

Primož KOMEL

univ.dipl.inž.geol., Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o., Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

Matevž Uroš PAVLIČ

univ.dipl.inž.geol., Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o., Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

## **UPORABA GEORADARJA V GEOTEHNIKI, GEOLOGIJI IN GRADBENIŠTVU OB PRAKTIČNIH PRIMERIH**

**POVZETEK:** Georadar (ang. Ground Penetrating Radar – GPR) je sorazmerno mlada geofizikalna metoda, katere začetki segajo v 60. leta prejšnjega stoletja, ko so ga uporabili za določanje debeline polarnega ledu. V zadnjih dvajsetih letih so preiskave z georadarjem doživele velik razcvet, saj so bile dodobra pojasnjene teoretične osnove širjenja georadarskih valov ter posledično razviti dovolj kakovostni sistemi za izvedbo zanesljivih preiskav.

V prispevku opisujemo možnosti aplikacije, prednosti ter slabosti georadarskih preiskav na praktičnih primerih izvedenih v zadnjih letih. Na primerih smo prikazali kakšne so uporabne možnosti georadarskih preiskav v geotehniko (iskanje jam, kavern in večjih razpok predvsem v zakraselih temeljnih tleh), cestogradnji (preiskave vozišča in spodnjega ustroja), pri različnih problemih v geologiji (raziskave tal, določanje debeline ledu) ter v gradbeništvu (iskanje praznin oziroma razpok v hišah (zgodovinski objekti, posledice potresne dejavnosti), ugotavljanje uspešnosti injektiranja razpok, določanje debeline temeljnih plošč, iskanje temeljev in najrazličnejših instalacij).

## **GROUND PENETRATING RADAR USE IN GEOTEHNICS, GEOLOGY AND CIVIL ENGINEERING ON CASE STUDIES**

**SUMMARY:** Ground Penetrating Radar – GPR is fairly young geophysical method, which beginnings are somewhere in the middle of 1960, when GPR got used more frequently for estimation of polar ice sheet. In the last 20 years ground penetrating radar survey begun to blossom, especially because the theoretical basics of GPR waves propagation we sufficiently explained and proved. It is because of this, quality GPR systems were developed which are now used to complete a reliable survey.

In this paper we are describing options of GPR application, advantages and disadvantages of ground penetrating radar survey performed in the last few years. We used case studies to show various range of application of GPR survey in geotechnics (karst investigation, defining dept of foundation...), road construction (road body investigation), various problems in geology (ground investigation, ice sheet depth investigation) and construction (investigations of crack in houses, determining the quality in injections of structural cracks, determining the rebar in the foundation, investigations of various installations in the walls and floor...)

## UVOD

Georadar (ang. Ground Penetrating Radar – GPR) je sorazmerno mlada geofizikalna metoda, ki je svoj hiter razvoj in tehnološko dovršenost dosegel v zadnjih dvajsetih letih. Od vseh geofizikalnih merskih tehnik ima georadar najširši spekter uporabe in predstavlja uspešno orodje za hitro in natančno preiskavo električno visoko upornih medijev, razvoj računalnikov in programske opreme pa omogoča tudi hitro in natančno obdelavo velike količine podatkov.

V svetu se za poimenovanje te geofizikalne metode uporabljajo poleg najpogostejše kratic GPR (angl. ground penetrating radar) tudi druge kratice kot sta npr. EMR (angl. electromagnetic reflection) ali SIR (angl. subsurface interface radar).

Začetki uporabe georadarja - metode RES (angl. radio echo sounding) segajo v šestdeseta leta prejšnjega stoletja, ko so ugotavljali predvsem debelino polarnega ledu, kot prvo uporabo pa štejeemo določitev debeline ledenika v Avstriji leta 1930.

Georadar temelji na oddajanju lastnega elektromagnetnega polja za potrebe raziskav slabo dielektričnih materialov in določitev meja med elektromagnetno različnimi materiali. Večinoma so to naravne, geološko različne snovi (kamnine in sedimenti), čeprav se široko uporablja tudi v raziskavah umetnih snovi kot so: asfalt, beton, plastika in konstrukcijskih elementov (stena, strop, tla).

V slabo dielektrično snov lahko prodre oddani elektromagnetni signal le do določene debeline, oziroma globine, preden bo zadušen (absorbiran). Tako je globinski doseg osnovno vodilo za uporabo te metode. Ko doseže oddani elektromagnetni signal, ki potuje iz oddajnega dela antene, elektromagnetno mejo, se del energije odbije in registrira s sprejemno anteno, preostanek pa nadaljuje širjenje skozi medij do naslednje elektromagnetne meje, kjer se ponovno del energije odbije in registrira.

Hitrost in dušenje signala sta dejansko odvisna od frekvence signala. Najpogostejši frekvenčni interval, ki se ga uporablja pri georadarju je običajno med 10 MHz in 1000 MHz, redkeje do 2200 MHz. Visoke frekvence (kratke valovne dolžine) omogočajo večjo ločljivost, hkrati pa signal zaradi večjega dušenja in razprševanja prodre v snov mnogo manj kot tisti z nižjo frekvenco.

Vodilna podjetja na področju izdelave georadarske opreme so ameriški GSSI z inštrumenti serije SIR SYSTEM, inštrumenti EKKO-PULSE ter evropski Måla Science z inštrumenti serije RAMAC.

## PODROČJA DELOVANJA GEORADARJA

V Sloveniji je izvajanje georadarskih meritev povezano predvsem z:

- odkrivanjem lokacij, globin, orientacij, velikosti in oblik podzemnih kovinskih, betonskih ali plastičnih cevovodov, napeljav ter druge infrastrukture,
- odkrivanjem najrazličnejših napeljav v objektih,
- določevanjem oblik in globin temeljev in debelin temeljnih plošč,
- določanjem kakovosti injektiranja objektov in določanjem morebitnih praznin v stenah,
- ugotavljanjem poškodb cestišč,
- preiskavami betonov in iskanjem armature,
- odkrivanjem praznin v kamninah,
- raziskavo kraških oblik,
- določanjem debeline ledu in morfologije kamninske podlage pod ledom,
- določanjem prelomov, razpok in zapolnitev razpok v kamninah,
- odkrivanjem najrazličnejših arheoloških ostalin,
- odkrivanje gladine podzemne vode ter
- širjenje onesnaževal v tleh.

Področje delovanja georadarja je izredno široko in v svetu je vse pogostejša uporaba tudi na področju okoljske problematike, pri iskanju najrazličnejših onesnaževal, odkrivanju zakopanih eksplozivnih teles, reševanju problemov s področja hidrogeologije, sedimentologije, glaciologije itd.

## PREDNOSTI IN SLABOSTI GEORADARSKIH RAZISKAV

Največje prednost georadarskih raziskav so v njihovi vsestranskosti, natančnosti, dobri ločljivosti, ponovljivosti, nedestruktivnosti, prostorski vpetosti in nenazadnje, v sedanjem času zelo pomembni, cenovni konkurenčnosti.

Pri določenih preiskavah najrazličnejših konstrukcij ali tal je nedestruktivnost ena od glavnih zahtev. Z georadarjem namreč le raziskujemo, hkrati pa ne posegamo v samo snov, zato z njimi ne povzročamo njene oslabitve. Meritve se odvijajo »in situ«, v intaktnih medijih, ki so v naravnem stanju. Pridobivamo le podatke o njihovih geofizikalnih lastnosti, s katerimi si pomagamo pri končni interpretaciji. Podatki, ki jih pridobimo z georadarjem so zvezni profili, ob meritvah vzdolž večih paralelnih in nanje prečnih profilov pa pridemo iz dvodimenzionalnega v tridimenzionalni prostor.

Snovi ki jih preiskujemo so lahko naravnega ali umetnega izvora, debele od nekaj centimetrov do nekaj deset metrov, kar še povečuje uporabnost georadarja.

Metoda georadarskih preiskav pa odpove v primerih, ko sestavljajo površinski sloj, po katerem potuje, antena dobro prevodni materiali kot so zelo vlažne gline ali melji, slana voda ter različne snovi (žlindre) z visoko vsebnostjo železa.

## OD MERITVE DO REZULTATA

### Oprema, ki jo uporabljamo za georadarske meritve

Meritve izvajamo z georadarskimi sistemi, ki so sestavljeni iz centralne merilne enote, oddajne in sprejemne antene (angl. bistatic radar) ali pogosteje uporabljene oddajno – sprejemne antene (angl. monostatic radar). Glede na vrsto preiskovane snovi in njene globine ali debeline uporabljamo antene različnih ločljivosti. Vir energije za delovanje georadarskega sistema predstavlja akumulator, z možnostjo večkratnega polnjenja.

Za georadarske preiskave, ki so opisane v poglavju o primerih uporabe georadarja, je bil uporabljen georadarski sistem »SYSTEM SIR-2« ameriškega proizvajalca GSSI, katerega sestavni del so tudi 200 MHz, 500 MHz in visokoločljiva 900 MHz antena. 200 MHz antena je nižje ločljivosti in s tem večjega globinskega dosega, primerna za reševanje nalog s področja geologije in geotehnike, medtem ko je visokoločljiva 900 MHz antena namenjena predvsem natančnejšim preiskavam na področju gradbenih konstrukcij.



Slika 1. Georadarska oprema SIR – 2.

## Izvedba georadarskih raziskav

Načrtovanje georadarskih raziskav se začne s seznanjanjem želja in zahtevami naročnika, za rešitev zastavljene naloge. Pri tem je potrebno naročniku pogostokrat predstaviti neznano geofizikalno metodo in ga seznaniti s prednostmi, slabostmi in rezultati, ki jih lahko pričakuje.

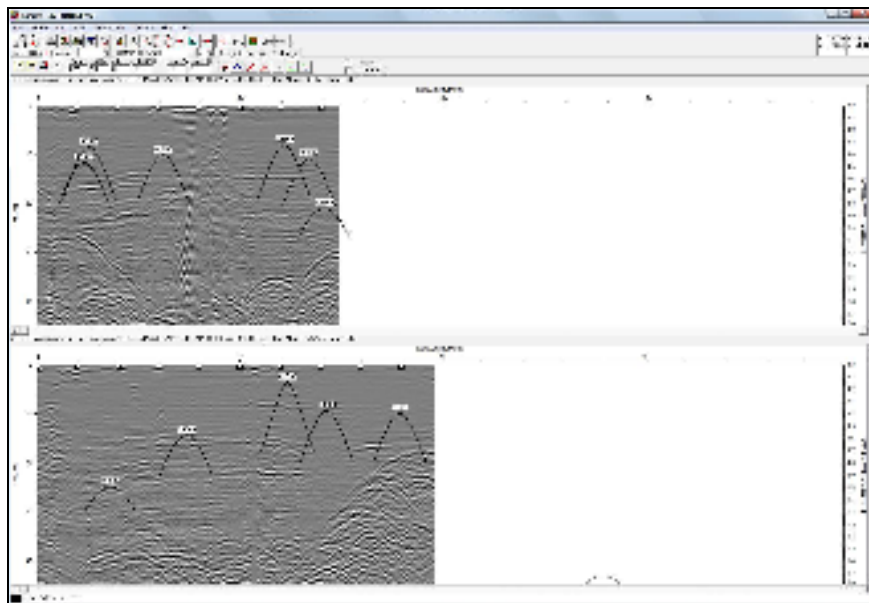
Kot velja za vse geofizikalne metode, mora biti namen terenskega dela za doseganje cilja jasno določen. Za uspešno izvedene meritve je potrebno poznavanje globine podtalnice, sestave krovinskih sedimentov, poznavanje lege najrazličnejših napeljav, električnih vodnikov in ostale infrastrukture, ki niso predmet preiskav in bi utegnile motiti samo izvedbo meritev. Za umiritev georadarja je potrebno izvesti testne meritve vzdolž profilov z znanimi podzemnimi razmerami, ki so značilne za določeno območje. Gostota merskih profilov mora biti kompromis med želeno natančnostjo meritev in najhitrejšo možno izvedbo meritev.

Skoraj vsi georadarski sistemi omogočajo, da se med samim zajemom podatkov na terenu ojača in izostri georadarski signal. V ta namen se uporabljajo visoko in nizko pasovni filtri. Vendar pa mora biti nastavitev filtrov takšna, da se potencialno dragoceni signali ne izgubijo že med samo meritvijo. Filtriranje signala naj ostane domena kabinetne računalniške obdelave podatkov.

Pri opravljanju meritev z GPR sistemom, oddajno – sprejemna antena oddaja EMV valovanje ter beleži anomalije, ki se vračajo v določenem časovnem oknu. Hitrost EMV valovanja skozi posamezni medij je odvisna od :

- električne prevodnosti ( $\epsilon$ ),
- permeabilnosti ( $\mu$ ),
- konduktivnosti ( $\sigma$ )

ter je specifična za posamezne medije. V odvisnosti od teh lastnosti se odločimo s katero oddajno – sprejemno anteno bomo izvajali meritev ter kolikšen bo globinski doseg. Za določitev globine anomalij je potrebno časovne sekcije pretvoriti v globinske ter tako radargram umeriti po y – osi.



**Slika 2.** Pretvorba časovnih sekcij v globinske z uporabo ReflexW 4.5.

Po meritvah na terenu je potrebno »surove« podatke obdelati z računalniškim programom. Obstaja več programov, ki služijo kot orodje za obdelavo radargramov :

- ReflexW 4.5,
- Radan 6.5,
- DeTeC,
- Ground Vision.

Tipični koraki pri obdelavi surovih radargramov so :

- umeritev georadarskega profila v x in y smeri;
- odstranjevanje šumov ozadja (ki so lahko posledica različnih valovanj, ki nastopajo v območju meritve – npr. : GSM);
- uravnavanje funkcije ojačitve signala – GAIN;
- popravki profila zaradi neravnosti terena...

## PRIMERI UPORABE GEORADARJA

V tem poglavju so predstavljeni zanimivi primeri uporabe georadarskih meritev v praksi. Meritve je izvajal Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o. iz Ljubljane.

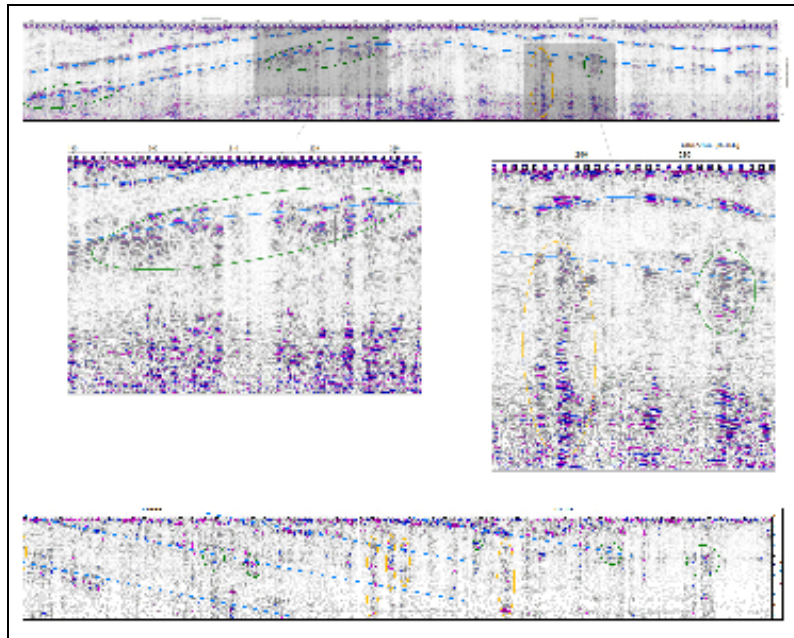
### Uporaba georadarja na področju geotehnike

#### *Raziskava temeljnih tal velikega zazidalnega območja na Krasu*

Namen preiskav: ugotavljanje praznin na kraškem ozemlju velikem približno 350.000 m<sup>2</sup>

Uporabljen georadarski sistem: SYSTEM SIR-2, 200 MHz antena

Opis georadarskega posnetka (radargrama): z georadarsko preiskavo terena smo določili področja, kjer je zakraselost raziskovanega območja večja, prav tako smo ugotovili območja z manjšimi kraškimi brezni (navpične elipse). V preiskavi smo ugotovili tudi zakraselost območja med geološkimi plastmi (vodoravne elipse) ter plastovitost kraškega apnenca (poševne črte). Na ta način se izloči potencialne nevarne predele zaradi možnosti udara tal.



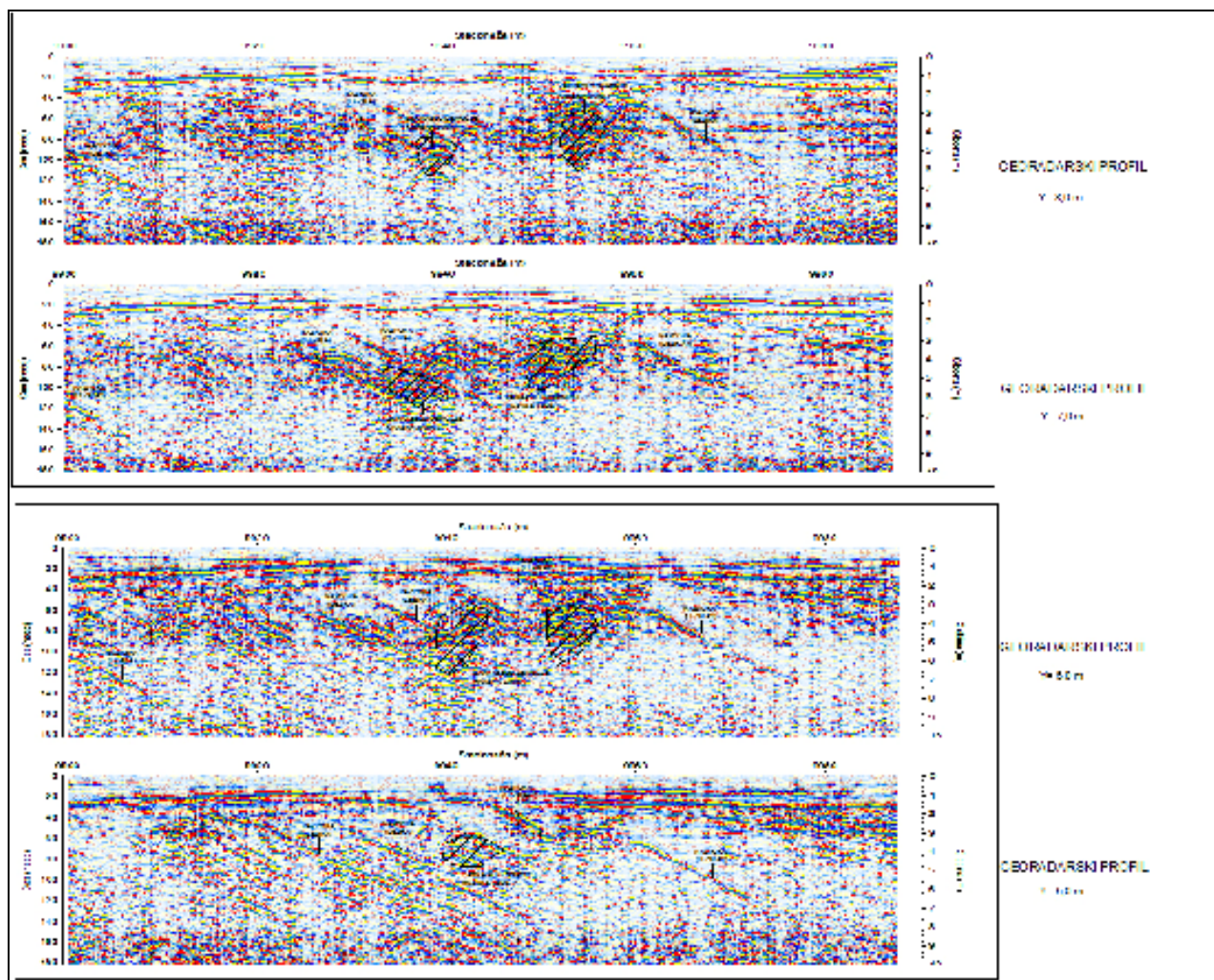
**Slika 3.** Georadarski profili kraškega terena.

### Raziskave na avtocestnem križu

Namen preiskav: georadarska preiskava območju obstoječe avtoceste Postojna – Ljubljana z namenom, da se ugotovi stanje vozišča ter potencialna večja zakrasela območja, ki bi lahko povzročila udor ceste.

Uporabljen georadarski sistem: SYSTEM SIR-2, 200 MHz antena

Opis georadarskega posnetka (radargrama): z georadarsko preiskavo smo ugotovili stanje tampona ter manjše praznine v zakraselem apnencu.



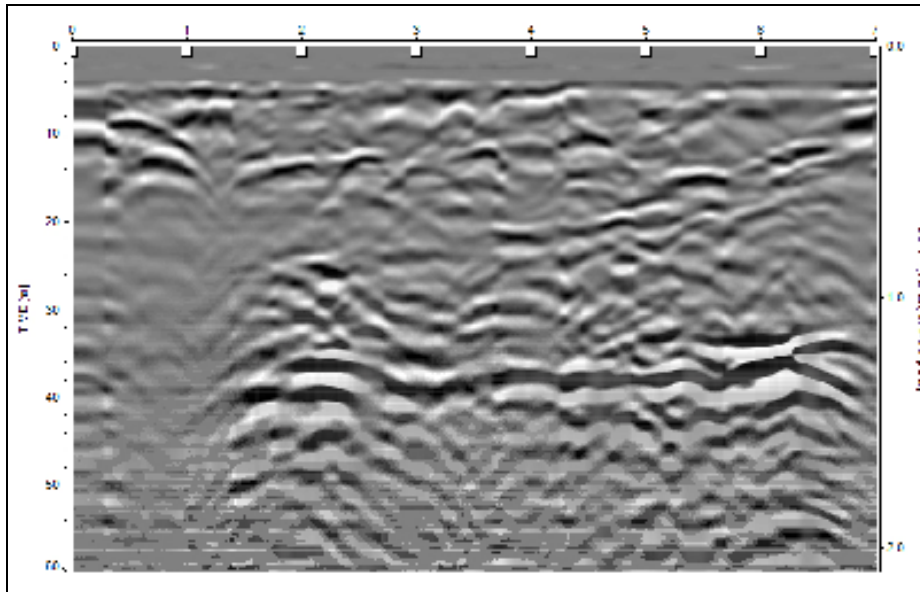
Slika 4. Georadarski profil AC na območju Postojne.

### Iskanje temeljev, določanje njihove globine, oblike

Namen preiskav: določitev globine temeljev

Uporabljen georadarski sistem: SYSTEM SIR-2, 200 MHz antena.

Opis georadarskega posnetka (radargrama): georadarske preiskave so pokazale elektromagnetno anomalijo, ki na globini okoli 1,4 metra in predstavlja razširitev temelja objekta (merjeno vzdolž objekta).



**Slika 5.** Georadarski profil razširitve temelja objekta.

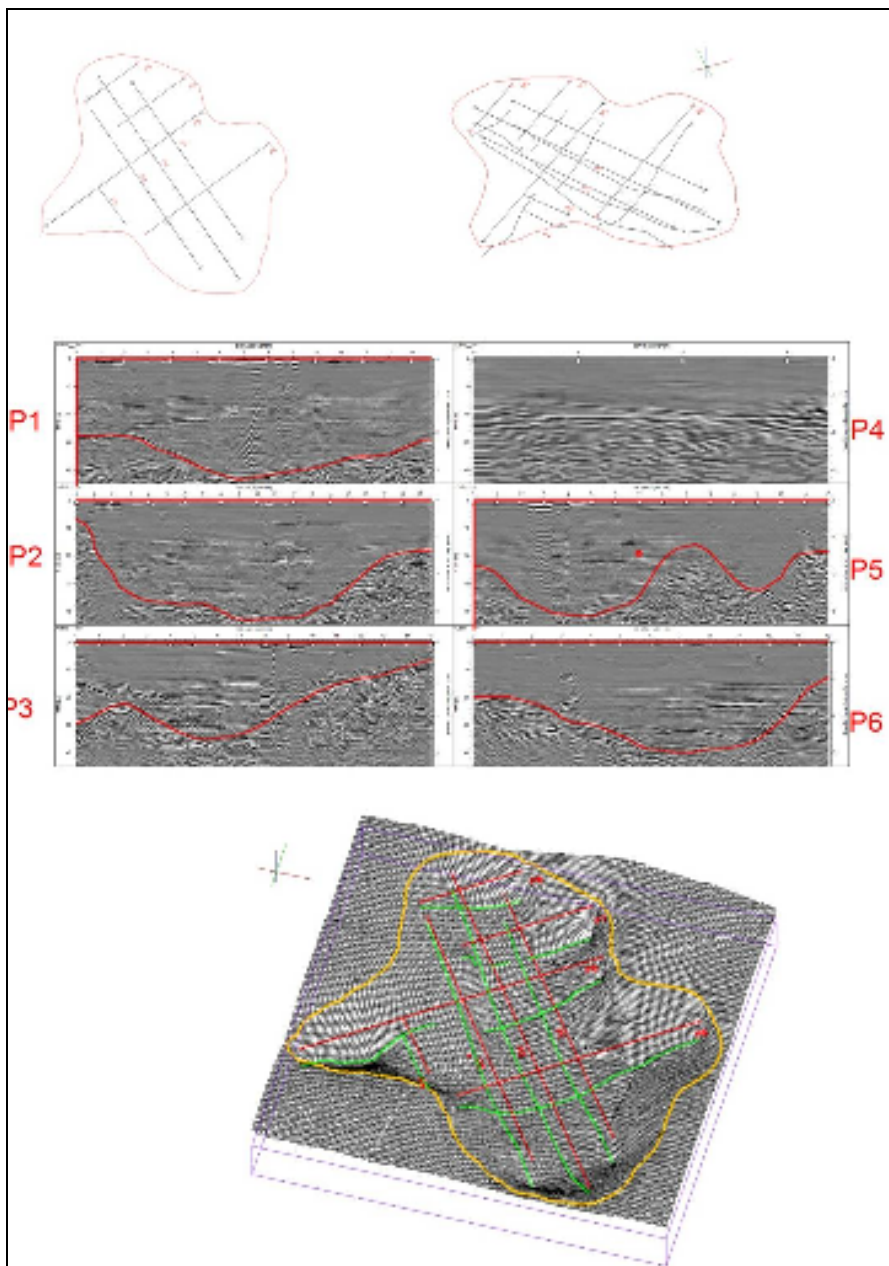
### **Uporaba georadarja na področju geologije**

#### *Določanje debeline ledu in morfologije podlage*

Namen preiskav: izvedena je bila georadarska preiskava z namenom ugotovitve debeline ledu nad sedimenti ter morfologije podlage. Zaradi homogenosti ter nizke električne prevodnosti ledu lahko dosežemo velike globine tudi z visokofrekvenčnimi antenami, zaradi česar pa imamo tudi izredno dobro ločljivost (nekaj cm pri 900MHz anteni).

Uporabljen georadarski sistem: SYSTEM SIR-2, visokoločljiva 900 MHz antena.

Opis georadarskega posnetka (radargrama): Z izvedbo georadarskih profilov ter geodetskim posnetkom teh profilov smo izdelali 3D model ledu. Podlaga pod ledom se v povprečju nahaja okoli 3,5 metra pod površjem ledu.



**Slika 6:** Konstrukcija 3D modela ledu s pomočjo georadarskih profilov

### **Uporaba georadarja na področju gradbeništva**

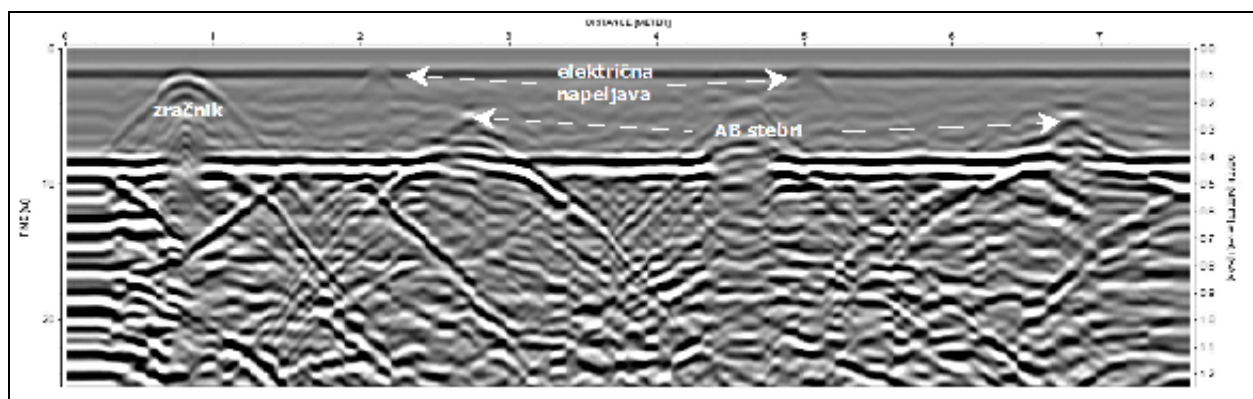
#### *Odkrivanje najrazličnejših instalacij v stenah, tleh in stropovih*

Namen preiskav: odkrivanje najrazličnejših instalacij v stenah, tleh in stropovih

Uporabljen georadarski sistem: SYSTEM SIR-2, visokoločljiva 900 MHz antena.

Opis georadarskega posnetka (radargrama): na radargramu so lepo opazne EMV anomalije, ki predstavljajo električno napeljavo, zračnik ter armiranobetonski steber.





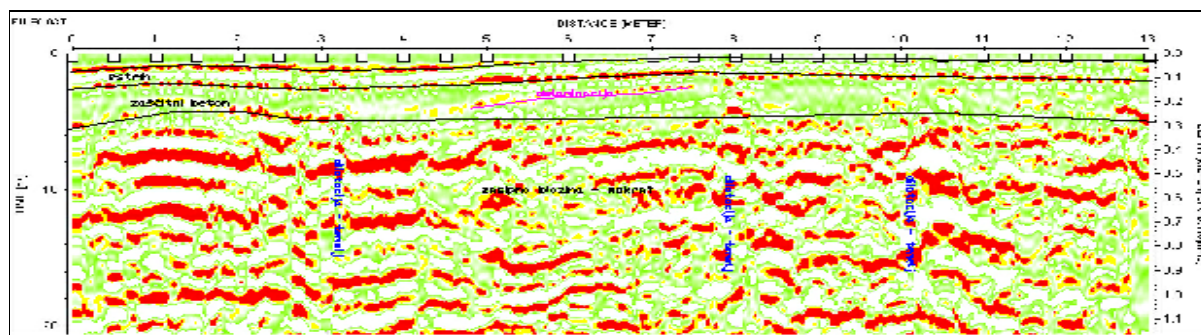
**Slika 7.** Radargram stenskih inštalacij ter konstrukcijskih elementov

### *Preiskava armiranobetonske plošče*

Namen preiskav: ugotovitev sestave in stanja talne plošče ter določanja potencialnih območij delaminacije v betonski AB plošči.

Uporabljen georadarski sistem: SYSTEM SIR-2, visokoločljiva 900 MHz antena

Opis georadarskega posnetka (radargrama): lepo vidne meje estrih-hidroizolacija, z vgrajeno železno armaturno mrežo v estrihu (debeline od 5 – 12 cm). Pod plastjo estriha se nahaja mestoma različno debela plast zaščitnega betona (debeline od 10 – 15 cm). Močne elektromagnetne anomalije v tem sloju so najverjetneje posledica delaminacije v zaščitni betonski plasti. Sledi plast zasipne blazine (debeline od 20 – 35 cm) in naravnega terena katerega odboji so zelo intenzivni (velike amplitude), kar je posledica vlažnih glinenih sedimentov.



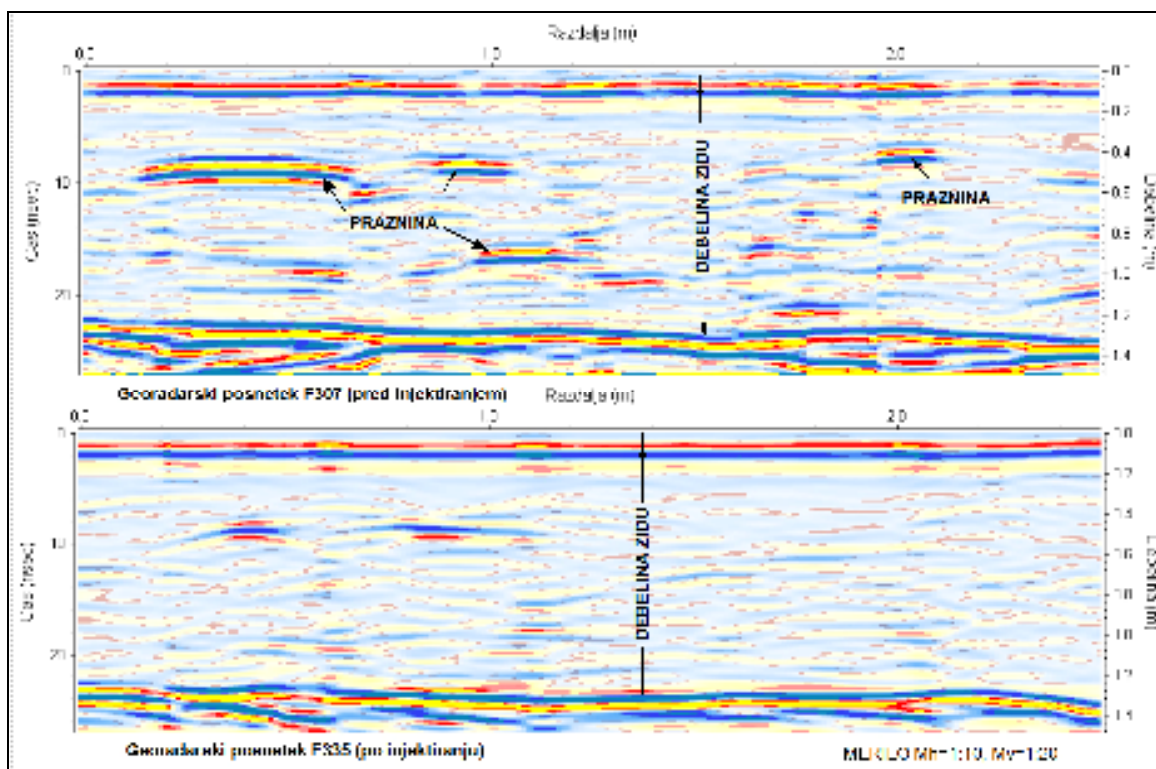
**Slika 8.** Preiskava AB talne plošče

### *Ugotavljanje kakovosti injektiranja konstrukcijskih elementov*

Namen preiskav: določanje praznin v kamnitem zidu pred injektiranjem in/ali po njem ter ugotavljanje kontrole kakovosti izvedenih del.

Uporabljen georadarski sistem: SYSTEM SIR-2, visokoločljiva 900 MHz antena.

Opis georadarskega posnetka (radargrama): na zgornji sliki, ki prikazuje stanje pred injektiranjem so jasno vidne praznine (rumene lise predstavljajo zrak), medtem ko se na spodnji sliki vidi uspešno zapolnitev razpok z injekcijsko maso (modre lise predstavljajo odboj na meji kamnina-injekcijska masa).



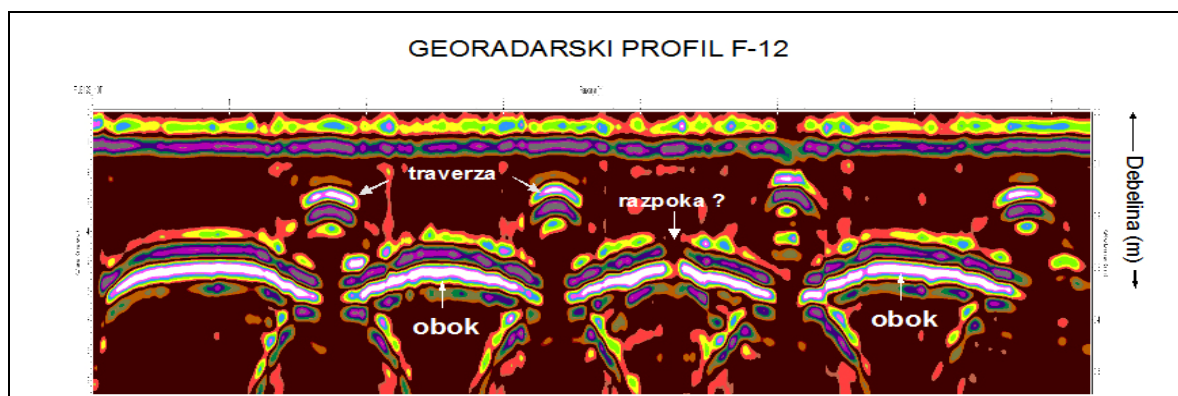
**Slika 9.** Ugotavljanje kakovosti injektiranja: pred injektiranjem (zgornja slika); po injektiranju (spodnja slika)

#### *Analiza konstrukcijskih elementov*

Namen preiskav: dolčanje debeline, sestave, praznin, razpokanosti konstrukcijskih elementov.

Uporabljen georadarski sistem: SYSTEM SIR-2, visokoločljiva 900 Mhz antena.

Opis georadarskega posnetka (radargrama): lepo vidna obokasta zgradba stropne konstrukcije debeline 32 cm, z vidnimi traverzami in verjetno razpoko v oboku.



**Slika 10.** GPR preiskava konstrukcijskih elementov

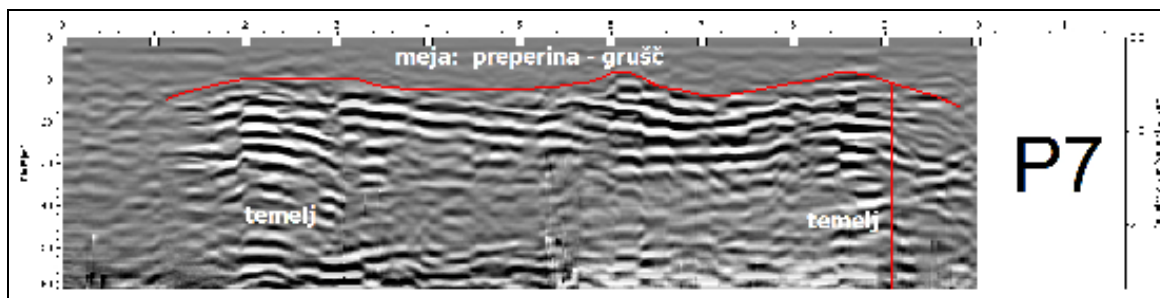
## Uporaba georadarja na področju arheologije

### Odkrivanje arheoloških ostalin

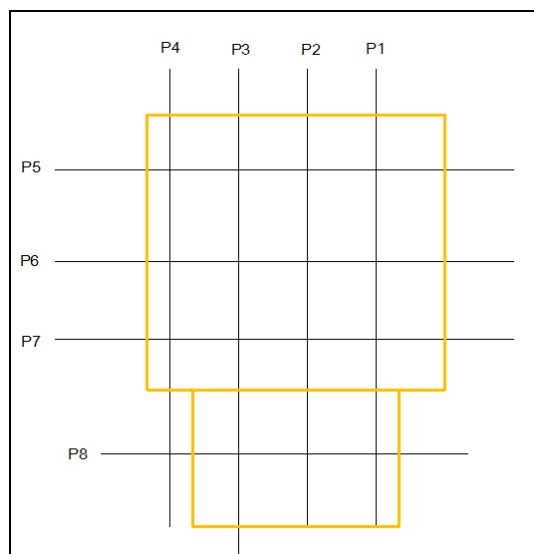
Namen preiskav: določanje temeljev cerkve v arheološkem najdišču

Uporabljen georadarski sistem: SYSTEM SIR-2, 500 MHz antena.

Opis georadarskega posnetka (radargrama): z georadarsko preiskavo smo ugotovili območja, kjer se nahajajo ostanki temeljev cerkve. S pomočjo georadarskih profilov smo ugotovili tloris nekdanje cerkve.



Slika 11. Georadarski profil preiskave ostankov temeljev



Slika 12. Tloris preiskovanega objekta konstruiran iz georadarskih profilov

## ZAKLJUČKI

Zaradi razvoja računalniške industrije in tehnologije se je vsestranska uporabnost ter konkurenčnost georadarskih preiskav v zadnjih dveh desetletjih močno povzpela. Hitri osebni računalniki ter dobro razvita programska oprema omogoča sorazmerno hitro ter natančno izvedbo georadarskih preiskav. To pa vsekakor pomeni izjemno konkurenčnost pri ceni izvedbe preiskave.

Ena glavnih in najmočnejših prednosti georadarske preiskave je dejstvo, da so GPR preiskave nedestruktivne, kar z izvedbenega vidika pomeni, da praktično ni omejitev, kjer se lahko izvede preiskavo. Edina omejitev, ki jo georadar ima, so fizikalne oz. elektromagnetne lastnosti preiskovanega medija.

## **LITERATURA**

- (1) ANNAN, P. A. (2003): Ground Penetrating Radar, Principles, Procedures And Applications, Sensors&Software Inc, Mississauga
- (2) BLINDOW, N. (2007). Ground Penetrating Radar. In KNÖDEL, K., LANGE, G. & VOIGT J.-H. (Eds.): Environmental Geology. Handbook of Field Methods and Case Studies, Springer Verlag, Berlin, 283-335.
- (3) Interno gradivo GI ZRMK d.o.o. Ljubljana, 2003 – 2008