom prihoda odboja do sprejemne antene,
- **sled** (angl. trace) je zaporedje vzorcev, ki prikazuje spreminjanje amplitude odboja signala v odvisnosti od časa prihoda odboja do sprejemne antene,
- **razmik med sledmi** (angl. traceincrement) predstavlja vnaprej določen dolžinski interval, v katerem se sledi zajemajo tako, da je vsaki sledi v posameznem profilu mogoče natančno določiti položaj v tem profilu,
- **časovni prirastek sledi** (angl. timeincrement) predstavlja čas med dvema zaporednima vzorcema,
- **dvojni potovalni čas** (angl. two-way traveltime) predstavlja čas potovanja signala do mesta odboja in nazaj do sprejemne antene,
- **georadarski profil** (angl. GPR section, GPR profile) predstavlja skupek enakomerno razporejenih sledi, zajetih med georadarsko meritvijo vzdolž linije, ki definira položaj, orientacijo in dolžino georadarskega profila,
- **medsebojni razmik med vzporednimi georadarskimi profili** (angl. line spacing) definira raster mreže, sestavljene iz vertikalnih in horizontalnih linij, vzdolž katerih se med meritvijo zajema sledi,
- **grafični prikaz refleksijske sledi** (angl. A-scan) predstavlja krivulja spreminjanja amplitude odboja signala v odvisnosti od časa prihoda odboja do sprejemne antene,
- **radargram georadarskega profila** (angl. B-scan) predstavlja dvodimenzionalni grafični prikaz vseh sledi georadarskega profila in
- **grafični prikaz prereza** (angl. C-scan, depthslice) predstavlja dvodimenzionalni grafični prikaz prereza pri določenem dvojnem potovalnem času, ki definira globino prikazanega prereza v preizkušancu. Analogno lahko na podlagi dvojnega potovalnega časa in zveze (3.7) prikažemo dvodimenzionalni grafični prikaz prereza na določeni globini (angl. depthslice).

Del opisanega izrazoslovja je dodatno ponazarja spodnja slika (Slika 21:).



Slika 21: Načini grafičnega prikazovanja rezultatov georadarskih meritev; a) grafični prikaz refleksijske sledi v programu Reflex-Win in b) shematični prikaz grafičnega prikaza prereza ter radargrama georadarskega profila (Kohl in sod., 2003)

5.1 Proces obdelave

Za uspešno obdelavo podatkov je potrebno izpolniti tri glavne naloge (Yilmaz, 1987):

- izbrati ustrezne korake obdelave in njihovo zaporedje,
- izbrati ustrezen nabor parametrov v vsakem posameznem koraku in
- ovrednotiti rezultat oziroma vpliv posameznega koraka ter opaziti težave, ki nastanejo zaradi napačne izbire parametrov.

Posledično je kvaliteta obdelave podatkov georadarskih meritev, in s tem količina pridobljenih informacij o merjenem območju v največji meri odvisna od obdelovalca. Obdelovalčeva presoja, s katerimi koraki in katerimi parametri je smiselno obdelati surove podatke, lahko vpliva na kvaliteto končnega izdelka v enaki meri kot sama učinkovitost algoritma za obdelavo.

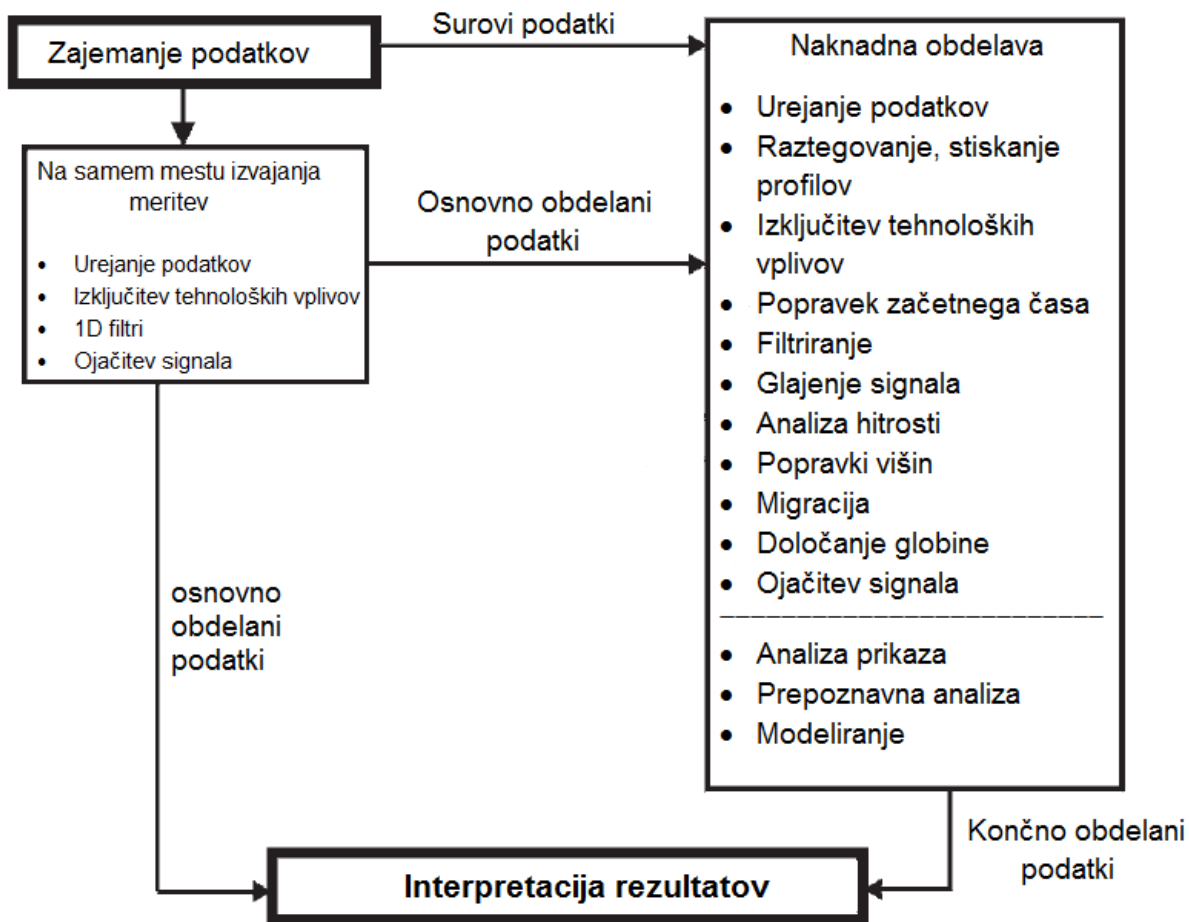
Obdelovalci radarskih podatkov se odločajo za uporabo posameznega algoritma na podlagi lastnih izkušenj in sposobnosti ter glede na cilj same preiskave. Pomembno je, da se sproti vodi natančna evidenca vseh izvedenih korakov in uporabljenih parametrov pri posameznem koraku.

V spodnji preglednici (Preglednica 5:) so zbrani splošno uporabljani koraki v procesu obdelave podatkov georadarskih meritev s krajšimi opisi posameznega koraka.

Preglednica 5: Opis korakov obdelave podatkov georadarskih meritev (Jol, 2009)

Urejanje podatkov (angl. Editing)	Odstranitev ali korekcija slabših podatkov ter sortiranje, rezanje in normiranje vseh podatkov.
Raztegovanje, stiskanje profilov (angl. Rubber-banding)	Zagotovitev enakomerne razporejenosti podatkov.
Izključitev tehnoloških vplivov (angl. Dewow)	Korekcija vpliva nižjih frekvenc in nihanj v jakosti enosmernega toka.
Popravek začetnega časa (angl. Time-zero correction)	Nastavitev začetnega časa meritve na dejanski položaj površine merjenega območja.
Filtriranje (angl. Filtering)	Odstranitev šumov z uporabo različnih enodimenzionalnih in dvodimenzionalnih filtrov.
Glajenje signala (angl. Deconvolution)	Glajenje signala odbitega valovanja. Odstranitev konic iz signala valovanja.
Analiza hitrosti (angl. Velocity analysis)	Določanje hitrosti elektromagnetnega valovanja.
Popravki višin (angl. Elevation correction)	Popravki zaradi neravnosti površine merjenega območja.
Migracija (angl. Migration)	Odstranitev vpliva geometrije izvajanja meritev in prostorskega širjenja energije valovanja.
Določanje globine (angl. Depth conversion)	Pretvorba dvojnega časa potovanja valovanja v globino.
Ojačitev signala (angl. Gain)	Izbira primernih ojačitev signala za boljši prikaz in interpretacijo podatkov.
Slikovna analiza (angl. Image analysis)	Uporaba različnih orodij za prepoznavanje vzorcev ali lastnosti.
Prepoznavna analiza (angl. Attribute analysis)	Dodelitev značilnosti signala prepoznavnim vzorcem ali lastnostim preizkušanca.
Modeliranje (angl. Modelling analysis)	Simulacija odzivov elektromagnetnega valovanja.

Shematični prikaz procesa obdelave predstavlja spodnja slika (Slika 22:), ki velja za dober primer prakse in kateremu sledi večina obdelovalcev podatkov georadarskih meritev. Osnovni koraki procesa obdelave se lahko izvedejo že na samem mestu izvajanja meritev. Tako dobimo t.i. osnovno obdelane podatke, ki že lahko služijo za sprotno interpretacijo rezultatov.



Slika 22: Shematični prikaz procesa obdelave podatkov georadarskih meritev (povzeto po Jol, 2009)

Izvedba bolj prefinjenih in posledično bolj zahtevnih korakov mora biti v skladu s potrebami in zahtevami, pa tudi razpoložljivimi sredstvi posameznega projekta, v sklopu katerega se preiskave izvajajo.

Orodja za obdelavo kot so slikovna analiza, prepoznavna analiza in modeliranje so prikazana kot del procesa obdelave, čeprav v praksi služijo bolj kot pripomoček pri interpretaciji, ne pa kot posebne možnosti obdelave. Kot takšni so zelo uporabni za boljši prikaz koristnih informacij iz rezultatov obdelave, še vedno pa veljajo bolj za dodatne možnosti, ki jih za doseganje dobre interpretacije rezultatov ni nujno potrebno koristiti v procesu obdelave (Jol, 2009).

Vredno je omeniti tudi to, da nekatera programska oprema za obdelavo podatkov georadarskih meritev vsebuje precej širšo paleto možnosti obdelave, vključno z aritmetičnimi funkcijami in spektralno analizo. Vendar pa lahko te možnosti, enako kot slikovno analizo, prepoznavno analizo in modeliranje, štejejo kot dodatne možnosti naprednejše interpretacije rezultatov, ne pa kot izboljšave samega procesa obdelave podatkov (Jol, 2009).

V sklopu te diplomske naloge, je bila za obdelavo podatkov georadarskih meritev, uporabljena programska oprema Reflex-Win Version 6.0.5, ki jo je razvilo podjetje Sandmeier Software. Namenjena je obdelavi in pomoči pri interpretaciji podatkov meritev. Posebej je namenjena obdelavi podatkov meritev z georadarjem, refleksijskih in refrakcijskih seizmičnih metod ter metode z ultrazvokom (Sandmeier, 2012).

5.2 Programska oprema

Programska oprema Reflex-Win Version 6.0.5 sestoji iz petih modulov:

- modul dvodimenzionalne analize podatkov (angl. 2D data analysis) ,
- modul analize hitrosti CMP (angl. Common mid point (1D) velocity analysis),
- modul tridimenzionalne interpretacije podatkov (angl. 3D data interpretation),
- modul dvodimenzionalnega modeliranja in simulacije širjenja valov (angl. Modelling),
- modul dvodimenzionalne analize časa potovanja valov (angl. Traveltime analysis) (Sandmeier, 2012).

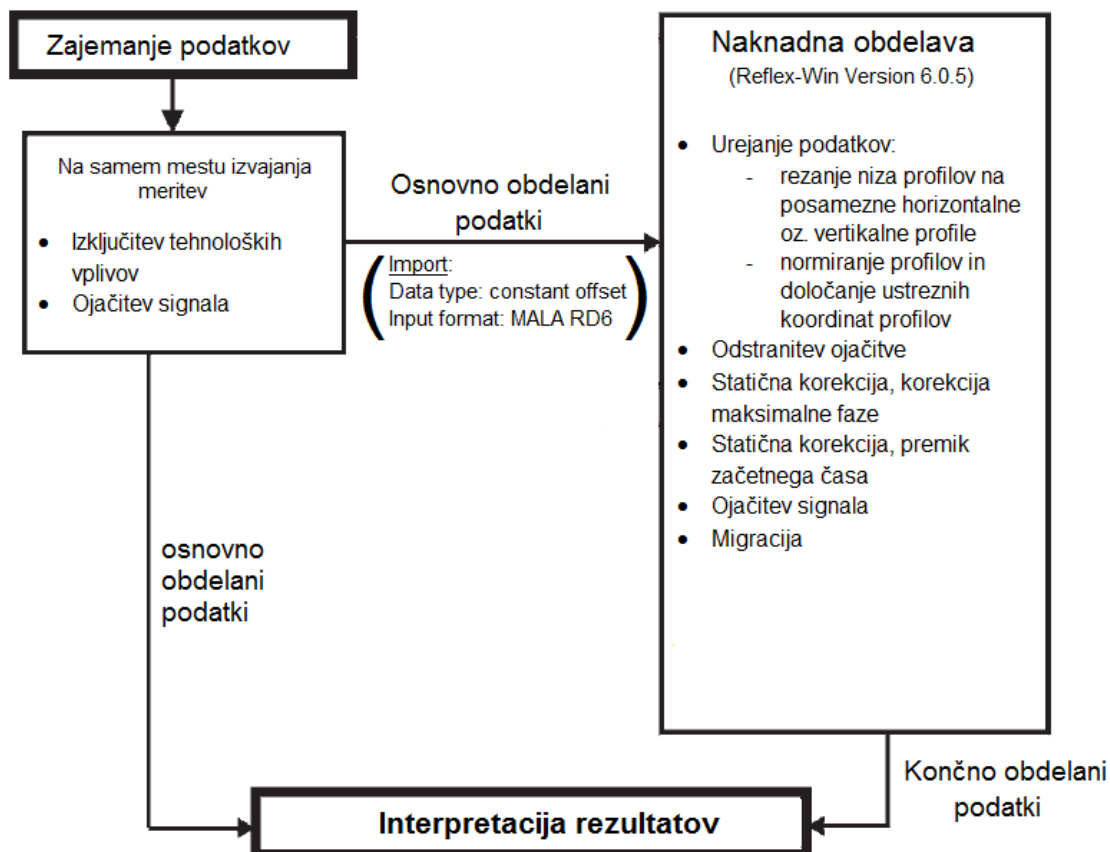
Za obdelavo in interpretacijo podatkov georadarskih meritev sta bila v sklopu diplomske naloge uporabljena modul dvodimenzionalne analize podatkov in modul tridimenzionalne interpretacije podatkov.

Modul dvodimenzionalne analize podatkov omogoča:

- enostaven uvoz zajetih podatkov številnih formatov,
- pretvorbo georadarskega profila ali niza profilov v podatkovno datoteko,
- obdelovanje enega georadarskega profila ali hkratno obdelovanje serije profilov,
- veliko možnosti filtriranja, urejanja, obrezovanja in migracije podatkov,
- veliko različnih možnosti prikaza,
- interaktivno prilagajanje hitrosti valov (Sandmeier, 2012).

Modul tridimenzionalne interpretacije podatkov omogoča prikazovanje posameznih prerezov tridimenzionalnega prikaza v ravninah x, y ali z. Posamezne prereze je mogoče prikazati v samostojnem oknu ali pa se preprosto pomikati po zaporednih prerezih v izbrani ravnini tridimenzionalnega prikaza (Sandmeier, 2012).

V nadaljevanju so predstavljeni koraki procesa obdelave vertikalnega georadarskega profila VERTIKALA 01 (1. meritev, preizkušane Zid_3). Proces obdelave je bil izveden na enak način in v enakem obsegu tudi za vse ostale profile oziroma serije profilov. Shematični prikaz izvedenega procesa obdelave prikazuje spodnja slika (Slika 23:).



Slika 23: Shematični prikaz procesa obdelave podatkov georadarskih meritev, izvedenega v sklopu diplomske naloge

5.2.1 Urejanje podatkov

V koraku urejanja podatkov se izvedeta dva ukrepa na t.i. osnovno obdelanih podatkih oziroma surovih podatkih:

- rezanje niza profilov na posamezne horizontalne oz. vertikalne profile in
- normiranje profilov in določanje ustreznih koordinat profilov.

Pri rezanju niza profilov gre za izvleček (angl. extract) posameznih profilov. Georadarski profili se namreč med izvajanjem meritve sekvenčno zapisujejo v skupno datoteko, ki nato predstavlja niz georadarskih profilov.

Z normiranjem posameznih profilov v naslovni datoteki (angl. fileheader) se doseže, da imajo vsi obdelovani profili enakomeren razmik med sledmi in enak časovni prirastek sledi. Le-to je namreč pogoj oblikovanje datoteke serije profilov.

Pred izvajanjem nadaljnjih korakov v procesu obdelave 3D georadarskih podatkov je dobro ustvariti serije profilov, kar omogoči izvajanje nadaljnjih korakov na celotni seriji profilov in ne več na posameznem georadarskem profilu. Pri ustvarjanju serije profilov je potrebno upoštevati naslednje zahteve:

- serijo sestavlja več vzporednih georadarskih profilov v enakomernem razmiku,
- vsi profili v seriji imajo enakomeren razmik med sledmi,
- vsi profili v seriji imajo enakomeren časovni prirastek,
- vsi profili v seriji imajo enako število vzorcev na sledi in
- vsi profili v seriji imajo enako število sledi.

Obdelava serij profilov se še vedno izvaja v modulu dvodimenzionalne analize podatkov, saj so datoteke serij profilov (angl. 3D datafile) enakega formata kot datoteke posameznih profilov (angl. 2D datafile).

Za potrebe naknadne obdelave v sklopu diplomske naloge sta bili iz georadarskih profilov vsake meritve posameznega zidu ustvarjeni dve takšni seriji profilov; serija profilov 3d_x, ki jo tvorijo horizontalni georadarski profili ter 3d_y, ki jo tvorijo vertikalni profili. V obeh primerih je medsebojni razmik 5 cm, v kakršnem so bili profili tudi zajeti med meritvijo. Na tak način bo, po obdelavi, serije georadarskih profilov mogoče združiti v tridimenzionalni prikaz.

5.2.2 Odstranitev ojačitve

Georadarski merilni sistem omogoča ojačitev signala že na mestu izvajanja meritev (lat. in – situ) z namenom, nekoliko ojačiti amplitudo signala, ki sicer z globino upada. Uporaba takšne ojačitve je smotrna, kadar se izvaja sprotna interpretacija rezultatov meritev na mestu izvajanja meritev. Za naknadno obdelavo georadarskih profilov je zato potrebno naprej odstraniti sistemsko ojačitev signala ter za končni prikaz uporabiti bolj primerno izvedbo ojačitve signala na način, kot je podrobneje opisano v poglavju 5.2.4.

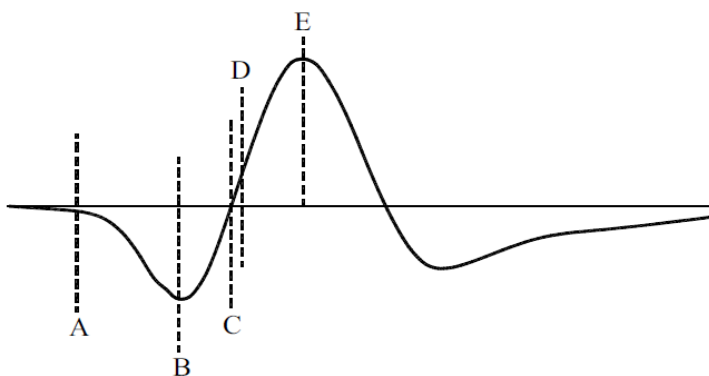
Za odstranitev le-te se izvede korak odstranitev ojačitve (angl. remove header gain), s katerim se dobi georadarski profil brez kakršnekoli ojačitve. To omogoča primerjavo georadarskih profilov, ki so bili sicer lahko pridobljeni z različnimi časovno odvisnimi ojačitvami podanimi na mestu meritve. Lahko pa se takšne georadarske profile, v kolikor se jih obdeluje več, ojača z enako krivuljo ojačitve, kar omogoči lažjo primerjavo in interpretacijo večih georadarskih profilov (Sandmeier, 2012).

5.2.3 Statična korekcija

Ko se antena postavi na ali blizu površine preizkušanca, elektromagnetno valovanje nekoliko spremeni obliko, v materialu se zmanjša nazivna centralna frekvenca elektromagnetnega valovanja v zraku. Prihod odbojnega signala se tako zazna tudi do več desetink nanosekunde kasneje. Čas prihoda odbojnega signala torej ne odraža natančne globine

mesta odboja, pojav pa se imenuje zamik v času odboja (angl. radiation delay). Še posebej opazen je ta pojav v materialih z visoko vsebnostjo vlage (Yelf & Yelf, 2006).

Kadar se želi za interpretacijo podatkov georadarskih meritev uporabiti modul tridimenzionalnega prikazovanja, je potrebno izvesti korekcijo maksimalne faze in odstraniti zamik v času prihoda prvega odbojnega signala vzdolž georadarskega profila. Georadarski profil po opravljeni statični korekciji tako prikazuje samo podatke od t.i. ničelnega časa (angl. zero time) dalje. Določitev ničelnega časa ni enoznačno definirana, saj obstaja več možnosti, kot to prikazuje spodnja slika (Slika 24:).



Slika 24: Opcije za določitev ničelnega časa na sledi (Yelf & Yelf, 2006)

V procesu obdelave podatkov georadarskih meritev za potrebe diplomske naloge je bila kot najustreznejša rešitev na podlagi številnih testnih meritev izbrana možnost E, kar je v našem primeru predstavljalo zamik približno 1,1 ns. Za odstranitev zamika v času prihoda prvega odbojnega signala vzdolž georadarskega profila, sta bila izvedena dva koraka:

- korekcija maksimalne faze (angl. correct max. phase),
- zamik začetnega časa (angl. move starttime)

S korekcijo maksimalne faze, se izhodišče časovne skale premakne na mesto ničelnega časa. Z zamikom začetnega časa se odstranijo začetni deli sledi georadarskega profila, ki se pojavijo pred ničelnim časom (za ničelni čas je privzeta vrednost, določena v naslovni datoteki (angl. fileheader)) (Sandmeier, 2012).

5.2.4 Ojačitev signala

Ker imajo, predvsem zaradi absorpcije energije elektromagnetnega valovanja pri prehajanju skozi medij, odbojni signali s kasnejšimi prihodi na refleksijski sledi pogosto precej manjše amplitude kot zgodnejši prihodi, je dobro signal med procesom obdelave ustrezno ojačiti. Posledično se dobi enakomerne vrednosti amplitud vzdolž refleksijske sledi.

Za ustrezno ojačenje signala je potrebno najprej določiti velikost upadanja amplitude signala z globino oz. z dvojnimi časom. Določi se torej povprečno absolutno vrednost amplitud na enakomernih intervalih dvojnega časa vzdolž refleksijske sledi.

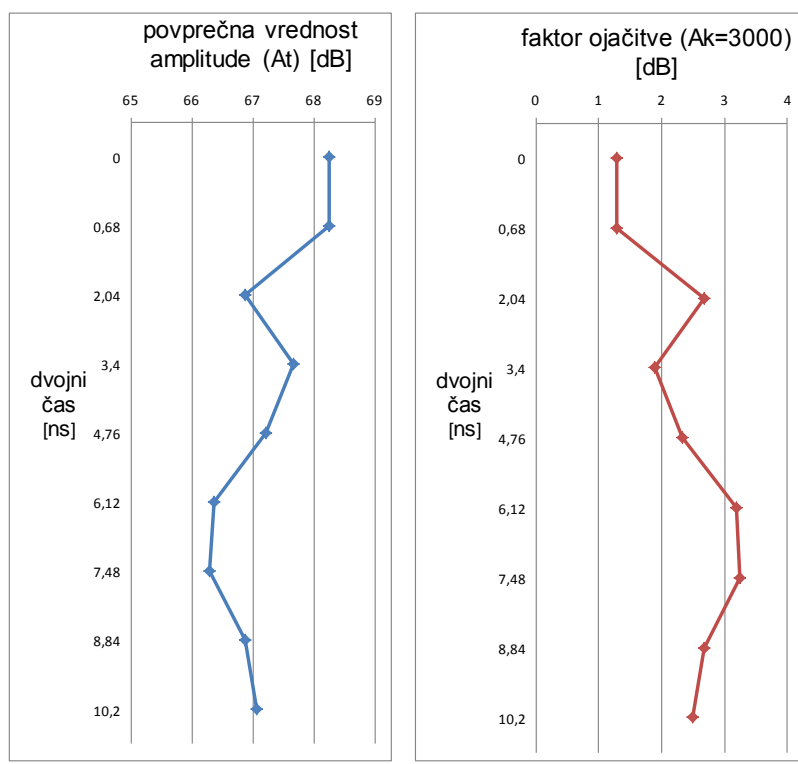
V našem primeru je izbrani interval obsegal 125 vzorcev oz. približno 1,36 ns, saj je bilo potrebno celotno refleksijsko sled, dolžine 10,9 ns, razdeliti na 8 enakih intervalov, kolikor polj za vnos ojačitvene krivulje (angl. gain curve) ponuja uporabljena različica programa ReflexW. Povprečne vrednosti amplitud na posameznih intervalih so bile izračunane na vsaki refleksijski sledi posebej. Krivulja upadanja amplitude odbojnega signala (angl. attenuation curve) je bila dobljena s povprečenjem vrednosti posameznega intervala vseh refleksijskih sledi. Faktor ojačitve se nato določi za vsak takšen interval krivulje upadanja amplitude posebej in se izrazi v enoti dB. Program pri funkciji za vnos ojačitvene krivulje (angl. manual gain(y)) namreč zahteva vnos vrednosti ojačitve v enotah dB. Spodnja slika (Slika 25:) prikazuje krivuljo upadanja amplitude vzdolž refleksijske sledi in krivuljo ojačitve, ki jo predstavljajo faktorji ojačitve vzdolž refleksijske sledi.

Faktor ojačitve v enotah dB se dobi z logaritmično funkcijo razmerja dveh amplitud, kot prikazuje enačba (11) (Testeq, 2012).

$$\text{faktor ojačitve [dB]} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{A_K}{A_t} \right), \quad (11)$$

kjer je:

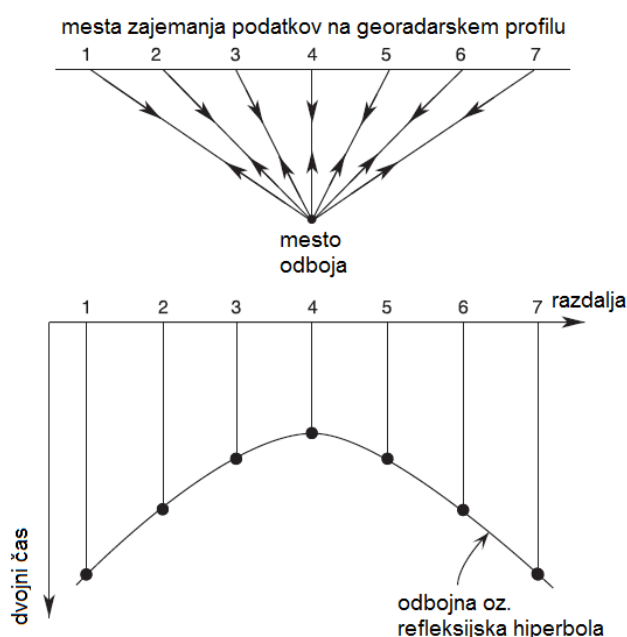
- A_K – povprečna vrednost amplitude, kakršna se želi vzdolž refleksijske sledi,
- A_t – povprečna vrednost amplitude na obravnavanem intervalu.



Slika 25: Krivulja upadanja amplitude odbojnega signala in pripadajoča ojačitvena krivulja

5.2.5 Migracija

Migracija predstavlja pomemben korak v procesu obdelave podatkov. Z refleksijsko metodo izvajanja georadarskih meritev se namreč pridobi podatke, ki pa ne prikazujejo dejanskih položajev različnih struktur, na katerih pride do odbojev. Odboji se kažejo v obliki odbojnih oz. refleksijskih hiperbol. Po izvedbi migracije tako obdelani podatki dajejo bistveno bolj realne informacije o dejanskih lokacijah odbojev elektromagnetnega valovanja. Na podlagi odbojnih hiperbol se namreč z migracijo določijo dejanske lokacije odbojev, tako da se refleksijsko hiperbolo skrči v njen vrh, odstrani pa se tudi popačenje in s tem izboljša ločljivost (Sandmeier, 2012).



Slika 26: Tvorba odbojne oziroma refleksijske hiperbole (Kearey and Brooks, 1991)

Kot prikazuje zgornja slika (Slika 26:) odbojna oziroma refleksijska hiperbola nastane zaradi odbojev večih signalov, iz zaporednih točk zajemanja podatkov na profilu. Mesto odboja je skupno vsem, dvojni časi prihoda odboja pa se, zaradi različnih razdalj razlikujejo. Dvojni časi se zapisujejo na vertikalni osi profila in sicer na mestu v profilu, kjer je odboj zabeležen. Posledično je na radargramu odboj od točkovne anomalije viden kot hiperbola.

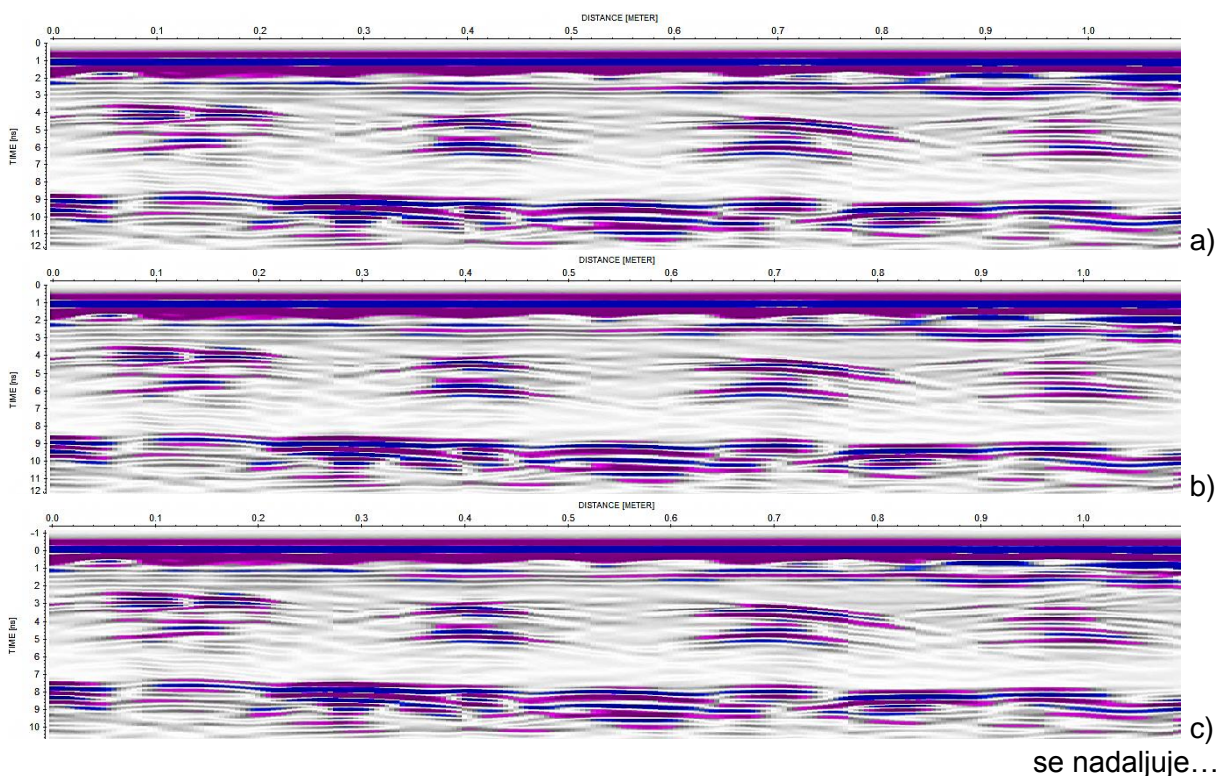
Namen izvedbe migracije je torej približati pridobljeni prikaz georadarskega profila dejanski strukturi prereza, ki ga profil prikazuje. Migracija se lahko izvede samo na podatkih georadarskih meritev z monostatično oz. oddajno - sprejemno anteno (Neal, 2004).

Pri 3D – fk migraciji (angl. 3D frequency – wavenumber (fk)) gre za migracijo tridimenzionalnega profila in temelji na predpostavki konstante hitrosti. Tridimenzionalni profil mora predstavljati t.i. zerooffset profil, kar pomeni da sta oddajna antena in sprejemna antena na ničelni oddaljenosti. 3D – fk migracija deluje v območju valovnega števila, tako da se na podlagi vnesene konstantne hitrosti izvaja spremenljiva transformacija frekvence v valovno število (Sandmeier, 2012).

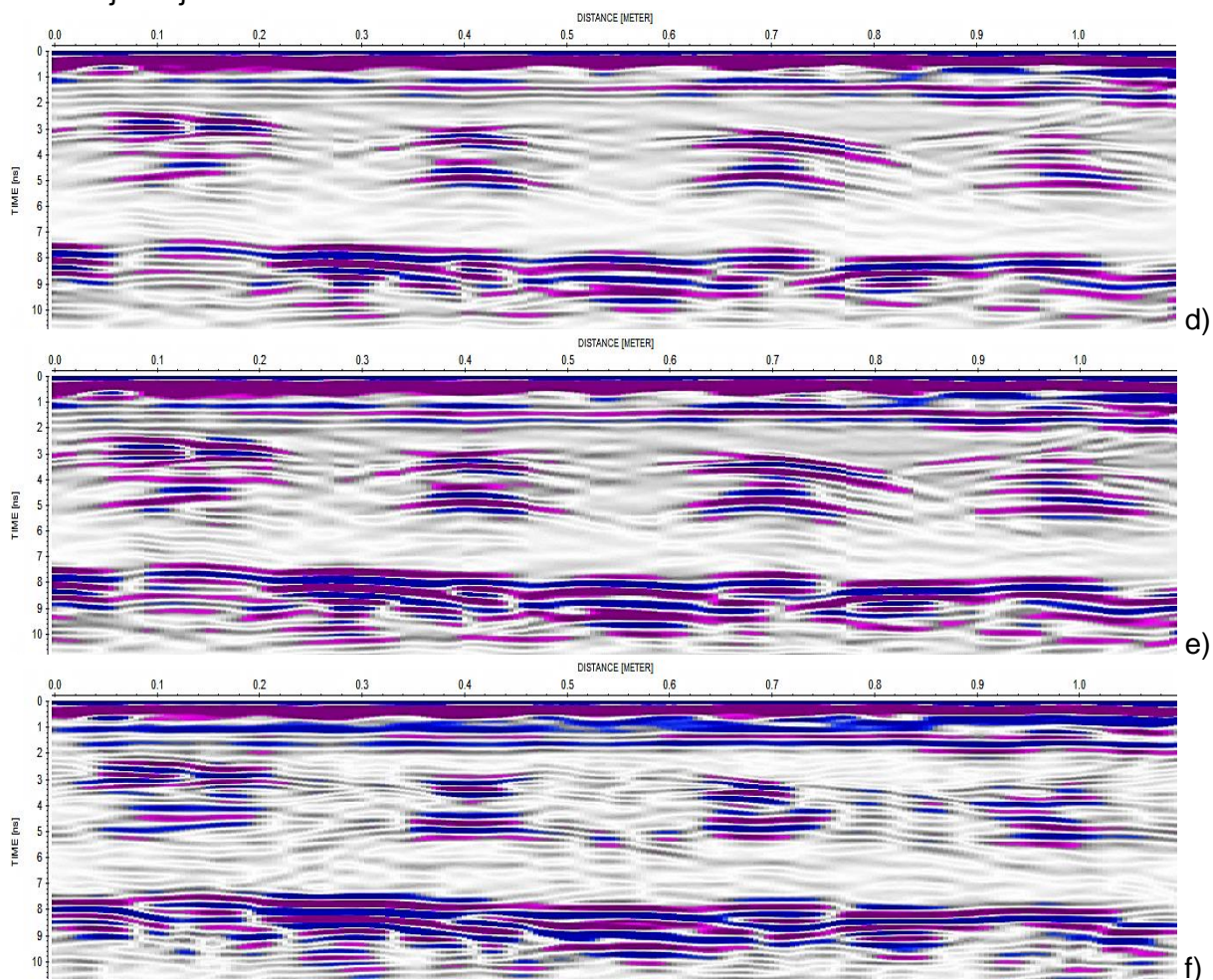
5.2.6 Prikaz radargramov georadarskih profilov za posamezne korake obdelave

Zaradi preglednosti bodo radargrami georadarskih profilov za posamezne korake obdelave prikazani na eni sliki, prikazuje jih spodnja slika (Slika 27:). S primerjavo zadnjega prikazanega radargrama (Slika 27:f)) s prvim (Slika 27:a)) je mogoče določiti rezultat celotnega procesa obdelave. Iz prikazanih radargramov je mogoče opazovati tudi napredek v obdelavi surovih podatkov, dosežen s posameznim korakom, vendar pa je detajlni prikaz napredka v procesu obdelave bolje določljiv iz prilog (Priloga C).

Rezultat procesa obdelave se po določenih korakih iz prikazanih radargramov zdi minimalen, vendar zato ta korak v procesu obdelave georadarskih profilov ni nič manj pomemben. Rezultat celotnega procesa obdelave se pokaže predvsem po združitvi obeh obdelanih serij georadarskih profilov v tridimenzionalni prikaz, ki je potreben za podrobnejšo interpretacijo rezultatov.



...nadaljevanje slike 27



Slika 27: Prikaz radargramov georadarskega profila po posameznem izvedenem koraku obdelave: a) začetni, b) po odstranitvi ojačitve, c) po korekciji maksimalne faze, d) po zamiku začetnega časa, e) po ojačitvi signala in f) po izvedbi migracije profila

5.2.7 Združitev obdelanih serij profilov v tridimenzionalni prikaz

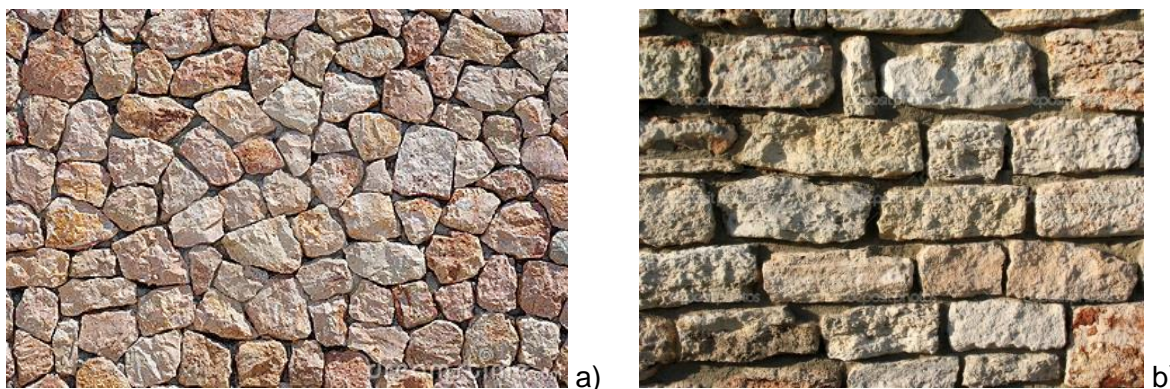
Medtem ko se obdelava serij profilov izvaja v modulu dvodimenzionalne analize podatkov, se interpretacija obdelanih serij profilov izvaja v modulu tridimenzionalne interpretacije podatkov. Zato je potrebno v tem modulu najprej iz obdelanih serij profilov ustvariti tridimenzionalni prikaz (Sandmeier, 2012).

V okviru diplomske naloge se je za vsako meritev posameznega zidu ustvaril tridimenzionalni prikaz 3d_all, kjer se je združilo obdelani seriji profilov 3d_x in 3d_y.

6 PREISKAVE OMETANIH VEČSLOJNIH KAMNITIH ZIDOV

Zidani kamniti objekti predstavljajo precejšen del še obstoječih starejših objektov, mnogi izmed njih predstavljajo pomembno kulturno dediščino. Precej kamnitih zidov je po prerezu sestavljenih iz več slojev. Za območje Slovenije so od romanike naprej značilni troslojni zidovi, pri katerih sta zunanja sloja sestavljena iz kamna, različne obdelave in zlaganja, notranja plast pa je zapolnjena z apneno malto, pomešana z ostanki kamenja, v vmesnem sloju se pogosto pojavijo tudi votline (Kržan in sod., 2012).

Kamniti zidovi se torej razlikujejo glede na obliko in način zlaganja kamna, v tem primeru govorimo o različni teksturi zidu. Primera različnih tekstur prikazuje spodnja slika (Slika 28):. Razlikujejo pa se kamniti zidovi tudi po sestavi prereza, v tem primeru govorimo o različni morfologiji zidu. Kamnite zidove pri katerih kamniti bloki potekajo po celotni širini prereza, v primeru troslojnega zidu povezujejo zunanja dva sloja, imenujemo povezani zidovi. Različne morfologije zidov so natančneje predstavljene na primerih preizkušanih zidov v poglavju 6.1.



Slika 28: Primera različnih tekstur kamnitega zidovja: a) zid grajen iz kamna nepravilnih oblik in b) zid grajen iz kamnitih zidakov (delno obdelan kamen)

V laboratoriju UL FGG so se v sklopu evropskega projekta PREPETUATE (PERformance - based aPproach to Earthquake proTection of cUlturAl heriTage in European and mediterranean countries, www.perpetuate.eu) izvedle obsežne preiskave za določanje potresnega obnašanja ometanih večslojnih kamnitih zidov. Izvedeni so bili 4 tlačni preizkusi zidov, 14 cikličnih strižnih preizkusov ter preiskave kamna, malt in stikov. Na ometih kamnitih zidov, ki jih pogosto najdemo v stavbah kulturne dediščine, se dostikrat nahajajo pomembne poslikave. Zato se je z uporabo različnih neporušnih metod pri preiskavah in razvoju ustreznih tehnik kombiniranja rezultatov poskušalo doprinesiti k zgodnejšemu ugotavljanju določenih stanj poškodovanosti zidu in samega ometa (Kržan in sod., 2012).

Strižna preiskava omogoča spremljanje zanesljivosti posameznih sočasno izvajanih neporušnih metod pri različnih stopnjah obremenjevanja oz. odstopanja in poškodovanosti ometa ob znanih pogojih in stanju preizkušanca. Preiskava je zato omogočila validacijo uporabljenih neporušnih metod pri zaznavanju konstrukcijskih napak, ki so pogoste pri obstoječih kamnitih zgradbah na potresnih območjih. Glavni namen sočasnih neporušnih preiskav je tako bil prenos ugotovitev iz rezultatov preiskav preizkušancev na preiskave

obstojećih kamnitih zgradb, kjer je pogosto potrebno določiti teksturo in morfologijo zidu ter stanje ometa.

Za vizualizacijo podometne teksture kamnitega zidu, zaznavanje in prepoznavanje značilne morfologije povezanega zidu ter za zaznavanje odstopanja ometa so bile na strižno obremenjenih zidovih izvedene naslednje neporušne preiskave:

- meritve z georadarjem (GPR),
- večslikovna metoda bližnje slikovne fotogrametrije in
- aktivna infrardeča termografija.

Zaradi razmeroma dolgotrajnega izvajanja neporušnih preiskav smo z neporušnimi preiskavami spremljali le 4 obojestransko vpete zidove, 2 nepovezana in 2 povezana zidova, od katerih sta bila dva preizkušena pri nižji in dva pri višji stopnji predkompresije. Nižja stopnja predkompresije (približno 7,5 % tlačne trdnosti zidu) je bila dosežena s tlačno silo 180 kN, višja stopnja predkompresije (približno 15 % tlačne trdnosti zidu) pa je bila dosežena s tlačno silo 380 kN. Tlačna trdnost kamnitega zidu je bila določena iz rezultatov tlačnih preiskav. V nadaljevanju bodo za preizkušene zidove uporabljene naslednje oznake:

- Zid_1: nepovezani zid, obojestransko vpetje, nižja stopnja predkompresije
- Zid_2: nepovezani zid, obojestransko vpetje, višja stopnja predkompresije
- Zid_3: povezani zid, obojestransko vpetje, nižja stopnja predkompresije
- Zid_4: povezani zid, obojestransko vpetje, višja stopnja predkompresije

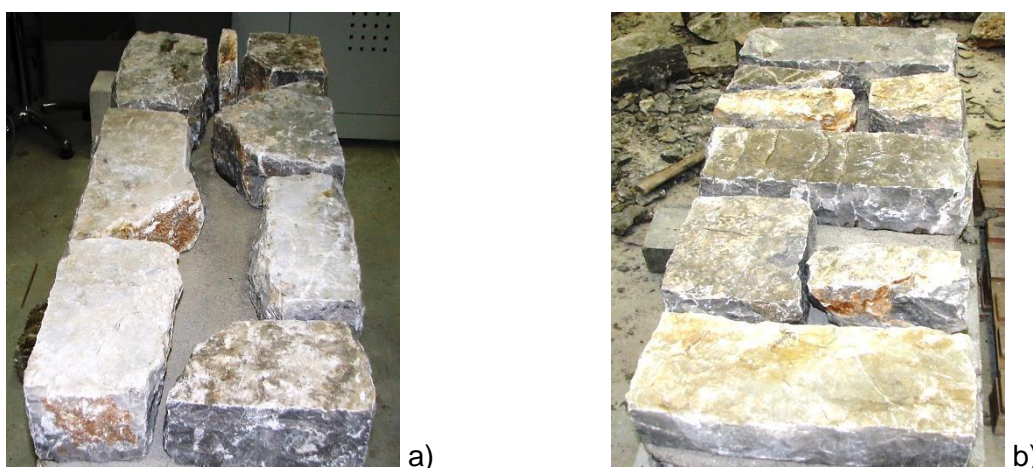
Analiza ugotavljanja teksture in morfologije zidu bo podana za zidove v neobremenjenem stanju (referenčno stanje). Možnost zaznavanja odstopanja ometa bo analizirana izključno v odvisnosti od širine odstopanja ometa in ne od vsiljene strižne sile. Ker so imeli preizkušeni zidovi različne robne pogoje in s tem različen odziv na velikost vsiljene sile, je bila širina odstopanja ometa izbrana za najbolj ustrezen primerjalni kriterij.

Glavni namen izvajanja neporušnih metod pri preiskavah je bila določitev ustreznosti metodologije, za potrebe prenosa metod na preiskave stavb kulturne dediščine. Na tem področju je uporaba neporušnih metod s konstrukcijskega in arhitektonskega vidika namreč ključnega pomena, saj omogoča pridobitev določenih informacij o notranji strukturi preizkušanca, brez posega vanj, torej brez poškodb.

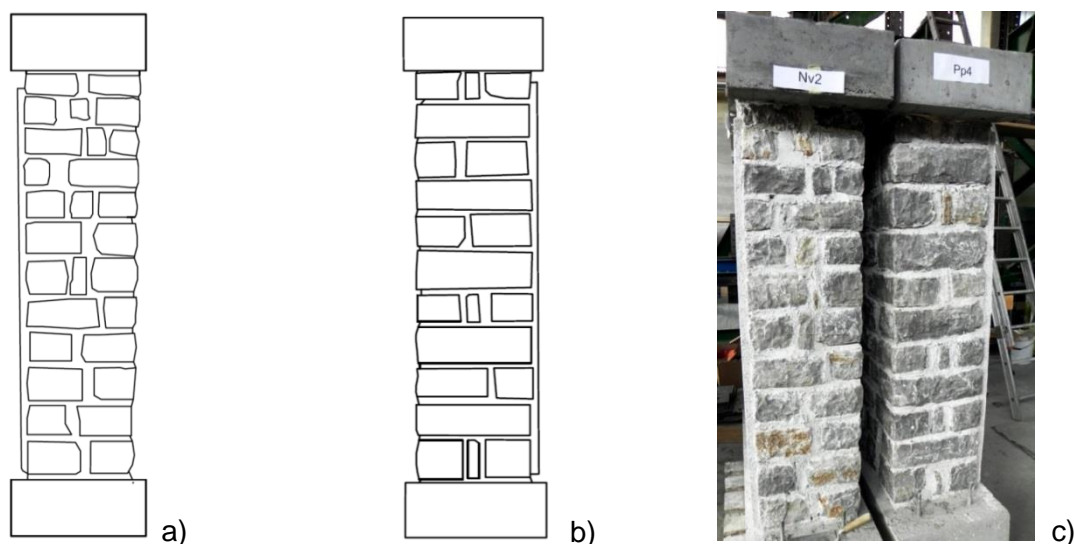
Meritve z georadarjem in termografske meritve so se na vsakem izmed štirih zidov izvedle dvakrat oziroma trikrat. Prvič v neobremenjenem stanju (referenčno stanje), drugič pri manjši obremenitvi (začetek odstopanja ometa) in tretjič pri večjem odstopanju ometa, za katerega je bilo ocenjeno, da bo v naslednji fazi obremenjevanja padel. Radarske in termografske meritve so se opravile v zadnjem, tj. 3. ciklu negativne smeri posamezne stopnje obremenjevanja. Aktivna termografija je bila izvedena s predhodnim segrevanjem ometa z IR grelci (30 min) ter merjenjem temperaturnega ohlajanja (45 min). Uporabljena je bila nehlajena termokamera proizvajalca FLIR. Pogostost zajemanja termografskih slik je bila 1 slika/s. Fotogrametrične meritve so se izvajale tekom celotne strižne preiskave, tako da so se za vsako stopnjo cikličnega obremenjevanja, v negativni in pozitivni fazi obremenitve, zajele fotografije preizkušanca.

6.1 Opis kamnitih zidov

Preizkušanci so bili zgrajeni v laboratoriju UL FGG. Za gradnjo je bila uporabljena apnena malta in delno obdelan kamen, apnenec. Ker je bil namen preiskav tudi preučiti vpliv različne morfologije zidov, je imela ena polovica preizkušancev (povezani zidovi) v vsaki drugi vrsti kamnite bloke, ki so po prerezu potekali čez vse tri sloje (vezniška zveza), ostale vrste pa teh kamnov niso imele (le smerniška zveza), kot to prikazujeta spodnji sliki (Slika 29: in Slika 30:) (Kržan in sod., 2012).



Slika 29: Prikaz morfolofije povezanega zidu med gradnjo v laboratoriju UL FGG: a) smerniška zveza in b) vezniška zveza



Slika 30: Stranski pogled dveh preizkušenih zidov, iz katerih je lepo razvidna različna morfolofija: a) nepovezanega zidu, b) povezanega zidu in c) fotografija obeh robov

Skupno je bilo izdelanih 18 preizkušancev, 16 zidov okvirnih dimenzij 150/100/40 cm³ ter dva zidova okvirnih dimenzij 100/100/40 cm³. Vsi preizkušanci so bili zgoraj in spodaj vpeti v armiranobetonske bloke, ki so služili vpenjanju v preizkuševalne naprave, raznosu obtežbe ter transportu po laboratoriju.



Slika 31: Kamniti zid, pripravljen za preiskovanje

6.2 Georadarska oprema in meritve

Za potrebe georadarskih meritev smo uporabili MALÅ radarski sistem Mednarodne podiplomske šole Jožefa Stefana. Uporabljeni georadarski merilni sistem sestavljajo:

- generator in sprejemnik elektromagnetnih impulzov (MALÅ ProEx) (Slika 32:),
- visoko frekvenčna, zaščitena, oddajno – sprejemna antena (MALÅ HF 1,6 GHz shielded) z merilnim koleščkom (MALÅ distance measuring Wheel HF) (Slika 33:) in
- krmilno – procesna enota (MALÅ ramac monitor XV11) (Slika 32:).



Slika 32: Generator in sprejemnik elektromagnetnih impulzov (MALÅ ProEx) ter krmilno – procesna enota (MALÅ ramac monitor XV11)



Slika 33: Visoko frekvenčna, zaščitena, oddajno – sprejemna antena (MALÅ HF 1,6 GHz shielded) (MALÅ Ground Penetrating Radar High Frequency Antennas, 2012)

Za bolj natančen način zajemanja podatkov z georadarjem se uporabljajo merilni kolesčki. Merilni kolesček omogoča enakomeren zajem podatkov vzdolž georadarskega profila. Podatki se zajemajo v vnaprej določenem dolžinskem intervalu, tako da je vsaki sledi v posameznem profilu, mogoče natančno določiti položaj v tem profilu. S tem se močno poenostavi obdelava teh podatkov georadarskih meritev in interpretacija zaznanih anomalij, saj jih je lažje locirati.

V kombinaciji z visoko frekvenčno oddajno – sprejemno anteno MALÅ 1,6 GHz je bil uporabljen merilni kolesček MALÅ distance measuring wheel HF, kakršnega prikazuje spodnja slika (Slika 34:). Namenjen je uporabi na visoko frekvenčnih antenah, saj omogoča še posebej natančno zajemanje podatkov z določeno gostoto.



Slika 34: Merilni kolešček (MALÅ Distance Measuring Wheel HF) (MALÅ GPR Encoders, 2012)

Meritve so se izvajale na kamnitih zidovih z ometom, na način kot to prikazuje spodnja slika (Slika 35:). Za zagotovitev enostavnejšega pomikanja antene po površini ometa zidu, se je pred meritvijo na omet pritrdil namizni PVC prt, na katerem je bila predhodno narisana mreža z oznakami georadarskih profilov. Meritev posameznih vertikalnih in horizontalnih profilov se je izvajala z rastrom 5 cm. Horizontalni profili so bili dolžine 80 cm, vertikalni profili pa dolžine 115 cm oz. 110 cm (odvisno od preizkušanca).



Slika 35: Izvajanje georadarskih meritev

Izbrana velikost merskega območja $80 \times 115 \text{ cm}^2$ oz. $80 \times 110 \text{ cm}^2$ je bila pogojena s tehničnimi omejitvami, da ni bilo mogoče meriti po celotni površini ometa. Robna območja zidov so ostala nepomerjena bodisi zaradi tega, ker merilni kolešček ni drsel po ometu bodisi antena ni v celoti nalegala na omet. Shematični prikaz horizontalnih in vertikalnih profilov na preizkušancu ter natančen opis uporabljenih nastavitev merilnega sistema sta podana v prilogah (Priloga A in Priloga B).

6.3 Rezultati meritev z georadarjem

V nadaljevanju bodo predstavljeni rezultati meritev z georadarjem.

Vsak zid je bil preizkušen dvakrat oziroma trikrat in sicer:

- v neobremenjenem stanju (referenčna meritev),
- meritev pri manjšem odstopanju ometa (1. meritev) in
- meritev pri odstopanju ometa, za katerega je bilo ocenjeno, da bo v naslednji fazi obremenjevanja odpadel z zidu (2. meritev).

Meritve z georadarjem med strižno preiskavo so se vedno opravile v 3. ciklu negativne smeri posamezne stopnje obremenjevanja, ki je definirana s pomikom bata. Pomiki horizontalnega bata, pri katerih so bile posamezne meritve izvedene, so podani v spodnji preglednici (Preglednica 6:).

Preglednica 6: Pomiki horizontalnega bata v času izvedbe posameznih meritev

Zid	Pomik horizontalnega bata [mm]		
	ref. meritev	1. meritev	2. meritev
Zid_1	0	-10	-17,5
Zid_2	0	-7,5	/
Zid_3	0	-10	/
Zid_4	0	-10	/

S preiskavami na kamnitih zidovih se je poskušalo preveriti ustreznost georadarske metode za:

- določitev debeline zidu,
- vizualizacijo teksture pod ometom,
- zaznavanje odstopanja ometa od zidu in
- zaznavanje in prepoznavanje značilne morfologije povezanega zidu.

Vsi, v nadaljevanju predstavljeni, grafični prikazi rezultatov georadarskih meritev predstavljajo končno obdelane podatke. Hitrost elektromagnetnega valovanja v zidu je bila ocenjena na 0,110 m/ns . Posledično je bila določena povprečna relativna dielektrična konstanta zidu ($\epsilon_r = 7,4$), 4ta pa ustreza relativni dielektrični konstanti suhega oziroma rahlo vlažnega apnenca, kot je razvidno iz preglednice (Preglednica 1:).

6.3.1 Določitev debeline zidu

V spodnji preglednici (Preglednica 7:) so podane celotne debeline zidov, ki so se preizkušali z georadarjem, kar pomeni debelina zidu z ometom in debeline samih ometov na posameznem preizkušenem zidu.

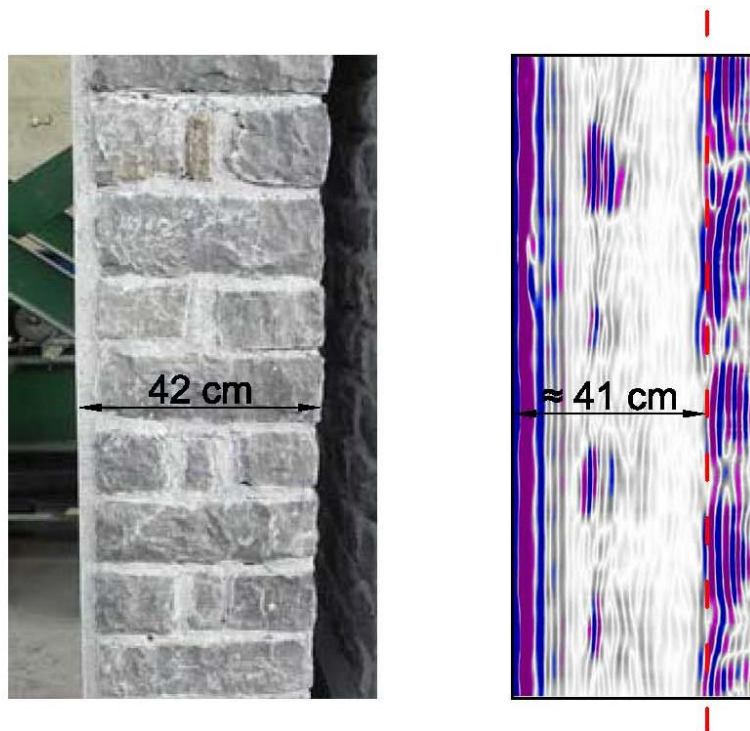
Preglednica 7: Debeline zidov in ometov

Preizkušavec	Debelina zidu [cm]	Debelina ometa [cm]
Zid_1	43	2 – 3
Zid_2	43	2,5 – 3
Zid_3	40	2 – 3
Zid_4	42	3 – 5

Kako je mogoče z radargrama georadarskega profila določiti oziroma bolje rečeno oceniti debelino zidu, je razvidno iz spodnje slike (Slika 36:). Prikazani radargram georadarskega profila predstavlja profil VERTIKALA 01 na preizkušancu Zid_4, in sicer iz meritve v referenčnem stanju zidu. V primeru določevanja debeline zidu je lepo razvidno, kako pomembno je za prikaz uporabiti radargram, na katerem je že bila izvedena migracija. S korakom, kjer se izvede migracija podatkov, se namreč zgladijo odbojne hiperbole, kar omogoči bistveno bolj natančno določitev linije odbojev od zadnje strani zidu in posledično bolj natančno določitev debeline. Korak migracije je natančneje opisan v poglavju 5.2.5. Rdeča črtkana črta na tej sliki označuje linijo na radargramu na določeni globini, vzdolž katere so lepo razvidni odboji elektromagnetnega valovanja. Odboji elektromagnetnega valovanja se pojavijo na precej konstantni globini in v precejšnji intenziteti. Ker je v našem primeru dejanska debelina zidu poznana, lahko z zagotovostjo trdimo, da zaznani odboji predstavljajo odboje elektromagnetnega valovanja pri prehodu iz zidu. S tem je bilo ugotovljeno, da je z radargrama georadarskega profila mogoče določiti debelino zidu.

Ker pa ni možno povsem natančno določiti poteka črtkane črte, katera simbolizira zadnjo stran zidu, in ker se manjšo napako naredi tudi pri odčitavanju dvojnega časa potovanja oz. globine na kateri smo določili zadnjo stran zidu, je bolj korektno zapisati, da gre za oceno debeline. Obe omenjeni napaki skupaj namreč povzročita, da je takšna ocena debeline zidu podana z natančnostjo približno 2 cm. V predstavljenem primeru preizkušanca Zid_4 se ocenjena debelina zidu razlikuje od dejanske, izmerjene debeline za 1 cm.

Omeniti velja, da je določitev debeline zidu tesno povezana z določitvijo hitrosti elektromagnetnega valovanja v snovi (in posledično dielektrične konstante). Hitrost elektromagnetnega valovanja namreč lahko določimo bodisi iz oblike hiperbol, ki nastopijo zaradi odbojev od notranjih vključkov, bodisi iz znane debeline preizkušanca, ki torej služi kot referenca. V našem primeru je bil uporabljen prvi način.



Slika 36: Določitev debeline preizkušanca Zid_4 na radargramu georadarskega profila


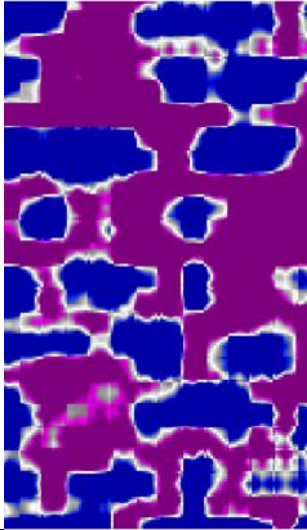
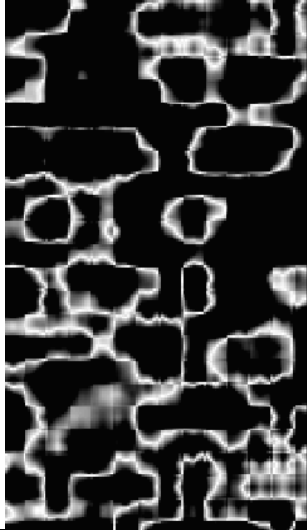

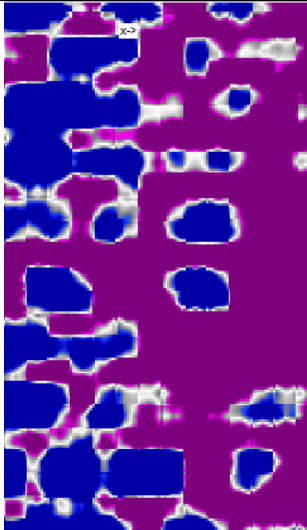
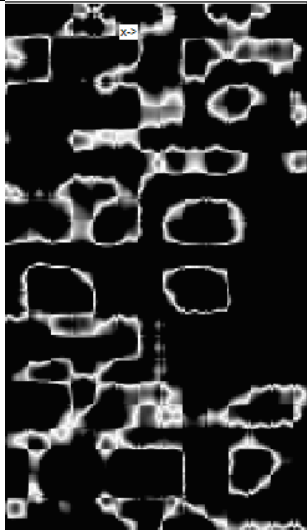
6.3.2 Vizualizacija podometne teksture kamnitega zidu

Spodnja slika (Slika 37:) poleg fotografij podometne teksture preizkušancev prikazuje grafične prikaze podometne teksture kamnitih zidov, kakršne pridobimo z obdelavo meritev z georadarjem.

Fotografije dejanske podometne teksture kamnitega zidu po padcu ometa, je bilo mogoče posneti zgolj za del preizkušanca v vidnem polju, ker je pogled na del leve strani preizkušanca zastiral element konstrukcije preizkuševalne naprave za izvajanje strižnih preiskav. Na osnovi teh fotografij, ki so služile za referenco, se je poskušalo določiti ustreznost georadarske metode za vizualizacijo teksture. Grafični prikazi rezultatov meritev z georadarjem bodo prikazani zgolj za del zidu, ki ga prikazujejo tudi fotografije.

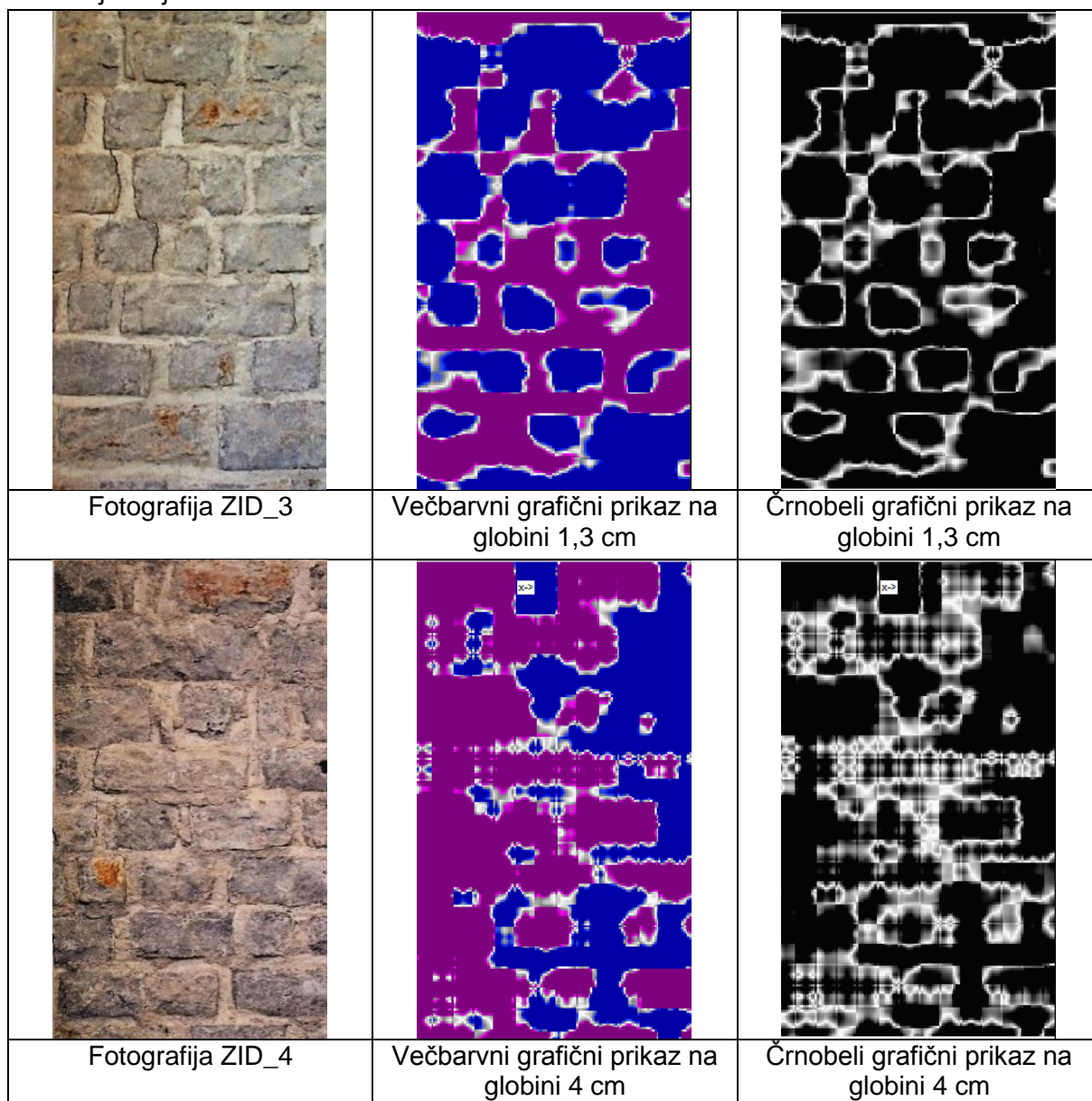
Na večbarvnih grafičnih prikazih preizkušancev Zid_1, Zid_2 in Zid_3 območja modre barve prikazujejo območja odbojev elektromagnetnega valovanja pri prehodu iz ometa v kamniti zid, hkrati pa prikazujejo obrise kamnitih zidakov, ali pa vsaj njihovo lego in v večini primerov tudi usmerjenost. Natančna velikost kamnitih zidakov iz prikazanih grafičnih prikazov ne more biti določena, saj so obrisi po robovih precej zabrisani oz. nepravilnih oblik. Vijolična barva prikazuje območja maltnih spojnic oz. območja, kjer se prikazani prerez zidu še nahaja v ometu, tako bi lahko predstavljala določena mesta z večjo debelino ometa zaradi neravne površine kamnitega zidu in tudi samih kamnitih zidakov, kar lokalno vpliva na debelino ometa. Bolj pravilno obliko kamnitih zidakov bi bilo mogoče določiti, če bi se grafične prikaze ekstrapoliralo na večji časovni prirastek sledi. V primeru preizkušanca Zid_4 obrise kamnitih

zidakov predstavljajo območja vijolične barve. Poleg večbarvnih prikazov so predstavljeni tudi črno-beli, saj je na določenih območjih iz le-teh lažje prepoznati teksturo zidu.

		
Fotografija ZID_1	Večbarvni grafični prikaz na globini 1,3 cm	Črnobeli grafični prikaz na globini 1,3 cm
		
Fotografija ZID_2	Večbarvni grafični prikaz na globini 1,2 cm	Črnobeli grafični prikaz na globini 1,2 cm

...se nadaljuje

...nadaljevanje slike 37

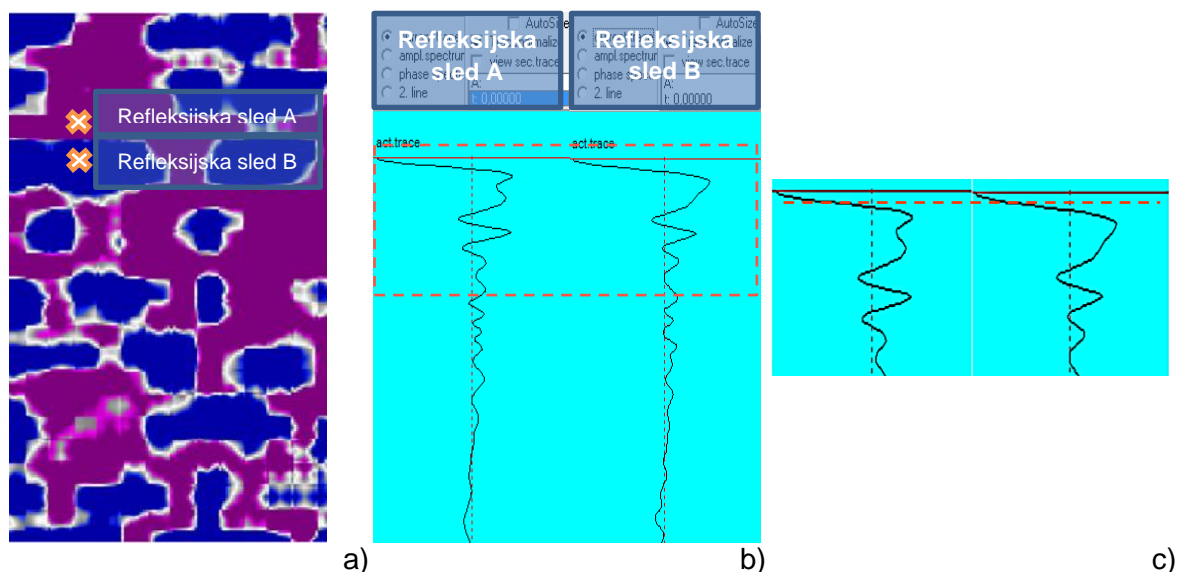


Slika 37: Prikaz podometne teksture vseh štirih preiskovanih kamnitih zidov

Iz grafičnih prikazov rezultatov meritev na preizkušancih Zid_1, Zid_2 in Zid_3, je podometna tekstura kamnitih zidov lepo razvidna, v primeru preizkušanca Zid_4 pa nekoliko slabše. Slabše razvidna tekstura v primeru preizkušanca Zid_4 je najverjetneje posledica velike razlike v debelini ometa. Levi del ometa je bil debelejši (tudi do 5 cm) kot desni del (približno 3 cm), kar pojasni, zakaj je podometna tekstura zidu, predvsem na levem delu zidu slabše razvidna.

Spodnja slika (Slika 38:) prikazuje kako je z natančnejšo analizo grafičnih prikazov refleksijskih sledi mogoče oceniti razmerje v velikosti relativnih dielektričnih konstant materialov skozi katera preide signal elektromagnetnega valovanja. Na meji med dvema materialoma namreč pride do odboja signala, za določitev amplitude in faze odbitega valovanja pa je potrebno poznati relativni dielektrični konstanti obeh materialov. Odbojni koeficient, ki določa amplitudo in fazo odbojnega signala se namreč določi po enačbi (3.2). V

kolikor pa je mogoče iz grafičnih prikazov refleksijskih sledi določiti predznak odbojnega koeficienta, lahko določimo ali signal elektromagnetnega valovanja na mestu odboja prehaja v material z večjo ali manjšo relativno dielektrično konstanto. Kadar je odbojni koeficient pozitiven namreč velja $\sqrt{\epsilon_{r2}} > \sqrt{\epsilon_{r1}}$ (ϵ_{r1} je relativna dielektrična konstanta materiala, od koder valovanje prihaja; ϵ_{r2} pa relativna dielektrična konstanta materiala, kamor valovanje prehaja) in faza valovanja se ne spremeni, sicer se spremeni, kar nam pove, da je valovanje na meji, kjer je prišlo do odboja, penetriralo v material z manjšo relativno dielektrično konstanto. Ta ugotovitev lahko očitno nakazuje za kakšen material gre.



Slika 38: a) Pozicije prikazanih refleksijskih sledi na grafičnem prikazu podometne teksture preizkušanca Zid_1 na globini 1,3 cm (0,23 ns), b) grafična prikaza refleksijskih sledi c) območje direktnega odboja signala na refleksijskih sledih

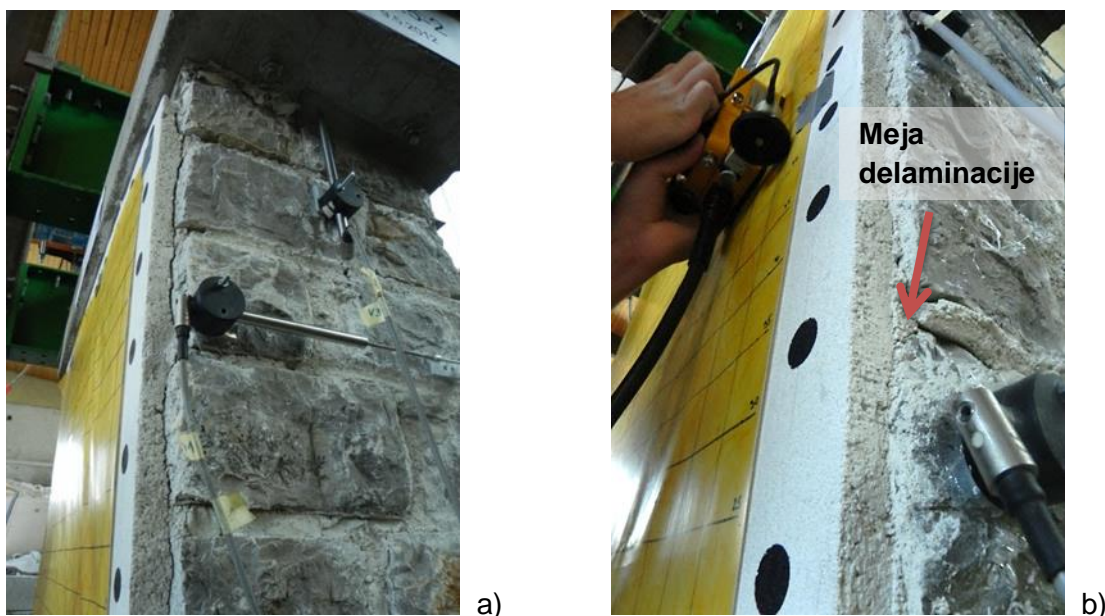
Z analizo grafičnih prikazov refleksijskih sledi na zgornjih slikah (Slika 38:b) in c)) je mogoče ugotoviti, da je normirana vrednost amplitude signala na refleksijski sledi B pri času 0,23 ns (čas kateremu ustreza prikazani grafični prikaz podometne teksture na zgornji sliki (Slika 38:a)) večja kot normirana vrednost amplitude signala na refleksijski sledi A pri istem času. Globino na refleksijski sledi, ki ustreza času 0,23 ns predstavlja rdeča črtkana črta na zgornji sliki (Slika 38:c)). Vrednost amplitude na refleksijski sledi A pri tem času namreč znaša približno 16% maksimalne amplitude na tej refleksijski sledi (v našem primeru gre za minimum pri začetnem času) minimalne amplitude. Vrednost amplitude pri istem času na refleksijski sledi B pa znaša približno 30% maksimalne amplitude na tej refleksijski sledi. Iz tega je mogoče ugotoviti, da je odbojni koeficient signala, odbitega na meji med ometom in kamnitim zidakom, pozitiven ter da se faza odbitega valovanja ohranja. V prikazanem primeru bi zmanjšana (toda še vedno negativna) vrednost amplitude signala na sledi B glede na amplitudo signala na sledi A kazala na spremembo faze. Zavedati se je namreč potrebno, da je v območju direktnega odboja signala odbiti signal od kamnitih zidakov »naložen« na direktni odboj signala od površine preizkušanca pri prehodu valovanja iz zraka v preizkušanelec. Iz ugotovitve, da se pri prehodu valovanja iz ometa v kamniti zidak faza ohranja, lahko sklepamo, da je relativna dielektrična konstanta ometa manjša od relativne

dielektrične konstante apnenca, iz katerega so bili izdelani kamniti zidaki. Ta ugotovitev je še toliko bolj pomembna, saj je v literaturi ni mogoče zaslediti.

6.3.3 Zaznavanje odstopanja ometa od zidu

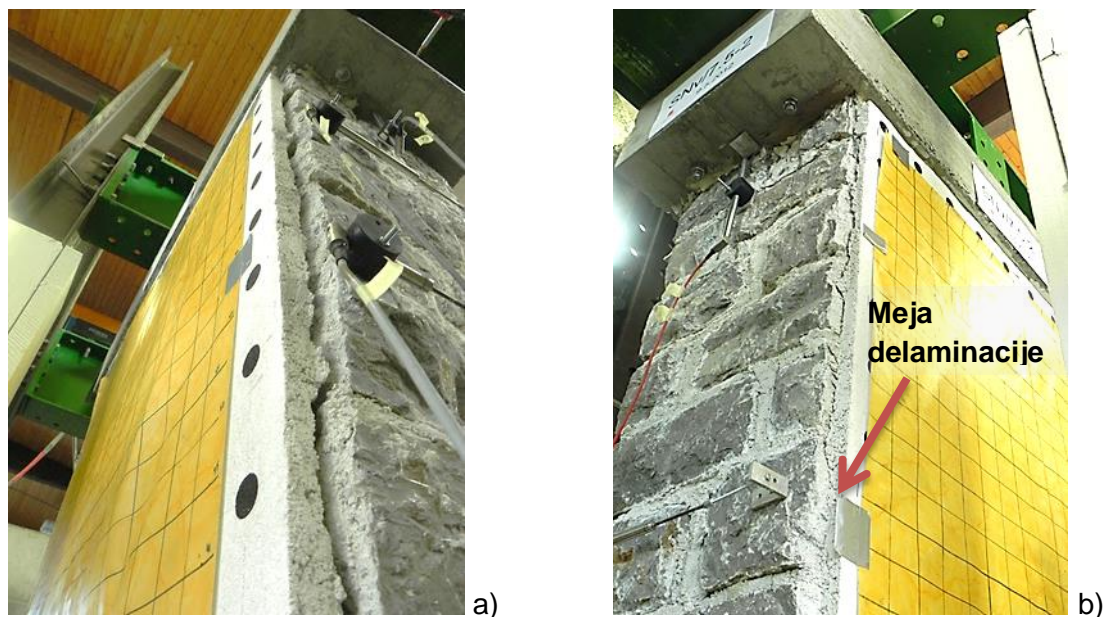
Dejansko odstopanje ometa v primeru preizkušanca Zid_1 prikazujeta spodnji sliki (Slika 39: in Slika 40:).

V času 1. meritve z georadarjem je bilo na zgornjem desnem robu ometa tega zidu opaziti odstopanje velikosti približno 2 mm. Meja delaminacije oziroma odstopanja ometa od zidu (tu se meja delaminacije nanaša na mejo, kjer je še bilo možno vizualno zaznati odstopanje) se pojavi na višini 30 cm, merjeno na območju meritve z georadarjem, kar omogoča kasnejšo primerjavo ugotovitev iz rezultatov georadarskih meritev z dejanskim odstopanjem ometa. Na levem robu ometa, v času 1. meritve ni bilo vidnega odstopanja ometa od kamnitega zidu.



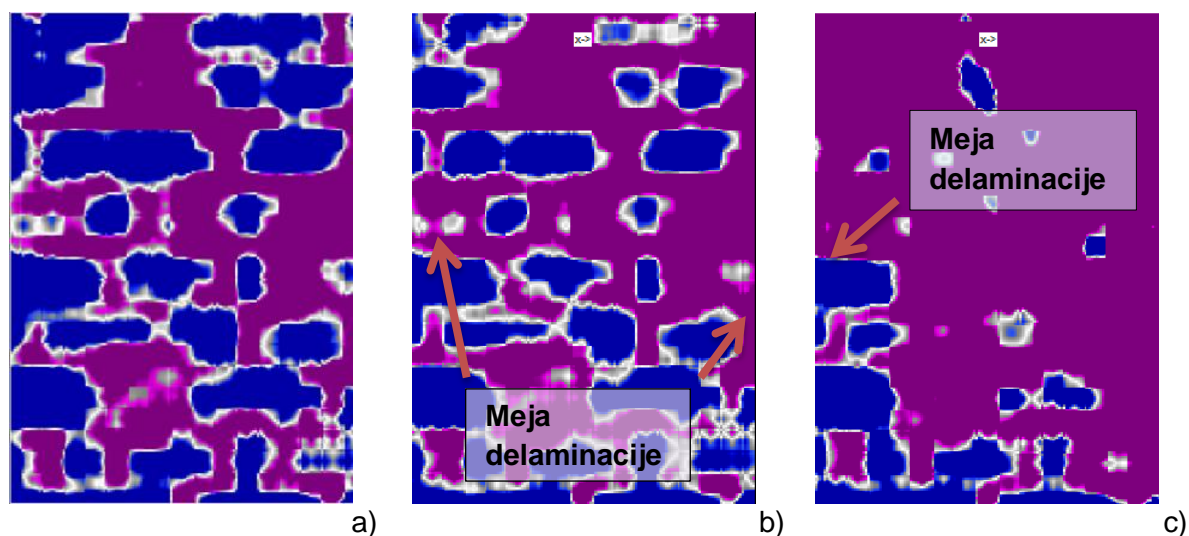
Slika 39: Širina odstopanja ometa v primeru preizkušanca Zid_1: a) desno zgoraj in b) desno spodaj (oboje pri pomiku bata -10 mm (1. meritve))

V času 2. meritve z georadarjem odstopanje ometa na desnem zgornjem robu meri že več kot 10 mm, poteka po celotni višini merjenega območja, vendar je v spodnjem delu odstopanje ometa nekoliko manjše. Odstopanje na levem robu je precej manjše kot na desnem, meja odstopanja ometa se pojavi na višini 50 cm.



Slika 40: Širina odstopanja ometa v primeru preizkušanca Zid_1: a) desni rob in b) levi rob (oboje pri pomiku bata -17,5 mm (2. meritev))

Na spodnji sliki (Slika 41:) so predstavljeni grafični prikazi prereza preizkušanca na enaki globini. Prikazujejo stanja preizkušanca na vseh treh stopnjah obremenitve, na katerih so bile meritve izvedene. Iz prikazanega je dobro razvidno, da postaja z večanjem obremenitve vijolično obarvano območje vse večje. To območje predstavlja območje, kjer na prikazani globini ni zaznanih odbojev elektromagnetnega valovanja. Kot je razvidno iz grafičnega prikaza referenčne meritve, so bili v tem območju, na tej globini zaznani odboji od površine kamnov. Zato lahko z veliko verjetnostjo sklepamo, da je v vmesnem času na tem območju omet odstopil. Posledično v prerezu na tej globini ni več mogoče zaznati odbojev na površini kamnov, saj se kamni na tem območju, potem ko omet odstopi pojavijo na večji globini.



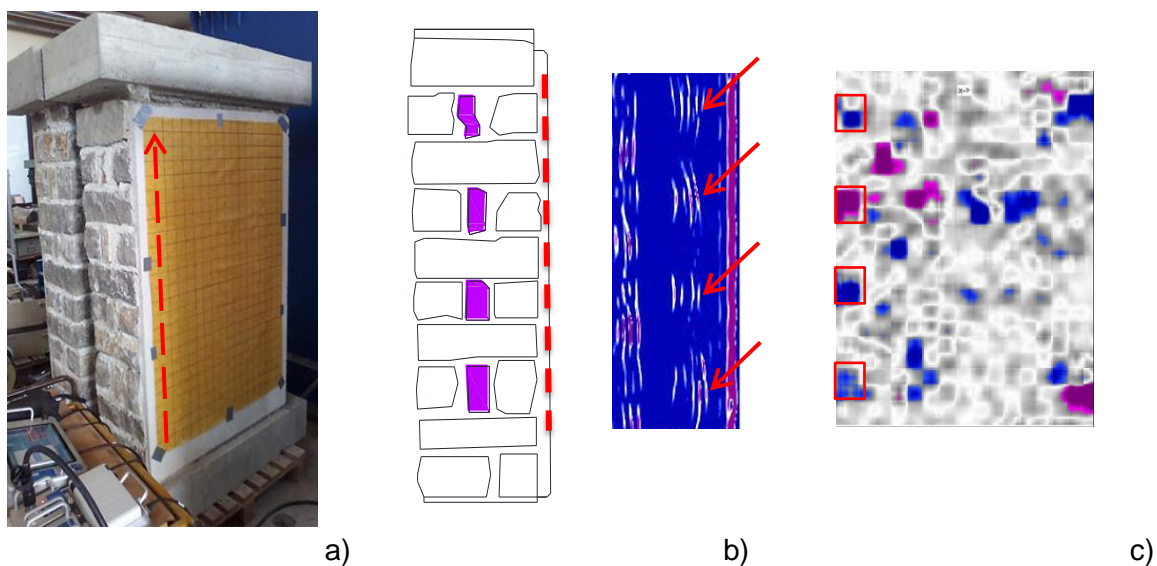
Slika 41: Grafični prikazi prereza preizkušanca Zid_1, na enaki globini (1,3 cm) pri različni stopnji obremenitve: a) referenčna meritev, b) 1. meritev in c) 2. meritev

Na grafičnem prikazu prereza preizkušanca ob 1. meritvi (Slika 41:b)) je mogoče zaznati mejo odstopanja ometa na desnem robu na višini 45 cm, kar je približno 15 cm višje, kot je to razvidno iz fotografij (Slika 39:). Območja najmanjših odstopanj torej na grafičnem prikazu rezultatov georadarskih meritev ni mogoče natančno določiti. Posledično ni mogoče natančno določiti meje odstopanja ometa, vendar pa se geometrija območja, na katerem je mogoče zaznati odstopanje ometa, zelo dobro ujema z geometrijo območja dejanskega odstopanja ometa. Za kvantitativno oceno najmanjše velikosti odstopanja ometa, pri kateri je odstopanje mogoče določiti iz rezultatov georadarske metode, glej ugotovitve v poglavju 6.4.2.

Na grafičnem prikazu prereza preizkušanca ob 2. meritvi (Slika 41:c)) je jasno vidno odstopanje ometa na desnem robu po celotni višini merjenega območja, kar ustreza dejanskemu odstopanju ometa, kot je to razvidno iz fotografij (Slika 40:). Na levi strani zidu je bilo dejansko odstopanje precej manjše kot na desni strani. Na grafičnem prikazu je mogoče zaznati odstopanje na višini 60 cm, kar je približno 10 cm višje od dejanske meje odstopanja ometa. Odstopanje ometa v primeru 2. meritve je bilo precej večje kot v primeru 1. meritve, zato je povsem pričakovano, da je mogoče v tem primeru na grafičnem prikazu rezultatov georadarskih meritev natančneje določiti območje in mejo odstopanja.

6.3.4 Zaznavanje in prepoznavanje značilne morfologije povezanega zidu

Eden izmed ciljev diplomske naloge je bil preveriti, ali je možno zaznati in nato iz rezultatov meritev z georadarjem prepoznati značilno morfologijo povezanega zidu. Pričakovano je bilo, da bomo pri meritvah zaznali linije s smerniško zvezo kamnitih zidakov. Na spodnji sliki (Slika 42:), ki prikazuje značilno morfologijo povezanega kamnitega zidu za levi rob preizkušanca Zid_3, so to linije, v katerih so srednji kamniti zidaki obarvani vijolično. V območju vijolično obarvanih kamnitih zidakov naj bi prišlo zaradi različnih dielektričnih konstant kamna in malte do odboja elektromagnetnih signalov. V območju z vezniško zvezo, kjer imamo kamniti zidak po celotni širini zidu, signal ves čas potuje po enakem materialu zato večjih odbojev elektromagnetnih signalov, v tem območju ni pričakovati.



Slika 42: Preizkušanec Zid_3: a) fotografija, iz katere je razvidna dejanska morfologija zidu in pozicija radargrama, b) skica značilne morfologije povezanega zidu (levo) ter radargram georadarskega profila VERTIKALA 01 (desno) in c) grafični prikaz prereza zidu na globini 19 cm

Zgornja slika (Slika 42:b)) poleg skice morfologije levega robu preizkušanca Zid_3 prikazuje radargram georadarskega profila VERTIKALA 01. Gre za skrajni levi vertikalni profil, kot označuje rdeča črtkana puščica na sliki (Slika 42:a)). Odboji elektromagnetnih signalov so na radargramu georadarskega profila lepo razvidni in označeni z rdečimi puščicami. Po višini se popolnoma ujemajo z pozicijami vijolično obarvanih kamnov na skici morfologije zidu, kar je še bolj razvidno iz grafičnega prikaza prereza zidu na globini 19 cm, ki je prikazan na sliki (Slika 42:c)). Mesta diskontinuitet na levem robu zidu so označena z rdečimi kvadrati. Slednja slika tudi kaže, da mesto maksimalnega odboja ne nastopi na isti globini pri vseh linijah. Iz analize mesta maksimalnih odbojev smo ocenili, da se območja diskontinuitet pojavijo na globinah med 16 cm in 20 cm, kar je le malo več od dejansko izmerjenih globin. To je sicer tudi pričakovano, saj se na večji globini globinska ločljivost radarja zmanjša, kar pomeni, da bomo odboj signala zaznali kot zakasnjene.

Zaradi tehničnih in pa geometrijskih omejitev pri izvajanju meritev je bilo mrežo na zidu nemogoče postaviti tako, da bi bilo mogoče izmeriti še skrajni desni rob zidu. V prikazanem primeru je bil zato zadnji zajeti vertikalni profil od desnega roba zidu odmaknjen več kot 10 cm, v tem območju pa ni več mogoče zaznati značilne morfologije povezanega zidu za desni rob preizkušanca.

V primeru drugega povezanega zidu (preizkušanec Zid_4) dobimo primerljive rezultate meritev z radarjem, kar zadeva zaznavanja značilne morfologije povezanega zidu. S približno enako natančnostjo kot za Zid_3 je mogoče določiti odboje, ki nakazujejo na značilno morfologijo povezanega zidu, zato rezultatov za preizkušanec Zid_4 v tem delu diplomske naloge ne bomo prikazovali.

6.4 Primerjava rezultatov georadarskih meritev z rezultati infrardeče termografije in bližnje slikovne fotogrametrije

V nasprotju s porušnimi, delno porušnimi in tudi nekaterimi neporušnimi metodami preiskav (npr. bližnje slikovna fotogrametrija (v nadaljevanju fotogrametrija)), georadarska metoda in aktivna infrardeča termografija (v nadaljevanju termografija) ne moreta podati mehanskih lastnosti preizkušanca. Vendar pa lahko obe metodi omogočata vizualizacijo notranje strukture preizkušanca. Zato lahko rečemo, da je posredno mogoča kvalitativna ocena mehanskih lastnosti preizkušanca.

V okviru doktorskega dela P. Cotič je bila za preizkušene zidove narejena obsežnejša analiza primerjave rezultatov georadarske metode, termografije in fotogrametrije. V diplomskem delu povzemam glavne ugotovitve še ne objavljenih rezultatov primerjave:

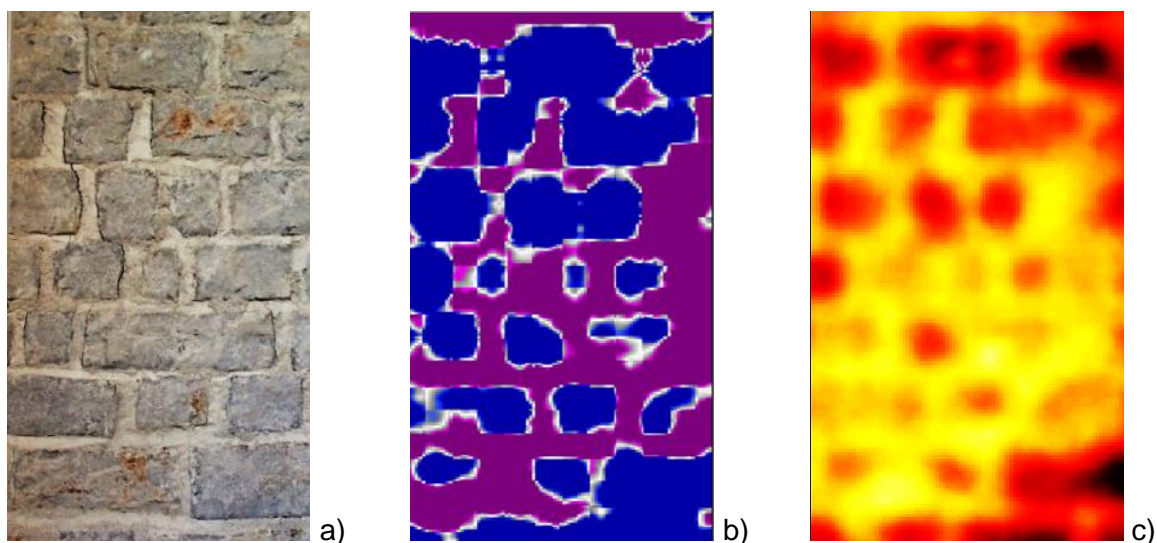
- georadarske metode in termografije (vizualizacija podometne teksture kamnitega zidu) in
- georadarske metode, termografije in fotogrametrije (zaznavanje odstopanja ometa od zidu).

Ker je element konstrukcije preizkuševalne naprave za izvajanje strižnih preiskav zastiral pogled na del leve strani preizkušanca, je bilo mogoče meritve termografije in fotogrametrije izvesti zgolj na delu zidu, ki je bil med preiskavo v vidnem polju. Za lažjo primerjavo rezultatov, bodo zato grafični prikazi rezultatov vseh treh neporušnih metod prikazani zgolj za območje zidu, ki je bilo v vidnem polju in je posledično bilo pomerjeno z vsemi izvedenimi neporušnimi metodami.

6.4.1 Vizualizacija podometne teksture kamnitega zidu

Podometno teksturo ometanega zidu je mogoče vizualizirati z grafičnimi prikazi rezultatov georadarskih meritev in faznimi IR slikami, pridobljenimi s termografijo. Fazne IR slike predstavljajo le enega izmed možnih načinov prikaza termografskih slik. Krajša razlaga osnov termografije in metod analize termografskih podatkov je podana v (Murn, 2013).

Spodnja slika (Slika 43:) prikazuje podometno teksturo preizkušanca Zid_3. Za lažjo primerjavo je prikazana fotografija dejanske podometne teksture (Slika 43:a)), ki je bila posneta, ko je omet odpadel z zidu. Sliki (Slika 43:b) in c)) prikazujeta georadarski grafični prikaz prereza preizkušanca na globini 1,3 cm in fazno IR sliko, ki je rezultat termografije. Meritve z obema neporušnima metodama so bile izvedene v referenčnem stanju zidu.



Slika 43: Podometna tekstura kamnitega zidu (preizkušanec Zid_3, meritve izvedene v referenčnem stanju zidu): a) fotografija podometne teksture, b) georadarski grafični prikaz teksture in c) termografski (fazni) grafični prikaz teksture (Bosiljkov in Kržan, 2012)

Kot že opisano v poglavju 6.3.2, območja modre barve na zgornji sliki (Slika 43::b)) prikazujejo območja odbojev elektromagnetnega valovanja pri prehodu iz ometa v kamniti zid. Na podlagi teh je mogoče določiti lego, na določenih mestih pa tudi orientacijo in približno velikost kamnitih zidakov. Podobna vizualizacija je razvidna tudi iz zgornje slike (Slika 43:c)), kjer rdeča oziroma temnejša barva ustreza nižji fazni razliki, rumena oziroma svetlejša barva pa višji fazni razliki, kar omogoči dobro razločevanje med površinami kamnitih blokov in površinami maltnih spojin (večje fazne razlike so v tem primeru tudi neposredno posledica večjih temperaturnih razlik).

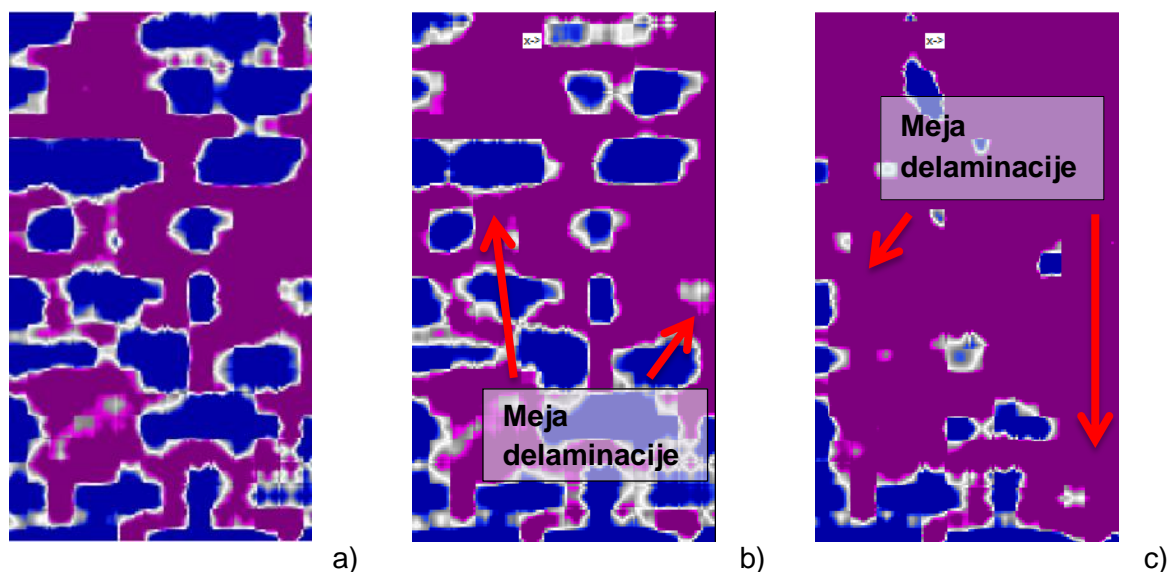
S primerjavo prikazanih slik je mogoče ugotoviti, da je tako z georadarsko metodo, kot tudi s termografijo mogoče zelo dobro določiti podometno teksturo kamnitega zidu. Razlike v kvaliteti grafičnih prikazov praktično ni mogoče zaznati. Obe metodi se torej izkažeta za zelo zanesljiv način vizualizacije podometne teksture kamnitega zidu. Kljub temu je potrebno omeniti, da ta ugotovitev neposredno velja le za preučevano globino. Ker je zaznavanje z obema metodama močno odvisno od globine, bi bilo na različnih globinah pričakovati drugačno zanesljivost obeh metod.

6.4.2 Zaznavanje odstopanja ometa od zidu

Na primeru zaznavanja odstopanja ometa od zidu je mogoča primerjava rezultatov georadarskih meritev z rezultati termografije in fotogrametrije.

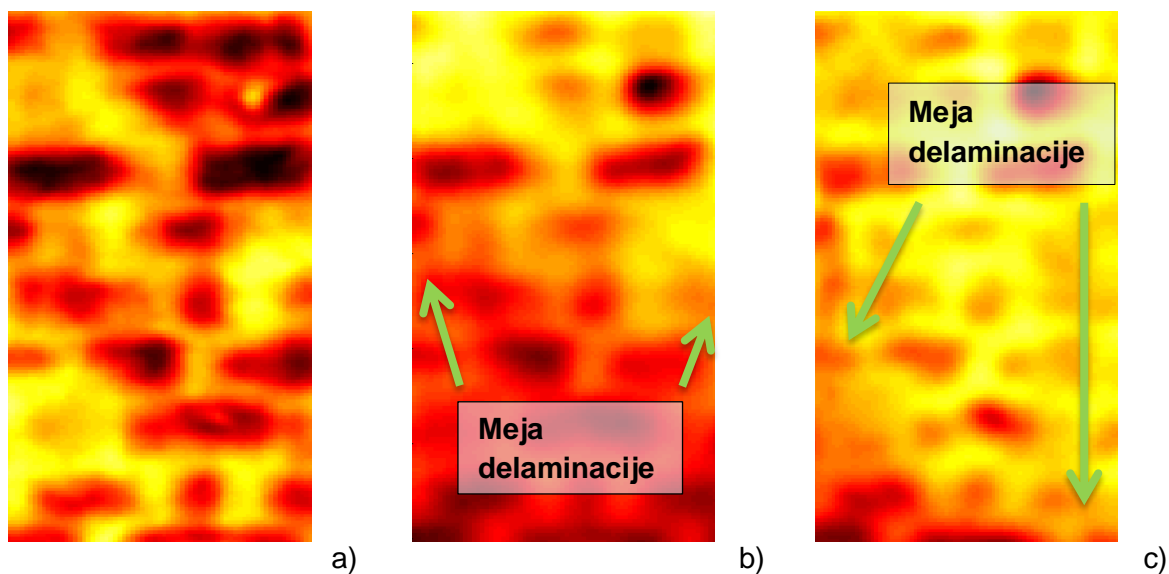
Prikazani bodo torej rezultati meritev vseh treh neporušnih metod, ki so bile uporabljene. Za posamezno metodo bodo predstavljena stanja preizkušanca na vseh treh stopnjah obremenitve, pri katerih so se meritve izvajale. Obremenitev zidu se je z vsako stopnjo povečala, tako je bilo tudi odstopanje ometa z vsako stopnjo večje, kar je lepo razvidno iz slik (Slika 39: in Slika 40:).

Spodaj (Slika 44:) so predstavljeni georadarski grafični prikazi prereza preizkušanca Zid_1, ki so bili podrobneje predstavljeni in interpretirani že v poglavju 6.3.3.



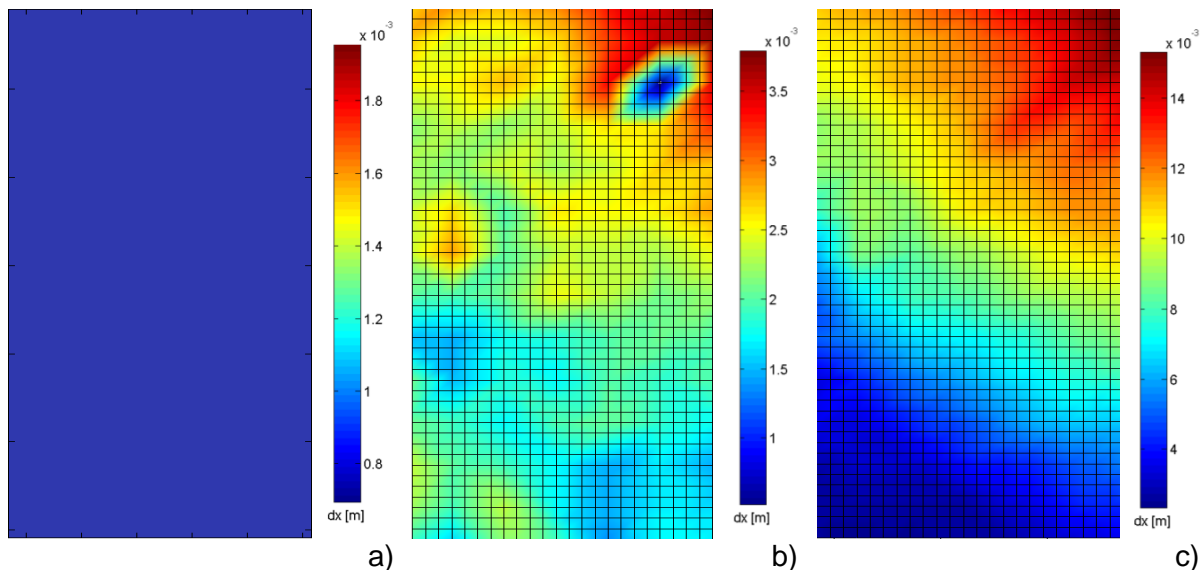
Slika 44: Georadarski grafični prikazi prereza preizkušanca Zid_1, na enaki globini (1,3 cm) pri različni stopnji obremenitve: a) referenčna meritev, b) 1. meritev in c) 2. meritev

Na spodnji sliki (Slika 45:) so predstavljene IR fazne slike prereza preizkušanca Zid_1. IR fazne slike so pridobljene iz rezultatov termografije.



Slika 45: IR fazne slike prereza preizkušanca Zid_1 pri različnih stopnjah obremenitve: a) referenčna meritev, b) 1. meritev in c) 2. Meritev (Bosiljkov in Kržan, 2012)

Na spodnji sliki (Slika 46:) so predstavljene fotogrametrične slike površine ometa preizkušanca Zid_1. Fotogrametrične slike so pridobljene iz rezultatov fotogrametrije.



Slika 46: Fotogrametrične slike površine ometa preizkušanca Zid_1, pri različnih stopnjah obremenitve: a) referenčna meritev, b) 1. meritev in c) 2. Meritev

Fotogrametrične slike površine ometa preizkušanca na določeni stopnji obremenjevanja grafično predstavljajo velikosti diferenčnega pomika zidu v smeri x (dimenzija, pravokotno na površino ometa) glede na začetni referenčni posnetek. Z metodo bližnje slikovne fotogrametrije se spremljajo površinski pomiki ometa, ki se lahko pojavijo bodisi zaradi

odstopanja ometa bodisi zaradi razpiranja zidu. Pri obeh pomikih bata, pri katerih sta prikazani fotogrametrični sliki površine ometa, izven ravninskega razpiranja zidu ni bilo opaziti. Prav tako tudi prečni defometri oz. LVDT-ji zaznajo največje razpiranje zidu velikosti le 0,1 mm na desni strani preizkušanca (pri pomiku bata -17,5 mm). Diferenčni pomik je torej v večinski meri res posledica samega odstopanja ometa.

S primerjavo rezultatov vseh treh neporušnih metod je mogoče določiti ustreznost posamezne metode za zaznavanje odstopanja ometa. Za najbolj natančno metodo, izmed uporabljenih neporušnih metod, se izkaže metoda bližnje slikovne fotogrametrije, ki v nasprotju z georadarsko in termografsko metodo kvantitativno oceni velikost odstopanja. Metoda sicer omogoča zaznavanje že najmanjšega odstopanja ometa, velikostnega reda manjšega od 1 mm, vendar pa bi bila v praksi lahko uporabna samo za spremljanje napredovanja odstopanja ometa v nekem časovnem obdobju (monitoring), ne pa tudi za kontrolo stanja ometa. Kljub temu so nam rezultati bližnje slikovne fotogrametrije v sklopu te diplomske naloge, zaradi visoke natančnosti, zelo dobro služili za vrednotenje rezultatov georadarske in termografske metode, tj. za njihovo validacijo.

Po analizi in primerjavi rezultatov fotogrametrije z rezultati georadarske metode se izkaže, da georadarska metoda sicer omogoča zaznavanje odstopanja ometa, vendar le odstopanja velikosti 8 mm in več. Posledično površina dejansko odstoplega ometa z georadarsko metodo ni natančno določljiva, geometrija odstoplega dela ometa pa vendar je določljiva. Kvantitativna ocena velikosti odstopanja ometa, kakršnega je še mogoče zaznati z georadarjem, je bila pridobljena na podlagi analize rezultatov meritev na vseh štirih preizkušanih zidovih.

7 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo analizirali ustreznost uporabe georadarske metode pri občutljivostni analizi strižno obremenjenih laboratorijskih ometanih večslojnih kamnitih zidov, z namenom prenosa metode na in-situ preiskave objektov kulturne dediščine. Osredotočili smo se na vizualizacijo podometne teksture kamnitega zidu, zaznavanje odstopanja ometa ter zaznavanje in prepoznavanje značilne morfologije povezanega zidu. Za zanesljivejše vrednotenje rezultatov georadarske metode povzamemo tudi rezultate dobljene s preostalima izvajanima neporušnima metodama, aktivno infrardečo termografijo in bližnje slikovno fotogrametrijo.

Ocenjena je bila tudi ustreznost metode za pridobivanje različnih podatkov o preizkušancu, kot je npr. debelina zidu. Za pravilno interpretacijo rezultatov georadarskih meritev je potrebno v koraku migracije določiti hitrost elektromagnetnega valovanja v materialu. V procesu migracije se namreč z določitvijo pravilne hitrosti valovanja, odbojne hiperbole skrčijo v vrhove hiperbol. Ti vrhovi hiperbol pa predstavljajo dejanska mesta odbojev elektromagnetnega valovanja. Na podlagi odbojev elektromagnetnega valovanja, zaznanih na konstantni globini, ki predstavljajo odboje na prehodu valovanja iz zidu, je bilo mogoče določiti debelino zidu. V našem primeru je bila debelina zidov sicer poznana, zato je bilo mogoče hitrost elektromagnetnega valovanja v zidu določiti tudi na podlagi potovalnega časa odbojev, do katerih pride na prehodu valovanja iz zidu. Hitrost elektromagnetnega valovanja v preizkušanih zidovih je znašala 0,110 m/ns. Na podlagi poznane hitrosti valovanja v materialu je mogoče oceniti povprečno vrednost relativne dielektrične konstante materiala (v našem primeru $\epsilon_r = 7,4$), kar ustreza relativni dielektrični konstanti suhega oz. rahlo vlažnega apnenca.

Ugotovljeno je bilo tudi, na kakšen način je z radargrama in grafičnega prikaza prereza zidu mogoče zaznati značilno morfologijo povezanega zidu. Med linijami kamnitih zidakov z vezniško zvezo, so bili namreč v linijah s smerniško zvezo zaznani odboji od srednjega sloja kamnitih zidakov. V linijah z vezniško zvezo pa teh odbojev ni, saj valovanje na teh mestih potuje skozi kamen, ki poteka po celotni debelini zidu (vezniška zveza), zato po celotni debelini ne pride do nobenega odboja valovanja. Tako pozicija, kot tudi globina mest, kjer so bili odboji zaznani se zelo dobro ujema z dejansko pozicijo z odboji lociranih kamnitih zidakov, kar je lepo razvidno tako z radargrama georadarskega profila kot tudi z grafičnega prikaza prereza zidu.

S podrobnejšo analizo rezultatov georadarske metode se je preverjala ustreznost metode za vizualizacijo podometne teksture zidu. S primerjavo teh rezultatov z rezultati termografije je bilo ugotovljeno, da je tako z georadarsko metodo kot tudi termografijo mogoče zelo dobro in zanesljivo določiti podometno teksturo kamnitega zidu. Obe metodi se torej izkažeta za zanesljiv način vizualizacije podometne teksture kamnitega zidu. Predvsem se lahko poda ugotovitev, da je podometno teksturo zidu z georadarsko metodo mogoče najbolj zanesljivo določiti v primeru konstantne debeline ometa. Medtem ko je bilo mogoče meritve do večjih globin zidu (zaznavanje značilne morfologije povezanega zidu) izvajati le z georadarsko metodo, pa je potrebno omeniti, da je bilo s termografijo mogoče zaznati površinske in podometne razpoke, kar pa z georadarsko metodo ni bilo mogoče.

S primerjavo ugotovitev analize rezultatov vseh treh neporušnih metod je bilo mogoče oceniti ustreznost posamezne metode za zaznavanje odstopanja ometa. Za najbolj natančno izmed uporabljenih neporušnih metod se izkaže metoda bližnje slikovne fotogrametrije. Metoda namreč omogoča zaznavanje odstopanja ometa reda velikosti 1 mm. Zaradi visoke natančnosti so rezultati fotogrametrije v našem primeru služili za vrednotenje kvalitativnih rezultatov georadarske in termografske metode. Ugotovljeno je namreč bilo, da je z georadarsko metodo sicer mogoče zaznati odstopanje ometa, vendar pa velikosti odstopanja ni mogoče določiti, prav tako ni mogoče zaznati območij najmanjšega odstopanja in posledično natančne meje odstopanja ometa. Mogoče pa je določiti geometrijo odstoplega dela ometa glede na del ometa, ki še ni odstopil. Geometrija območja, na katerem je mogoče zaznati odstopanje ometa, se zelo dobro ujema z geometrijo območja dejanskega odstopanja ometa. Za interpretacijo rezultatov meritev so bili najbolj uporabni grafični prikazi, pri katerih se lepo izkorišča dejstvo, da je georadarska metoda kontrastna metoda. Možnost zaznavanja namreč zagotavlja dovolj velik kontrast elektromagnetnih lastnosti različnih materialov preizkušanca, ki povzroči odboj elektromagnetnega valovanja, vsi takšni odboji pa so ponazorjeni na grafičnem prikazu. Primerjava z rezultati fotogrametrije je pokazala, da je z georadarjem mogoče zaznati velikosti odstopanja ometa večja od 8 mm.

Zopet bi bilo bolj natančno oceno velikosti območja odstoplega dela ometa mogoče podati v primeru konstantne debeline ometa in popolnoma ravnih površin kamnitih zidakov. Vendar ta ugotovitev ne prispeva veliko k prenosu metode v prakso, saj so takšni primeri bolj izjema kot pravilo. V večini primerov georadarskih preiskav kamnitih zidov gre namreč za preiskave starejših objektov. V časih, ko so bili takšni objekti zgrajeni, enakomerne debeline ometa in popolnoma ravnih površin kamnitih zidakov zaradi postopka izgradnje zidu in izdelave ometa namreč ni bilo enostavno doseči. Bolj pravilno obliko kamnitih zidakov bi bilo mogoče določiti, če bi se grafične prikaze ekstrapoliralo na večji časovni prirastek sledi.

Ta stran je namenoma prazna.

VIRI

Bosiljkov V., Bokan-Bosiljkov, V., Cotič, P. 2011. European Research Project – PERPETUATE. Deliverable D6, Review of innovative techniques for the knowledge of cultural assets. Ljubljana, University of Ljubljana. <http://www.perpetuate.eu>. (Pridobljeno 6. 1. 2013.)

Bosiljkov, V., da Porto, F., Binda, L. et al. 2004. European Research Project – On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings. Deliverable D11.1, Technical guidelines for an appropriate use of the suggested equipment : revised report. Ljubljana: Zavod za gradbeništvo Slovenije. Loč. pag., ilustr. <http://www.onsiteformasonry.bam.de>. (Pridobljeno 6. 1. 2013.)

Bosiljkov, V., Kržan, M., et al. 2012. European Research Project – PERPETUATE. Deliverable D15, Results of laboratory and in-situ tests on masonry properties and tables with mechanical parameters to be adopted in numerical modeling. Ljubljana, University of Ljubljana. <http://www.perpetuate.eu>. (Pridobljeno 6. 1. 2013.)

Kohl, Ch., Krause, M., Maierhofer, Ch., Wöstmann, J., Wiggerhauser, H., Mayer, K. 2003. 3D-Visualisation of NDT-Data using Data Fusion Technique. International Symposium, Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003. <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v023/v023.htm> (Pridobljeno 21. 2. 2013.)

Cotič, P. 2010. Eksperimentalno podprta parametrična nelinearna seizmična analiza kamnite zidane stavbe. Diplomaska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer (samozaložba P. Cotič): 118 str.

CREWES, Consortium for research in elastic wave exploration seismology. 2012. <http://www.crewes.org/ResearchLinks/ConvertedWaves/page2.php> (Pridobljeno 7. 11. 2012.)

Daniels, D. J., (ur.) 2004. Ground Penetrating Radar 2nd Edition, IEE Radar, Sonar, Navigation And Avionics Series. London, The Institution of Electrical Engineers: 726 str.

Directindustry, earth resistance and earth resistivity meters. 2012. http://img.directindustry.com/images_di/photo-m2/earth-resistance-and-earth-resistivity-meters-30613-2488005.jpg (Pridobljeno 8. 10. 2012.)

Gosar, A., Ravnik, D. 2007. Uporabna geofizika. Ljubljana, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo: 75 str.

Impact – echo instruments. 2012. <http://www.impact-echo.com/Impact-Echo/impact.html> (Pridobljeno 8. 10. 2012.)

Jol, H.M. (ur.) 2009. Ground Penetrating Radar : Theory and Applications. Elsevier Sciences: 524 str.

Kearey, P., Brooks, M. 1991. An Introduction to Geophysical Exploration. Oxford, Blackwell: 262 str.

Kržan, M., Cotič, P., Bosiljkov, V. 2012. Laboratorijske preiskave troslojnih kamnitih zidov. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Zbornik 34. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 11. – 12. Oktober 2012. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 203 – 210.

Maierhofer, Ch., Wendrich, A., Köpp, Ch., Mittag, K., Krause, M., Effner, U., Johansson, B., Marchisio, M. 2004. European Research Project – On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, Deliverable D7.1 – D7.4, NDT system modifications and optimisations. <http://www.onsiteformasonry.bam.de>. (Pridobljeno 22. 1. 2012.)

MALÅ GPR Encoders. 2012.

<http://www.malags.com/Products/MALA-GPR-Encoders> (Pridobljeno 14. 11. 2012.)

MALÅ Ground Penetrating Radar High Frequency (HF) Antennas. 2012.

[http://www.malags.com/Products/MALA-HF-\(High-Frequency\)-Antennas](http://www.malags.com/Products/MALA-HF-(High-Frequency)-Antennas)
(Pridobljeno 14. 11. 2012.)

McCann, D.M., Forde, M.C. 2001. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. NDT&E International 34: 71–84.

Murn, P. 2013. Določanje učinkovitosti aktivne termografije za zaznavanje anomalij v betonskih konstrukcijskih elementih. Diplomsko naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer (samozaložba P. Murn): 77 str.

NDT James. 2012.

https://www.ndtjames.com/rebar_locator_a/302.html (Pridobljeno 4. 10. 2012.)

Neal, A. 2004. Ground – penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. Earth – Science Reviews 66: 261–330.

Peterman, V. 2011. Fotogrametrična določitev deformacij površine jeklenega nosilca z večslikovno metodo. Diplomsko naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo, Geodetska smer (samozaložba V. Peterman): 69 str.

Proceq ultrasonic-pulse velocity. 2012.

<http://www.proceq.com/en/non-destructive-test-equipment/concrete-testing/ultrasonic-pulse-velocity/pundit-lab.html?pqr=2> (Pridobljeno 4. 11. 2012.)

Sandmeier, K. J. 2012. ReflexW manual, Version 6.0 Windows™9x/NT/XP/7 program for the processing and interpretation of reflection and transmission data, navodila za uporabo programske opreme: 532 str. <http://www.sandmeier-geo.de/download.html>
(Pridobljeno 25. 2. 2012.)

San jose state university. 2012.

<http://www.physics.sjsu.edu/becker/physics51/induction.htm>. (Pridobljeno 4. 10. 2012.)

SENTINEL, your key to ndt. 2012.
<http://www.sentinelndt.com/> (Pridobljeno 7. 11. 2012.)

Testeq, Test Equipment Corporation. 2012.
<http://www.testeq.com/charts/decibels.lasso>
(Pridobljeno 29. 11. 2012.)

Uranjek, M. 2008. Problematika injektiranja zidov objektov kulturne dediščine. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Podiplomski študij konstrukcijske smeri (samozaložba M. Uranjek): 166 str.

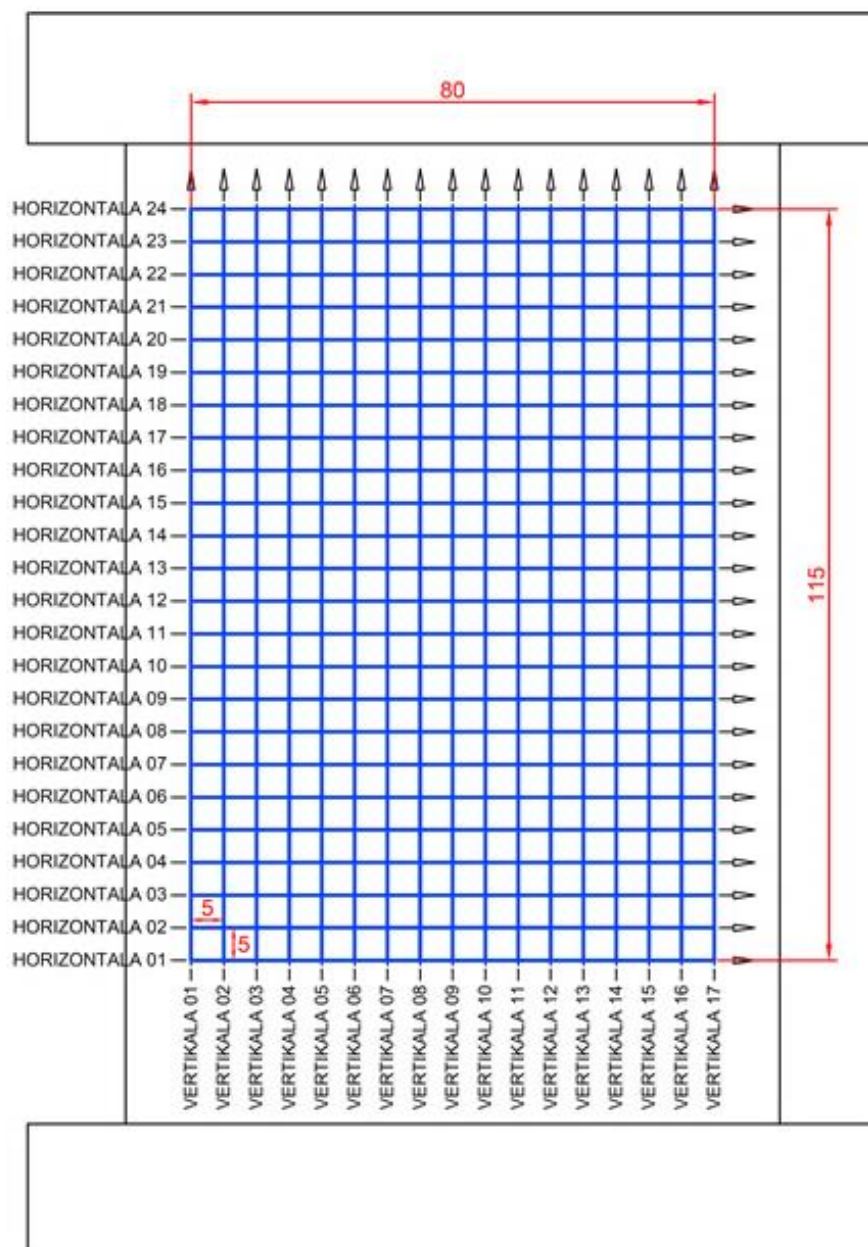
Yelf, R., Yelf, D. 2006. Where is True Time Zero? Georadar Research, Electromagnetic Phenomena 7, 1: 18.

Yilmaz, Ö. 1987. Seismic Data Processing. Investigations in Geophysics 2. Society of Exploration Geophysicists: 526 str.

Živanović, M. 2002. Georadar – nedestruktivna raziskovalna metoda. V: Kuhar, M. (ur.), Brilly, M. (ur.), Zbornik predavanj, raziskave s področja geodezije in geofizike 2002. Ljubljana, slovensko združenje za geodezijo in geofiziko: str. 21 – 25.

PRILOGE

PRILOGA A: Shematični prikaz razporeditve georadarskih profilov na preizkušancu



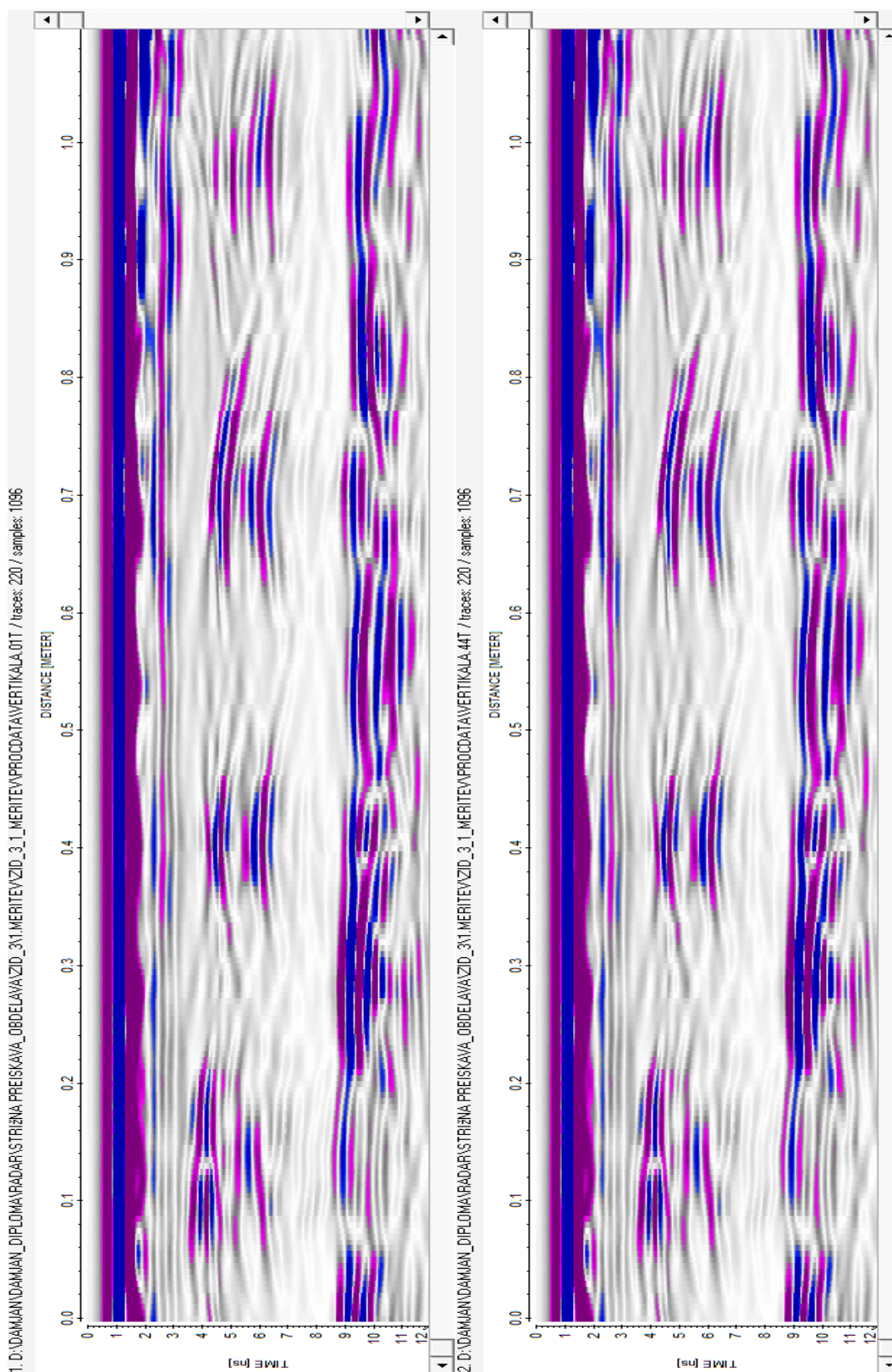
PRILOGA B: Glavne uporabljene nastavitve merilnega sistema

Tip antene (angl. Antenna): HF 1,6 GHz shielded	Visoko frekvenčna, zaščitena, oddajno-sprejemna antena.
Vzorčenje (angl. Time Window): 12 ns (1096 vzorcev)	Dolžina sledi, ki se odraža v globini preiskovanega območja.
Frekvenca vzorčenja (angl. Sampling frequency): 91414,78 MHz	Definira število vzorcev na sledi. Višja kot je vrednost vzorčenja, večja je vertikalna ločljivost.
Način zajemanja podatkov (angl. Aquisition mode): wheel	Izbrana je bila opcija »wheel«, saj je bil za enakomerno zajemanje podatkov uporabljen merilni kolešček.
Razmik med sledmi (angl. Point interval): 0,005 m	Z dolžinskim intervalom definirana gostota zajemanja sledi.
Filter FIR (angl. FIR switch): ON	
Odstranitev ozadja (angl. BKG removal): 50 samples	
Filter za prepuščanje nizkih frekvenc (angl. Low pass): 5 samples	

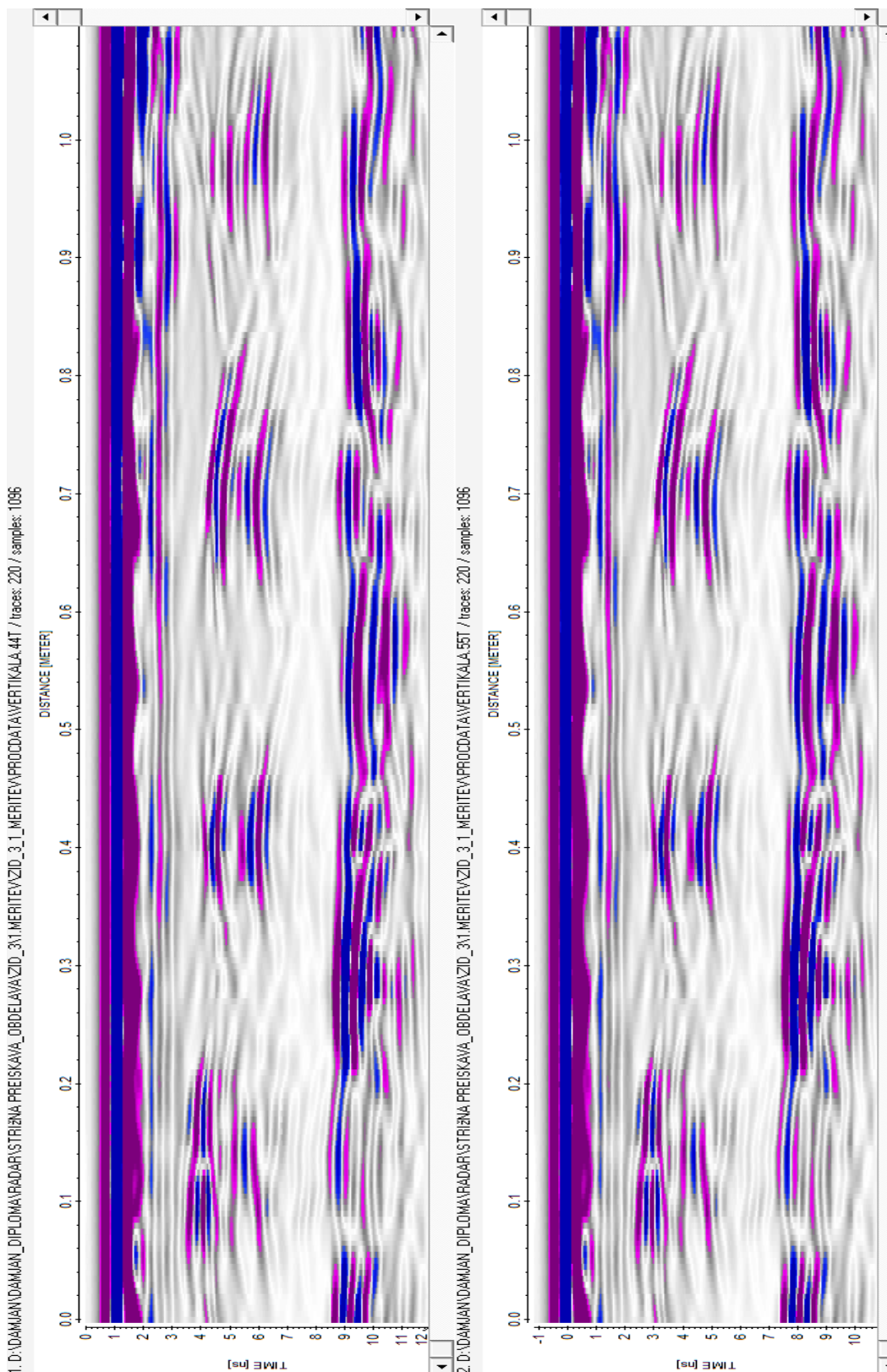
V tabeli so poleg slovenskih podani tudi angleški izrazi za posamezne nastavitve georadarskega merilnega sistema. Programska oprema uporabljenega merilnega sistema je namreč izdelana v angleškem jeziku, zato se zdi na tem mestu potrebno, poleg slovenskih izrazov navajati tudi avtentične izraze v angleškem jeziku.

PRILOGE C: Radargrami georadarskega profila po posameznih korakih obdelave

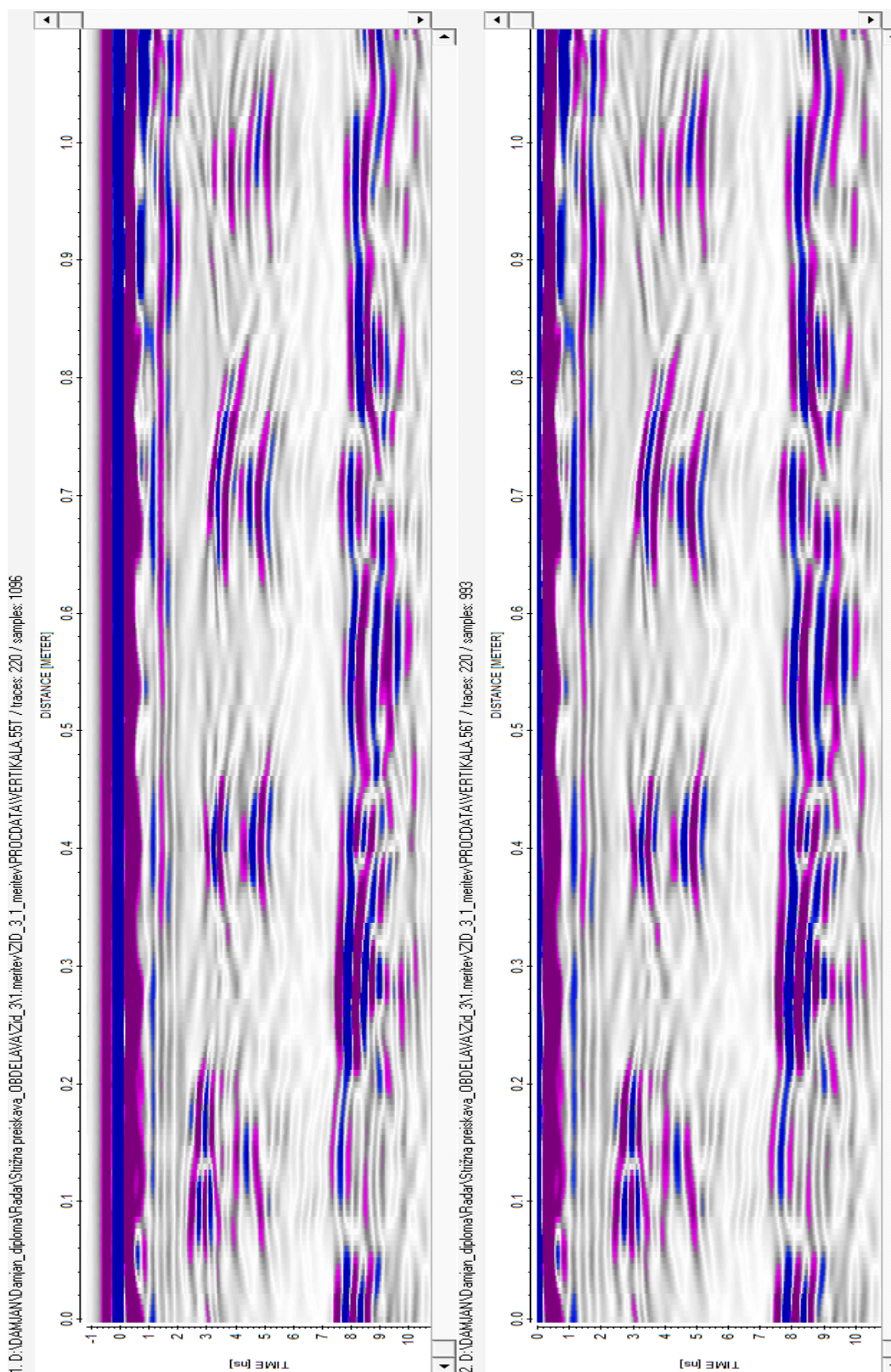
C1: Radargram georadarskega profila pred (levo) in po odstranitvi ojačitve (desno)



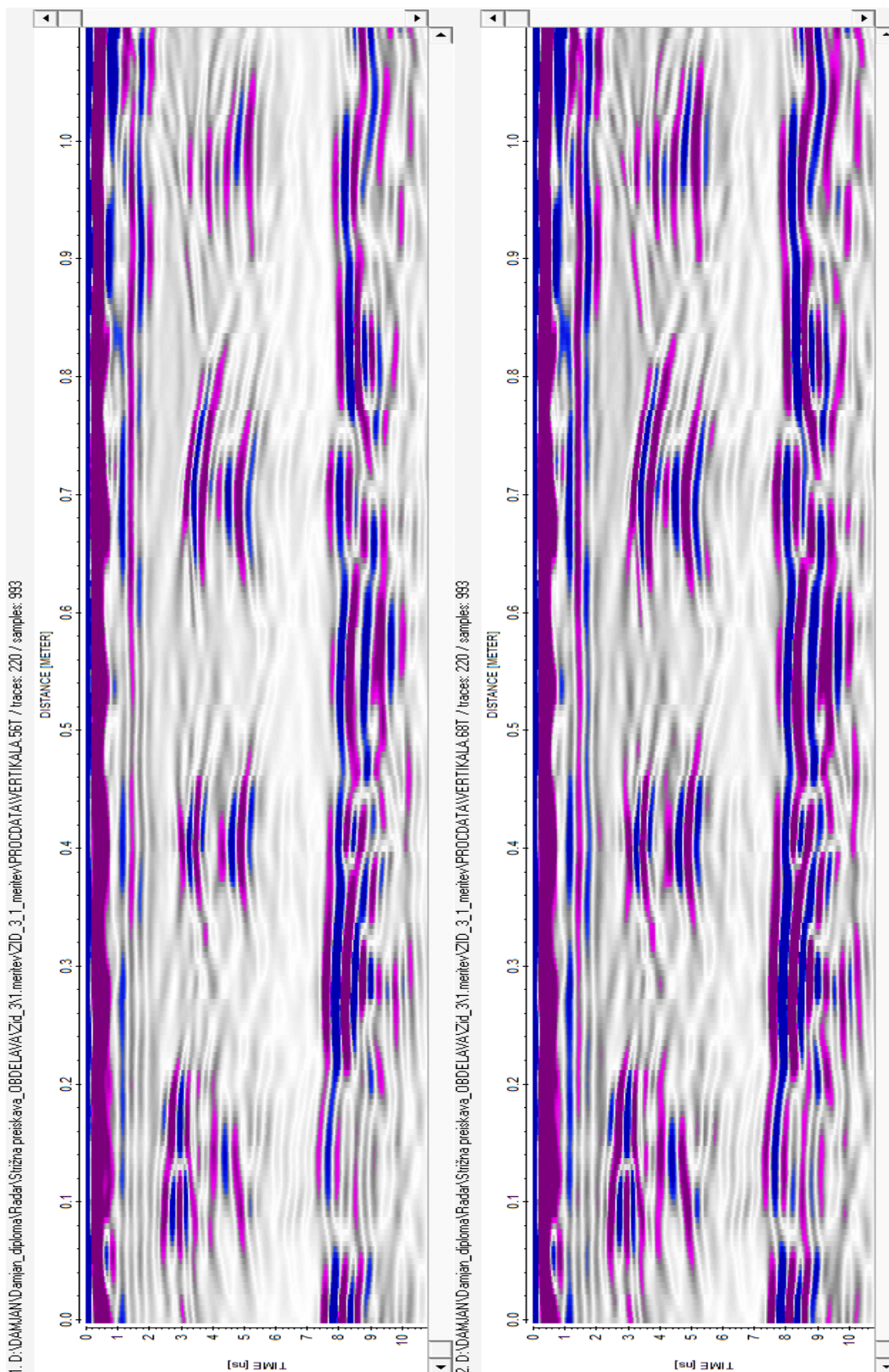
C2: Radargram georadarskega profila pred (levo) in po korekciji maksimalne faze (desno)



C3: Radargram georadarskega profila pred (levo) in po zamiku začetnega časa (desno)



C4: Radargram georadarskega profila pred (levo) in po ojačitvi signala (desno)



C5: Radargram georadarskega profila pred (levo) in po izvedeni migraciji (desno)

