

# Georadarska istraživanja u arheologiji

---

Peić, Matija

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:953149>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-26**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



# Georadarska istraživanja u arheologiji

---

**Peić, Matija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:953149>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-10-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



# Georadarska istraživanja u arheologiji

---

**Peić, Matija**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:953149>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-10-22**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

MATIJA PEIĆ

GEORADARSKA ISTRAŽIVANJA U ARHEOLOGIJI

ZAVRŠNI RAD

Varaždin, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

GEORADARSKA ISTRAŽIVANJA U ARHEOLOGIJI

KANDIDAT:

Matija Peić

MENTOR:

doc.dr.sc. Mario Gazdek

Varaždin, 2018.

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

### GEORADARSKA ISTRAŽIVANJA U ARHEOLOGIJI

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te izrađen pod mentorstvom **doc.dr.sc. Maria Gazdeka**.

Izjavljujem da ni jedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, \_\_\_\_\_

## **SAŽETAK RADA:**

Autor: Matija Peić

### **GEORADARSKA ISTRAŽIVANJA U ARHEOLOGIJI**

Arheologija i inženjerstvo okoliša nas svojim istraživanjima uče da sve što je ispod površine zemlje može imati direkta utjecaj na čovječanstvo danas, bilo da se radi o proučavanju kretanja ili navika ljudi u prošlosti ili o detektiranju onečišćenje okoliša i mogućnost proširenja onečišćenja. Jedna od adekvatnih metoda istraživanja ovih znanstvenih disciplina jest korištenje georadara, uređaja koji emitiranjem elektromagnetskih valova niskih frekvencija stvara profile sadržaja koji se nalaze ispod površine tla, a pri svom djelovanju ne oštećuju i ne mijenjaju postojeću situaciju u tlu. Širenje valova ovisi o sastavu geomedija te su i slike koje se prikazuju i snimaju u digitalni oblik specifične i govore o sastavu i obujmu/širini objekta. Radom se naglašava da nedestruktivna geofizička istraživanja daju precizne i ažurne podatke o tlu.

**Ključne riječi:** arheologija, inženjerstvo okoliša, georadar, metode georadarskih istraživanja

## Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Forenzika u arheologiji i inženjerstvu okoliša .....	3
2.1. Artefakti i onečišćenje tla.....	3
2.2. Arheološko nalazište i „nalazišta“ onečišćenja.....	6
3. Georadar.....	9
3.1. Princip rada georadara.....	9
4. Georadarska istraživanja i primjena .....	14
4.1. Primjena georadara.....	16
4.2. Primjer georadarskog profiliranja - Petrijanec.....	21
5. Georadar kao pametna i održiva tehnologija .....	26
6. Zaključak .....	28
Popis literature .....	29
Popis slika .....	31
Popis tablica.....	32



# 1. Uvod

Znanstvene discipline kao što su sociologija i psihologija proučavaju ljudsku narav, navike i potrebe ljudi, njihovu komunikaciju i kretanje te dokazuju da postoje isti ili tek nešto napredniji obrasci ponašanja i reagiranja, borbe za život i opstanak od samih početaka ljudske vrste. Zahvaljujući poznavanju ljudske prirode i razvoja čovjeka, saznanjima o kulturološkim razlikama, kretanjima i komunikaciji, može se preciznije govoriti o tim znanostima kao o egzaktnim i mjerljivim. Navedeno poznavanje se prvenstveno temelji na interakciji (povezivanju i korelaciji) različitih znanosti. Arheologija se prihvaća kao disciplina koja omogućava pronalazak staništa i praćenje razvoja nekog društva. Zbog toga arheologija učvršćuje druge znanosti svojim pronalascima, pomoću kojih se objašnjavaju kretanja i djelovanja ljudi nekog specifičnog doba te njihov utjecaj i posljedice na današnje stanje (Meštrović, 2016).

Inženjerstvo okoliša je multidisciplinarna znanost današnjice. Bavi se proučavanjem metoda i izvođenjem inženjerskih zahvata s osnovnim ciljem zaštite i poboljšanja kvalitete života ljudi, neodvojivo od prirode i okoliša. Različitim postupcima i metodama upravljanja okolišem, tehnikama istraživanja, analiza i intervencija u osnovne elemente inženjerstva okoliša (zrak, vode i tlo) ima zadaću očuvati okoliš te integrirati sustav održivosti u materijalnu proizvodnju života društva. Kao glavni cilj inženjerstva okoliša postavlja se uspostava sustava racionalnog upravljanja i korištenja resursa (zrak, vode i tlo) danas, da bi se mogle zadovoljiti potrebe društva sutra. Ono što arheologiju kao znanstvenu disciplinu povezuje s inženjerstvom okoliša, je proučavanje interakcija čovjeka i okoliša. Arheologija istražuje posljedice već završenih interakcija, a inženjerstvo okoliša ih nastoji predvidjeti. Pri tome osnovna zadaća nije samo minimiziranje štetnog djelovanja, već izgradnja sustava stalnog praćenja i prilagođavanja inženjerskih zahvata na reakcije okoliša (Gudelj, 2014).

Georadar se danas u arheologiji koristi kao glavna istraživačka metoda u inicijalnoj fazi istraživanja nekog poznatog arheološkog nalazišta ili potencijalnog arheološkog lokaliteta. Osim georadarskih istraživanja, koriste se i druge geofizičke metode, što ovisi o objektu i cilju istraživanja, ali gotovo redovito u kasnijim

istraživačkim fazama. Prednost georadarskih istraživanja je razmjerno velika brzina skeniranja područja znatne površine, projektirana dubina snimanja i rezultati u stvarnom vremenu. Vrsta i sastav geomedija (prirodno tlo u geološkom smislu zajedno s artefaktima) te promjene (anomalije u odnosu na očekivano stanje snimljeno u okolini) imaju direktan utjecaj na zaključke koji se mogu donijeti o lokalitetu nalazišta (samoj povijesti i kulturi koja se razvijala).

Koncept i principi arheoloških istraživanja, koji su i zakonski uređeni uz obaveznu primjenu pravilnika i protokola, pokazuju se kao razumna osnova za planiranje georadarskih istraživanja onečišćenja geomedija, posebice inertnim (na primjer građevinskim) otpadom.

Georadar je sustav za ne-razorna (neinvazivna) geofizička istraživanja koji radi na principu odašiljanja elektromagnetnih valova određene frekvencije iz jedne antene (odašiljač) i snimanja valova reflektiranih na drugoj anteni (prijamniku). Valovi se reflektiraju s granica dvaju geomedija različitih vodljivosti. S obzirom na oblik i vrijeme refleksije, moguće je odrediti lokaciju anomalije na radarskoj snimci (radargramu). Najčešće se u preliminarnim istraživanjima traže upravo koordinate anomalije, da naprednijim obradama i analizama se može pretpostaviti i oblik, odnosno dimenzije objekta. Današnji razvoj georadarske tehnologije ide prema povećanju rezolucije i matematičkom modeliranju fizikalnih svojstava geomedija da bi se uočile fizičko-mehaničke, ali i kemijske promjene koje mijenjaju električnu vodljivost i magnetsku propusnost geomedija (Robinson i sur., 2013).

Iako su takve analize zahtjevne i ne provode se za standardna arheološka ili istraživanja u inženjerstvu okoliša, očito bi njihov doprinos bio značajan, posebno za akcidentne situacije onečišćenja i hitne intervencije sanacije.

## **2. Forenzika u arheologiji i inženjerstvu okoliša**

Arheologija i inženjerstvo okoliša su znanstvene discipline koje se bave različitim temama, no za uspjeh istraživanja koriste (odnosno, trebale bi koristiti) iste metodologije rada te slične postavke i pretpostavke. Samim time polaze od istog postulata: objekt se istražuje ne-destruktivnim metodama u postojećoj okolini. Vrsta i sastav geomedija (okolina objekta istraživanja) s obzirom na svojstva objekta koji se istražuje (artefakt: primjerice utonuli zid antičke građevine u arheologiji ili temelj građevine u napuštenoj industrijskoj zoni, engl. brown field) znatno određuju uspješnost i/ili smjer istraživanja. Stručnjaci oba profila na temelju rezultata istraživanja pristupaju iskapanju i sanaciji, odnosno uklanjaju artefakata.

Forenzika u tom smislu znači rješavanje problema primjenom metoda znanstvenog istraživanja. Preciznije, stručnjaci koji su specijalizirani za točno određeno područje struke nakon primjene znanstvenih metoda mogu nedvosmisleno i na jasan način usmjeriti na donošenje zaključaka (Bašić, 2013).

### **2.1. Artefakti i onečišćenje tla**

Znanost koja nam je omogućila brojna saznanja o prošlosti čovjeka, o cjelokupnoj civilizaciji, ali i specifičnostima pojedinih kultura je arheologija. Ona temeljem materijalnih ostataka istražuje, ali i rekonstruira dio prošlosti. Da bi se postupak rekonstrukcije artefakta mogao što točnije pripremiti i provesti, potrebno je posebnu brigu posvetiti in-situ procjeni stanja materijalnih ostataka prošlosti (Meštrović, 2016).

Ono što arheologiju razlikuje od povijesti jesu istraživanja i zaključivanje temeljem materijalnih tragova, dok povijest prvenstveno koristi pismene izvore. Stoga je važno da ove dvije discipline djeluju zajedno, za potpunije razumijevanje otkrivenog doba ili kulture, a pismeni trag je često i glavni poticaj i buđenje interesa za arheološko istraživanje. Tako je primjerice pronalazak Troje bio motiviran Homerovim mitskim epovima „Ilijada i Odiseja“. Dakle, arheologija kao znanstvena disciplina ne funkcionira

sama, a osim povijesti, ona kao pomoćne discipline prepoznaje sve discipline, vještine, znanja i djelatnosti koje su potrebne da se pronađe neko nalazište ili koje su u nekom trenutku prošlosti služile čovjeku, kako bi se objasnila pojedina otkrića. Zato su potrebna i znanja i metode geofizike, osobito ako lokalitet nalazišta nije preciziran prethodnim istraživanjima. U takvim prilikama i kada je potrebno rekognosciranje (ciljano traženje, dokumentiranje i pregled terena ili utvrđivanje stanja već poznatih arheoloških nalazišta), veliki značaj imaju georadarska istraživanja, da bi se uočilo što se nalazi ispod površine, bez oštećenja ili promjene stanja nalazišta ili materijalnih ostataka (Robinson i sur., 2013).

Arheologija u praksi obuhvaća sve procese prikupljanja podataka i istraživanja područja i materijalnih ostataka, dok arheološka teorija donosi zaključke o nalazima, njihovo značenje i povezanost nalaza. Arheologija nam omogućuje zaključivanje o kulturnom ponašanju ljudi u prošlosti, njihovoj duhovnosti i praznovjerju, etici i moralu, kao i o neracionalnosti ponašanja i o grupnoj ili pak psihologiji pojedinca. Postoji više grana arheologije, a jedna od njih je takozvana računalna arheologija, koja se koristi digitalnom tehnologijom u analizi podataka ili nalazišta za izvođenje složenih modela. Navedena grana koristi razne alate, poput georadara, za prostornu analizu, a uključuje proučavanje, korištenje i primjenu statističkih modela u prediktivnom modeliranju i očuvanju baštine. Druga značajna grana arheologije je i forenzička arheologija, specijalizirana za snimanje ljudskih ostataka i proučavanje uvjeta/stanja okoliša, uzoraka tla, botaničkih podataka i stratigrafije. Stručnjaci forenzičke arheologije surađuju s istražnim tijelima ministarstva unutrašnjih poslova i pravosuđa pa temeljem istraživanja i analiza donose zaključke o vremenu ukopa, jer primjerice i boja i stanje tla može koristiti u kriminalističkoj obradi (Meštrović, 2016).

Dok s jedne strane djelovanje čovjeka u prošlosti ostavlja zanimljive ostatke za proučavanje razvoja društva i tehnologije, s druge strane nezbrinuti materijalni ostaci današnjeg života na pojedinim područjima imaju štetan utjecaj, jer uglavnom izazivaju onečišćenje. Detekcijom problema, analizom rješenja i remedijacijom bavi se inženjerstvo okoliša. Onečišćenjem se uglavnom smatra svako djelovanje (mehaničko-fizikalno, kemijsko ili biološko) kojim čovjek ireverzibilno mijenja prirodno stanje okoliša (ili geomedija), odnosno izaziva promjene koje narušavaju sustav održivosti. Remedijacija je moguća tek ponovnim ljudskim aktivnostima kojima se uravnotežuje interakcija zahvata i okoliša. Prema poopćenoj definiciji, onečišćivači (kontaminanti) su

opasne tvari (u bilo kojem agregatnom stanju) koje se mehanički-fizikalno ili kemijsko-biološki povezuju s česticama tla, ispunjavaju porni (ili pukotinski) prostor te trajno mijenjaju njihova svojstva. Razlikuju se dva osnovna tipa onečišćenja okoliša: organski i anorganski tip onečišćenja.

### **Organsko onečišćenje tla**

Ono nastaje određenim organskim molekularnim promjenama, a najčešće se odnosi na „kombinaciju“ ugljikovih atoma s drugim elementima poput vodika, kisika, sumpora, dušika, fosfora te halogenim elementima. Najčešća onečišćenja proizlaze iz naftnih proizvoda koji su po svom sastavu ugljikovodici.

### **Anorgansko onečišćenje tla**

Ono nastaje kada toksični metali ili polumetali, primjerice arsen, bakar, kadmij, olovo, srebro, cink bivaju izloženi industriji ili kada minirano područje dođe u doticaj s vodom. Tada se metali oslobađaju i odlaze u geomedij.

Postoji i onečišćenje kemikalijama kada se kemijska sredstva poput sumporne kiseline, koja se najčešće koristi za odvajanje specifičnog minerala od rude, ispiru, prolijevaju ili kada procure u vodena područja. To je izrazito toksično za ljude i okoliš.

Do kontaminacije najčešće ipak dolazi curenjem iz podzemnih spremnika ugljikovodika, primjenom pesticida ili procjeđivanja onečišćenih površinskih voda u podzemne, ispiranjem otpada iz odlagališta ili pak ispuštanjem industrijskog otpada u tlo. Dakle, najčešće se radi o naftnim ugljikovodicima, otapalima, pesticidima, olovu te teškim metalima koji su štetni za ljudsko zdravlje i ekosustav. Primjerice, i najmanje koncentracije nekih kemikalija imaju štetni utjecaj te djeluju na metabolizam i mijenjaju hranidbeni lanac. Onečišćuju se tokovi i vodonosnici pitke vode te poljoprivredna tla. Kontaminacije najčešće djeluju kancerogeno (Awuah i Mesah, 2012).

Dakle, arheologija proučava navike, kretanja i posljedice aktivnosti ljudi kroz prošlost pojedinog područja. Jedna od grana arheologije je i arheologija okoliša koja proučava interakciju ljudi s okolišem bez obzira radi li se o davnoj prošlosti ili nedavnim zbivanjima i zahvatima. Ljudi nesavjesno i neodgovorno izvode zahvate i inženjerske konstrukcije bez analize dugoročnije interakcije zahvat – konstrukcija – geomedij.

Primjenom metoda arheologije okoliša može se detektirati onečišćenje geomedija te planirati remedijacija i projektirati inženjerska sanacija (Boras, 2017).

## **2.2. Arheološko nalazište i „nalazišta“ onečišćenja**

Zbog klimatskih promjena, onečišćenja okoliša i erozije tla mijenjaju se topografske značajke prostora. Te promjene i pojave nanose štete arheološkim nalazištima i njihovom okolišu. Među najpoznatijim primjerima te problematike je Machu Picchu, drevni grad Inka u Peruu. Citadela u istočnim Kordiljerima na visini 2 430 m nije pošteđena erozije, iako je grad od nastanka imao riješenu odvodnju oborinskih voda. Ubrzanoj degradaciji okoliša tog grada doprinose i brojni posjetitelji. Općenito je zbog opasnosti od novonastalih onečišćenja i mogućeg širenja kontaminacije potrebno izvoditi neinvazivna mjerenja i opažanja parametara koji ukazuju na dimenzije neželjenih i štetnih promjena.

Poznato je da primjena georadara kao neinvazivne metode istraživanja omogućuje procjenu lokacije i stanja vodonosnika ili izvora te preliminarno istraživanje opterećenja okoliša pojedinim mineralima. Neki autori navode i dobre procjene fizičkog stanja i kemijsko-biološkog sastava geomedija, kao i pouzdanu kvalifikaciju izvora onečišćenja te prostor i pravce mogućeg širenja (Awuah i Mesah, 2012). Važno je naglasiti, da unatoč tome što se arheologija većinom bavi istraživanjem materijalnih ostataka, ona proučava i okoliš, mjesto obitavanja i kretanja ljudi te se pri tome susreće sa studijima utjecaja na okoliš. Sastav tla te specifične promjene u njemu mogu ukazati na određene aktivnosti ljudi koje su se odvijale na područjima stanovanja i kretanja. Štoviše, moguće je oblikovati i pretpostavke o društvenom životu i navikama ljudi (Boras, 2017).

Arheološko nalazište, prema općoj definiciji, jest mjesto gdje su pronađeni materijalni dokazi i ostaci nekog povijesnog razdoblja. Struka to mjesto naziva lokalitet na kojem se ljudska aktivnost može promatrati u koncentraciji artefakata i odbačenih sirovina. Dakle, svi nalazi jednog lokaliteta sagledavaju se u okviru šire kulturne cjeline kojoj pripadaju (Meštrović, 2016).

Svaka znanstvena disciplina, pa tako i arheologija ima svoja pravila, posebno kada je riječ o samom načinu istraživanja. Republika Hrvatska je Zakonom o zaštiti i očuvanju

kulturnih dobara (NN 69/99, 151/01, 157/03, 87/09 i 88/10) definirala pravila koja se odnose na zaštitu arheoloških nalazišta. U članku 45. tog Zakona navodi se da se prilikom pronalaska vrijednog nalazišta ili samo indicije na neko od važnih nalazišta, prekida svaka ljudska aktivnost i/ili proces, primjerice gradnja kuće, eksploatacija mineralnih sirovina, obrada zemlje i slično. Potrebno je bez odgađanja obavijestiti nadležno tijelo, a ono se obvezuje u roku od tri dana rješenjem odrediti mjere zaštite i osiguranja nalazišta. Nadležno tijelo će na temelju rješenja privremeno obustaviti radove ili će odobriti nastavak radova po zahtjevu investitora uz određivanje mjera zaštite arheološkog nalazišta. Mjera prvog zahvata prilikom identificiranja nalazišta je njegovo osiguravanje, odnosno označavanje i ograđivanje terena, ograđivanje granica prostora kao zaštita od kontaminacije te određivanje početne točke pristupa. Ono što jamči objektivnost, profesionalnost, sustavnost i iscrpnost rada na arheološkom nalazištu je dokumentacija, kojom se prate sve aktivnosti istraživanja. Iz dokumentacije je vidljiv tempo rada kao i sve primijenjene metode, a zaključci doneseni na određenom lokalitetu mogu se i naknadno provjeravati (Meštrović, 2016).

S druge strane, lokaciju onečišćenja (odnosno nalazište s pozicije inženjerstva okoliša) je svakako potrebno sanirati tako da zadovolji uvjete nove namjene. No prije same sanacije potrebno je provesti istraživanje da bi se utvrdio tip (vrsta i kategorija prijetnje) te volumen onečišćenja. To je preduvjet za izbor primjerenog načina sanacije.

Istraživanje onečišćenog područja se organizira kao forenzičko istraživanje, u nekoliko faza, s jasnim planom i ciljem. Postupak je skup, iziskuje mnogo vremena i vještina iz raznih grana: geologije, hidrologije, kemije i računalstva. Prije mapiranja je potrebno istražiti koja je koncentracija onečišćenja. Europska komisija je odredila regulacijske kriterije, proceduru i modalitet istraživanja pragova kontaminacije. Postoje dvije razine pragova:

1. CSC - Threshold Concentrations - razina iznad koje je potrebno provesti karakterizaciju područja i analizu rizika
2. CSR - Risk Threshold Concentrations - prihvatljiva razina koja se provjerava za svako područje

Onečišćenim područjem se smatra svaki prostor u trenutku kada i najniža koncentracija onečišćenja prelazi CSC razinu. Postoje područja koja imaju potencijal da budu kontaminirana, a to je kada samo na jednom području razina kontaminacije prelazi

CSC. U oba se slučaja pokreće postupak istraživanja i mapiranja područja onečišćenja (Awuah i Mesah, 2012).

Planom istraživanja mora se obuhvatiti nekoliko stavki. Potrebno je utvrditi postojanje onečišćenja i razina onečišćenja u tlu, površinskim i podzemnim vodama te u zraku. Zatim je se izrađuje procjena prisutnosti i količine izvora onečišćenja, predviđaju se mogući načini širenja i pronosa onečišćenih tvari iz izvora onečišćenja prema određenim točkama. Potrebno je što hitnije ograničiti područje u kojem su ukopani otpadni materijali i prikupiti podatke potrebne za procjenu analize rizika.

Također je potrebno utvrditi hidrogeološke i geološke značajke samog lokaliteta radi implementacije konceptualnog modela. Korištenje georadara radi utvrđivanja značajki lokaliteta i onečišćenja predstavlja brzi izvor podataka o tipovima onečišćenja, budući da georadarski profili mogu dati jasne informacije o stanju u tlu. U literaturi (Awuah i Mesah, 2012) se navodi da je prvi korak u istraživanju provjera povijesti područja, kroz dokumentaciju i intervjuje da bi se utvrdila povijest proizvodnje i kemijski i industrijski procesi koji su se odvijali na tom području. No, pojedina je područja moguće interpretirati samo na temelju neposrednog istraživanja lokaliteta, posebno ukoliko nema dokumentacije ili osoba za intervjuje. Tada se arheološkom praksom, znanjima i vještinama mogu utvrditi značajke okoliša i mogućih aktivnosti u prošlosti. Arheološka forenzika otkrit će potrebne podatke za ispravnu sanaciju nalazišta onečišćenja. Dobro složena anamneza vrlo često sugerira postavljanje dijagnoze, odnosno adekvatnih planova i programa remedijacije.

Zanimljivo je da postoje jasni propisi u Republici Hrvatskoj kojima se određuje zaštita arheološkog nalazišta, prekid svih radnji, osiguravanje lokaliteta i poduzimanje prvih mjera za istraživanje u kojima se najčešće koristi georadar kao neinvazivna metoda. No kada je riječ o onečišćenju tla ili voda, koje su neophodne za ljudski život, nema jasnih propisa. Zbog takvih se nejasnih pravila uzroci onečišćenja tla, a potom i pitke vode u Slavenskom Brodu (ožujak, 2018) nisu mogli utvrditi bez dvojbi, na razinama koje bi trebale definirati ekspertize stručnjaka za zaštitu i inženjerstvo okoliša. Zbog složenosti problematike i visokim zahtjevima sigurnosti zaštite i sigurnosti, istraživanje vrste i opsega onečišćenja je trajalo nekoliko mjeseci. Snimanje georadarom bi utvrdilo u vrlo kratkom roku opseg i dubinu onečišćenja (Awuah i Mesah, 2012), kao i sam izvor te ne bi došlo do širenja pogrešnih informacija.



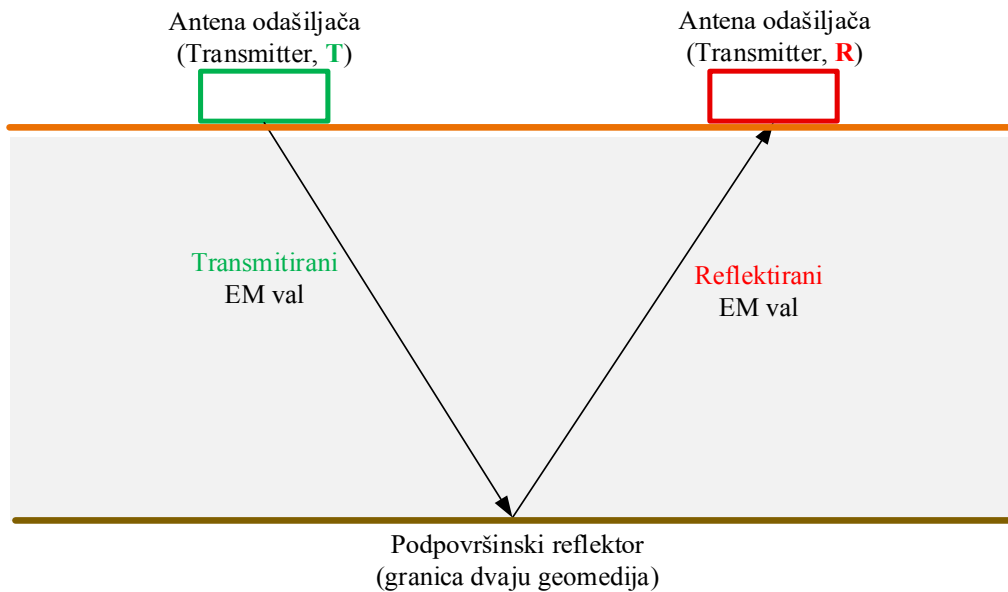
## 3. Georadar

Georadar (GPR, engl. ground penetrating radar) je pokretan elektromagnetski (EM) uređaj (antenski sustav) koji radi na principu odašiljanja i primanja valova različitih frekvencija. Slanjem elektromagnetskih valova u tlo i snimanjem njihovih refleksa s granica-kontakta geomedija različitih EM svojstava, istražuju se njihovi položaji, odnosi i stanja te se detektiraju i kategoriziraju anomalije. Maksimalna dubina prodiranja valova georadara ovisi o centralnoj frekvenciji sustava, a može iznositi nekoliko centimetara ili do par desetaka metara. Dubina prodora ovisi o vodljivosti geomedija (veća vodljivost smanjuje prodor EM valova i kvalitetu refleksa), ali je redovito dostatna za plitka istraživanja odlagališta otpada, građevinskih i arheoloških lokacija, geotehničkih konstrukcija te je jedna od značajnijih geofizičkih neinvazivnih metoda.

Početakom 1990-ih godina, razvojem osobnih računala, omogućeno je snimanje i arhiviranje podataka u digitalnom obliku neophodnom za kasnije obrade i analize. Najznačajniji istraživač tog doba je profesor Goodman, koji je sa svojim suradnicima otkrio važne tehnike analiziranja podataka te razvio kompjuterski simulirane dvodimenzionalne modele i trodimenzionalne rekonstrukcije nalaza ispod površine tla (Conyers i Goodman 1997, prema Conyers, 2004). Noviji softverski programi omogućavaju različite vrste obrade i filtriranja snimaka (radargrama) te naprednije analize i matematičko modeliranje. Georadarsko istraživanje su kao ne-razornu metodu prihvatile različite inženjerske struke, zbog brzine i jednostavnosti terenskog rada te činjenice da osnovna snimka (engl. raw data) može osigurati dovoljno relevantnih podataka o objektu istraživanja i bez naknadnih kompleksnih matematičkih modela.

### 3.1. Princip rada georadara

Georadar je antenski sustav s dvije osnovne antene. Jedna antena (engl. Transmitting Antenna, T) odašilje signal - transmitirani elektromagnetski val u tlo, a druga antena (engl. Receiving Antenna, R) prima reflektirani signal koji se odbija od granice-kontakta dvaju supstanci (geomedija) različite permitivnosti, vodljivosti i magnetske susceptibilnosti, Slika 1.



Slika 1. Princip rada georadara (Izvor: Robinson i dr., 2013).

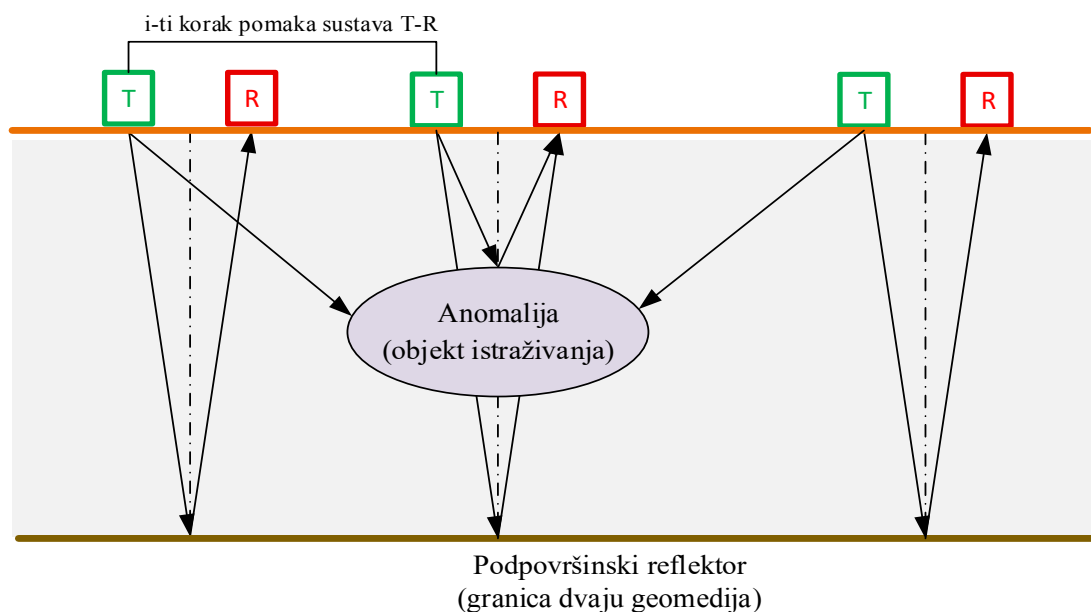
Osnovni princip rada GPR sustava je odašiljanje kratkotrajnih EM pulsova (valova) raznih frekvencija u geomedij (tlo ili stijene). Odašiljač emitira puls, a putujući kroz geomedij on gubi dio svoje energije. Preostali dio energije se reflektira natrag do prijavnika. Elektromagnetski puls se prigušuje zbog različitog položaja predajnika i prijavnika, zbog načina širenja u geomediju, ali i zbog različitih električnih i magnetskih svojstava geomedija. Georadarom se u nekoj točki na površini snima radarski trag reflektiranog vala i mjeri se vrijeme proteklo od početka transmisije do kraja refleksije (engl. two-way-traveltime). Brzina širenja elektromagnetskih valova  $c_m$  u geomediju se izražava kao omjer:

$$c_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

U tom izrazu je  $c$  brzina elektromagnetskih valova u vakuumu (30 cm/ns), a  $\epsilon_r$  je relativna dielektrična permitivnost koja ovisi o vrsti geomedija i veličini frekvencije emitiranog elektromagnetskog pulsa. Vrijednosti  $\epsilon_r$  su u rasponu od 1 za zrak do 81 za vodu, te općenito između 3 i 30 za različite geomedije. Tehnika profiliranja georadarom se sastoji u cikličkom ponavljanju transmisije EM pulsova dok je antena u pokretu. Reflektirani puls se procesira u prijemniku pa se u realnom vremenu stvara kontinuirani profil električnih svojstava geomedija pod površinom. Na taj je način moguće dobiti izravnu stratigrafsku sliku bez potrebe definiranja inicijalnog modela za interpretaciju

podataka. Georadarskim profiliranjem je moguća detekcija lokanih anomalija, odnosno dubine do svježe stijene ili do razine podzemne vode, kao i lociranje naslaga pijeska i šljunka, stijenskih blokova, arheoloških nalazišta, odnosno točkastih i linijskih podzemnih objekata, Slika 2. Zbog toga se georadar kao etablirana geofizička metoda, primjenjuje u građevinarstvu, geologiji, geotehnici i arheologiji.

Ograničenja metode se odnose na primjenu u nevodljivim ili slabo vodljivim materijalima. Dubina penetracije znatno je smanjena u električki vodljivim geomediju kao što je glina. Podzemna voda s otopljenim mineralima se u tom smislu također smatra kao dobar vodič.



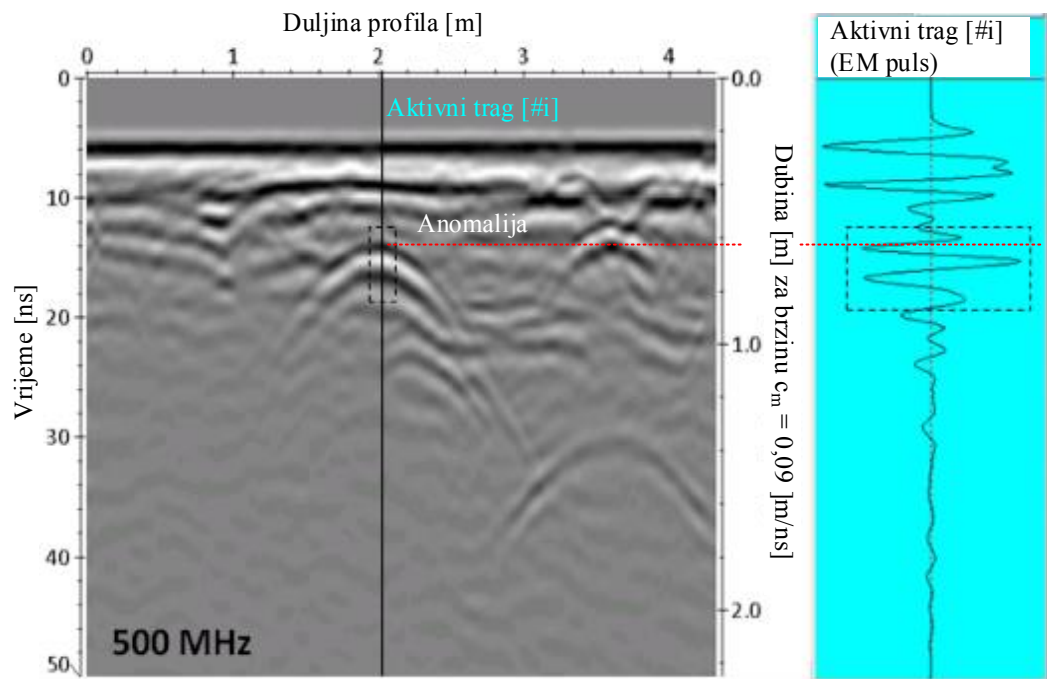
Slika 2. Princip rada georadara odbijanjem od anomalije (Izvor: Robinson i dr., 2013).

U primjeni se kratkotrajno emitiraju EM pulsovi (signali) u rasponu frekvencije otprilike 50% vrijednosti iznad i ispod centralne (operativne) frekvencije georadara. Tipična frekvencija za geološka istraživanja od 100 MHz pokriva spektar od 50 MHz do 150 MHz (Milsom, 2003). Za plitka istraživanja od nekoliko metara koriste se antene osnovne frekvencije 500 MHz ili više. Signal se reflektira i ostavlja tragove (valni zapis refleksa) u zadanom ili odabranom koraku pomaka sustava.

Pri projektiranju istraživanja posebno je važno pretpostaviti potrebnu dubinu zahvata (domet prodora EM pulsa). Dubina georadarskih ispitivanja ovisi o frekvenciji pulsa i električnoj vodljivost geomedija. Promjene u dielektričnosti su osnovno

dijagnostičko svojstvo vrste i stanja geomedija te pojave anomalija. Širenje elektromagnetskih valova ovisi o svojstvima geomedija, početnoj frekvenciji i energiji valova. Najvažniji parametri koji opisuju transmisiju su brzina valova i prigušenje, a oni upravo ovise o dielektričnim svojstvima i otporu geomedija.

Osim lokacije anomalije na radargramu, Slika 2a, moguće je odrediti fizikalna i kemijska svojstva geomedija, jer su oblik i amplituda reflektiranih valova svojstveni za različite supstance (Awuah i Mesah, 2012). Istraživači su zaključili da tragovi većih amplituda ukazuju na mjesto anomalije, dok se oni nižih amplituda mogu zanemariti. Tako se analiza fokusira samo na važne dijelove istražnog prostora u geomediju, odnosno samo na anomalije s pre-definiranim svojstvima (unaprijed su poznata fizikalno-kemijska svojstva objekta istraživanja i svojstven EM zapis)



Slika 2a. Karakteristični izgled anomalije na radargramu. Prikazan je i aktivni pojedinačni trag refleksa (Izvor: Rial i dr., 2009).

Važno je napomenuti da je operativno djelovanje georadara u rasponu od 10 Hz do 1000 MHz i u tom je području brzina elektromagnetskih valova konstantna, prilikom čega ne dolazi do disperzije signala (Strelec i sur., 2012). Zanimljivo je da viša frekvencija brzine vala naravno daje bolju rezoluciju snimke, ali smanjuje maksimalnu

dubinu, no ukoliko je potrebno snimanje na većoj dubini, potrebno je smanjiti frekvencije, ali će rezolucija snimke biti lošija. S toga je važno odrediti koje je podatke potrebno testirati da bi se odredila dubina istraživanja, veličina nalazišta, ali i potrebna rezolucija snimke. Time je definirana uspješnost primjene georadara (Robinson i dr., 2013).

## 4. Georadarska istraživanja i primjena

Na dielektričnost i otpornost geomedija utječu: poroznost, vodopropusnost, diskontinuiteti, temperatura, prisutnost glina, sadržaj i količina otopljenih minerala u vodi, odnosno količina elektrolita u vodi i tlu. Kod nekoherentnih se tla vodljivost mijenja ovisno o sadržaju glinovitih čestica, količini vode u porama, sadržaju elektrolita (koji su najčešće posljedica zagađenja) u vodi i tlu. Koherentna tla (prahovi i gline) su vodljivi geomediji pa zahtijevaju veću pozornost tijekom istraživanja, jer znatno prigušuju signal.

U programu istraživanja važno je obratiti pažnju na nekoliko faktora: vrsta i sastav tla ili stijena, uslojenost i debljina geomedija, ciljana dubina istraživanja, saturacija geomedija, prisutnost metalnih objekata, vrsta površinskog sloja i vrsta vegetacije. Iz ovog je vidljivo da naizgled jednostavan princip djelovanja ovisi o mnogo faktora koji utječu na krajnji rezultat mjerenja i korektnost interpretacije (Conyers, 2004). Primjerice, potrebno je pregledati samo područje prije istraživanja (rekognosciranje terena), jer metalni objekti ili kompozitni objekti velikih dimenzija u blizini istraživanja mogu utjecati na rezultata same metode (Annan and Cosway, 1994, prema Robinson i dr., 2013).

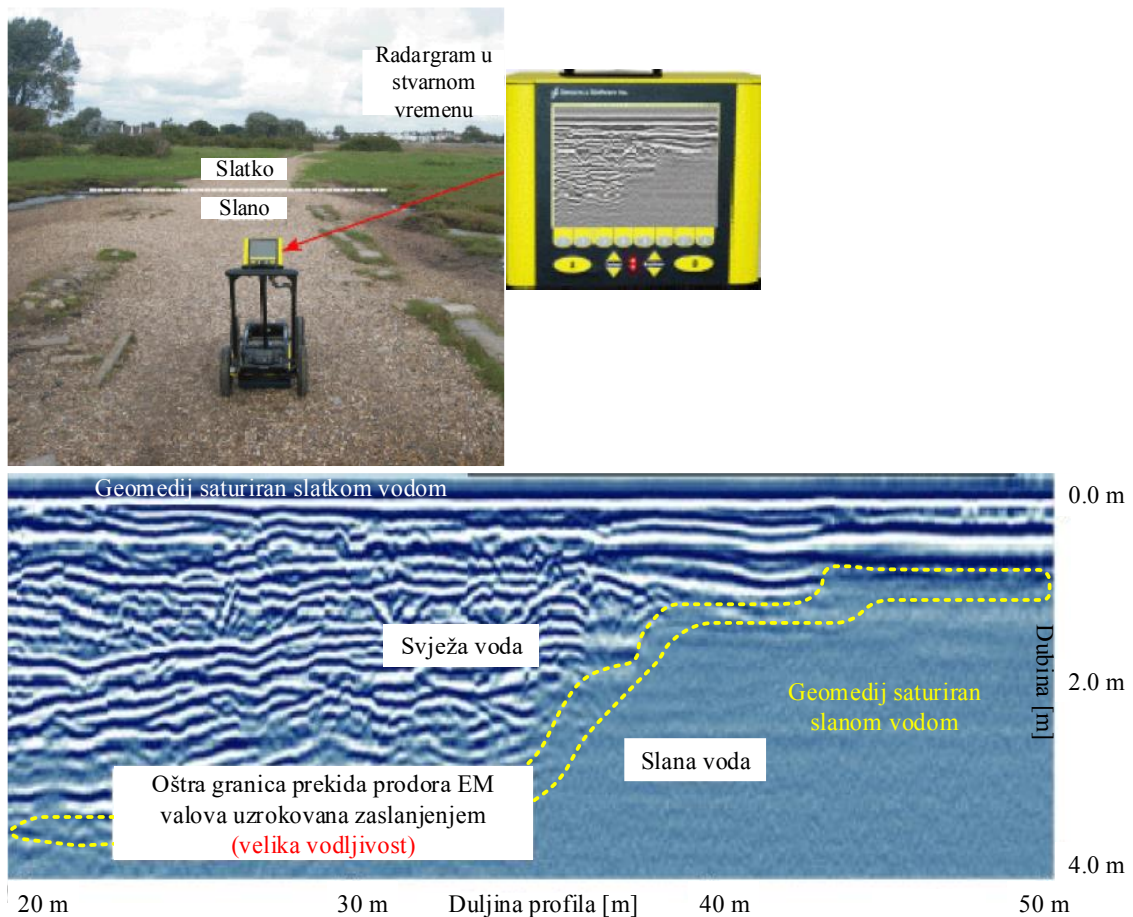
Brzina i prigušenje EM pulsa je određeno svojstvima geomedija i ciljanog objekta istraživanja, a dielektrična konstanta najviše ovisi o sadržaju vode (Purmmalis i sur., 2016). Električna (i posljedično kemijska) svojstva vode imaju najveći utjecaj na vrijednost brzine i prigušenja. Tablica 1. prikazuje relativnu dielektričnost nekih poznatih stijena i tala (geomedija) koji su važni za inženjerstvo okoliša. Za usporedbu: permitivnost zraka je 1, slatke vode je 80, dok slana voda ima permitivnost između 81 i 88.

Tablica 1. : Relativna dielektričnost (permitivnost) nekih geomedija (Antena 100MHz)  
(Izvor: Awauh i Mensah, 2012)

SUPSTANCA GEOMEDIJ	RELATIVNA DIELEKTRIČNOST [1]	SUPSTANCA GEOMEDIJ	RELATIVNA DIELEKTRIČNOS T [1]
Zrak	1	Suhi mulj	3-30
Svježa voda	80	Zasićeni mulj	10-40
Led	3-4	Glinovita tla	5-40
Slana voda	81-88	Permafrost	4-5
Suhi pijesak	3-5	Površinsko tlo	12
Zasićeni pijesak	20-30	Suhi pijesak (obalni)	10
Vulkanski pepeo	4-7	Šumsko tlo	12
Vapnenac	4-8	Poljoprivredno tlo	15
Šljunak	5-15	Beton	6
Granit	5-15	Asfalt	3-5
Ugljen	4-5		

Slika 3. prikazuje osjetljivost georadara na kemijski sastav vode, odnosno jasno uočenu zonu razgraničenja slatke i slane vode. Također potvrđuje činjenicu da se brzina vala smanjuje s povećanjem električne vodljivosti, odnosno da postoji znatan kontrast između permitivnosti 80, za slatku vodu i 81-88 za slanu vodu. Takav kontrast omogućava nedvojbeno delineaciju područja kontakta dvaju geomedija saturirana tekućinama različitog kemijskog sastava.

Georadar se pokazao izrazito pouzdan u istraživanju naslaga suhih pjeskovitih tala, granitnih te karbonatni i sličnih stijena, jer omogućava istraživanje na puno većim dubinama (očekivane dubine su oko 20 m, ali se mogu dosegnuti i veće). Dubina prodora kod glinovitih tala i saturiranih glina je uglavnom za red veličine manja.



Slika 3. Prikaz georadara granice svježe i slane vode (Izvor: Geophysics, 2009).

## 4.1. Primjena georadara

U praksi se georadar pokazao kao metoda posebno uspješna za detekciju anomalija – diskontinuiteta u stijenskim masama. Georadar se zbog toga koristi za mapiranje stratigrafije, detekciju i mapiranje krških objekata, kartiranje mogućih trasa/zona komunikacije podzemne vode, dubinu do svježe stijene, odnosno debljinu trošne zone te detekciju različitih vrsta inkluzija u inženjersko-geološkom prostoru. Primjerno ove geofizičke metode s drugim komplementarnim metodama mogu se dobiti podaci o paleoreljefu te vrijedne informacije o anomalijama, arheološkim artefaktima, u sedimentima iznad njega. Zbog sve boljih rezultata u terenskoj primjeni, ta je geofizička metoda u arheologiji postala primarnim izvorom informacija preliminarnih istraživanja. Osim georadara, sve češće se koriste i druge geofizičke metode: geoelektrična tomografija, magnetometrijske metode za detekciju metala, mapiranje vodljivosti te



mikrogravimetrija. Sondažna iskopavanja su tako postala ciljana neposredna istraživanja kojima se potvrđuju rezultati preliminarnih neinvazivnih metoda.

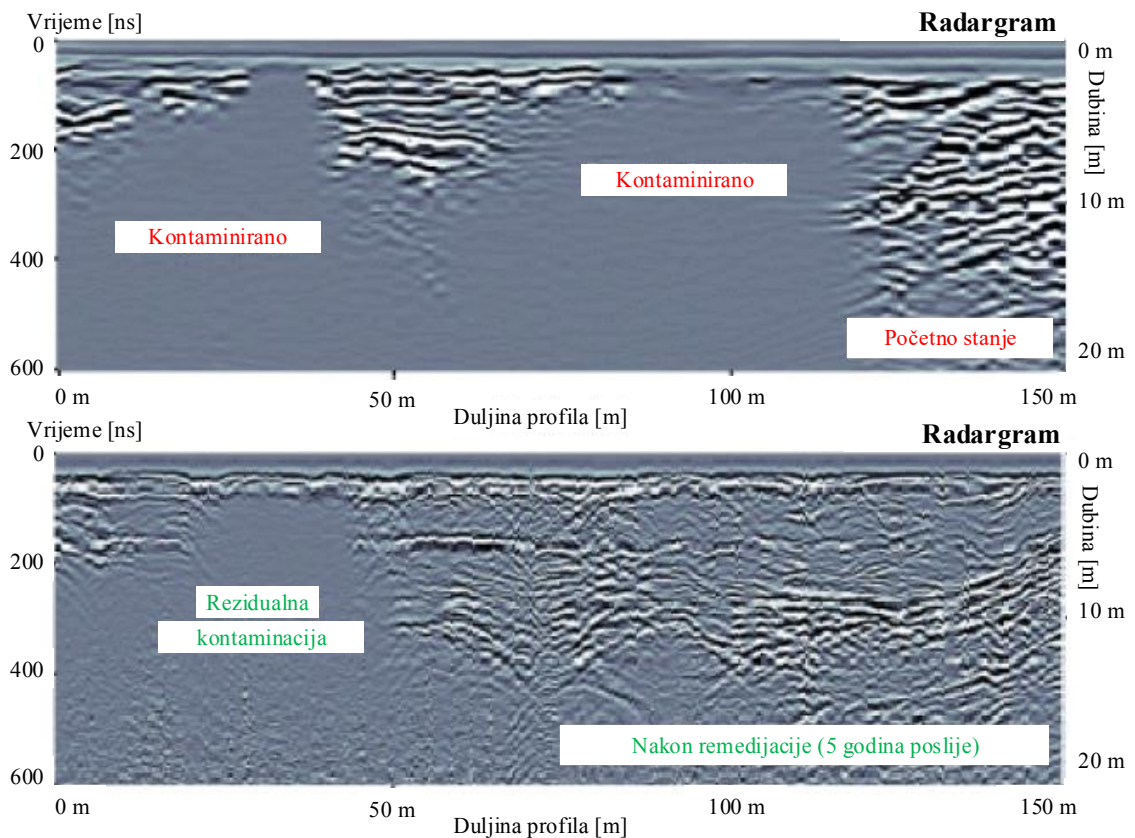
Primjena georadarskih istraživanja navedena je u brojnim primjerima stručne literature, a neke navode autori Bristow i Jol, (2003) (prema Purmalis i sur., 2016).

### **Geološka istraživanja**

Georadar se u geološkim istraživanjima koristi za različite svrhe: mapiranje geoloških formacija, kartiranje aluvijalnih i tektonskih struktura te istraživanje potencijalnih vodonosnika. Primjerice, georadarom je moguće istraživati šupljine, kaverne, jame, ponore u raspucalim i trošnim stijenama te pukotine i njihove sustave u kompaktnijim stijenskim masama. Takva se istraživanja provode pri prospekciji trase tunela ili tijekom njegovog izvođenja da bi se detektirali i determinirali diskontinuiteti u kaloti, zidovima i podini tunela (Mušič, 2009).

Pojavu vode u stijenskim diskontinuitetima ili vodnog lica u nekoherentnim tlima je moguće detektirati georadarskim istraživanjima ako postoje pouzdani podaci o električnim svojstvima vode dobiveni nekim drugim istražnim metodama. Usporedbom i kalibracijom vrijednosti amplituda signala moguće je razlučiti takve zone saturacije geomedija. Za mapiranje tih zona se koristi činjenica da se brzina i amplituda EM valova smanjuju kako se povećava vodljivost vode, odnosno vodonosnog geomedija kao što su pijesci primjerice (Awauh i Mensah, 2012).

Onečišćene podzemne vode pokazuju najveću električnu vodljivost te najbolje apsorbiraju EM valove georadara. To omogućava pouzdanu detekciju i mapiranje zone onečišćenja u geomediju kao što prikazuje Slika 4. S obzirom na relativno visoku rezoluciju radargrama, moguće je izraditi hidrogeološki model podpovršinskih formacija koji je neophodan za predviđanje širenja onečišćenja (Awauh i Mensah, 2012).



Slika 4. Podzemne vode prije i nakon sanacije onečišćenja (Izvor: Geophysys, 2009).

## **Građevinarstvo**

Za inženjerske je konstrukcije posebno važna zona temeljenja u tlu ili stijenama. Georadarskim istraživanjima se može utvrditi debljina sedimenata ili debljina trošne zone. Također se mogu detektirati oslabljene zone, diskontinuiteti i šupljine u stijenskim masama. U prethodno izgrađenim područjima mogu se detektirati ukopani spremnici ili zaostali temelji starih građevina. Za polaganje trase prometne infrastrukture su također važna stabilnost i dobra fizičko-mehanička svojstva temeljnog tla ili stijene (Awauh i Mensah, 2012).

## **Arheologija**

Arheološkim istraživanjima materijalnih ostataka utvrđuje se kronologija događaja u prošlosti, ali se i proučava ponašanje i djelovanje čovjeka kroz prošlost i

njegov pogled i odnos prema društvu i okolišu. Moguće je utvrditi uzroke pojedinih ponašanja, ali i posljedice djelovanja, odnosno utjecaje ponašanja čovjeka na okoliš. Ne istražuju se samo materijalni ostaci, već i okoliš i topografske značajke područja, odnosno lokacije obitavanja i kretanja, što upućuje na način preživljavanja, pa i napretka neke civilizacije.

Primjeri georadarskih istraživanja u arheologiji su vrlo često vezani uz inženjerske konstrukcije ili uz inženjersko-geološka svojstva sredine – okoliša u kojoj nalaze njihovi ostatci. U Danskoj se primjerice takvim istraživanjima utvrdila trasa „prometnica“ i ruta kojom su se u prošlosti kretali Vikinzi (Sensors&SoftwareInc., 2018). Istraživanjem se vrlo brzo utvrdila trasa na dubini od 3 do 4 m te poprečni profil prometnice (širina). Uspjeh je bio to veći, jer su takvi putevi građeni bez naročite pripreme nosive podloge pa su njena slaba mehanička svojstva kroz vrijeme doprinosila bržoj dezintegraciji i srastanju s okolnim tlom.

Pokazalo se da je georadar jednostavan sustav za primjenu na terenu, a omogućuje brzu snimku stanja tla ili stijena pod površinom. Snimljeni podaci mogu se koristiti odmah da bi se istraživači fokusirali na svoje ciljeve. Ukoliko su dopuštena daljnja iskopavanja, ona predstavljaju i stvarnu potvrdu georadarskih istraživanja i interpretacija. U arheologiji posebno dolazi do izražaja usvojeno pravila za provođenje georadarskih istraživanja, pravila posebno važna za istraživanje inženjerskih svojstava geomedija i procjenu stanja onečišćenja: 1) interpretacija rezultata konvergira jedino kada su dobro pretpostavljena svojstva objekta istraživanja (u praksi: ako se „ne zna“ što se traži onda se „to“ ni neće pronaći), 2) bez obzira na iskustvo u primjeni, svako novo istraživanje je novo poglavlje učenja primjene georadara, a rezultate uvijek treba uspoređivati s onima koji su potvrđeni, odnosno na profilima na kojima su poznate anomalne pojave (profili za komparaciju).

Detekcija objekata pod površinom uglavnom ne predstavlja naročite poteškoće, posebno kada postoji značajan kontrast u svojstvima objekta u odnosu na sredinu kojoj se nalazi.

## **Glaciologija**

Georadar se u počecima primjene najviše koristio za mjerenje debljine leda, jer elektromagnetski valovi lako prodiru kroz led. Tim mjerenjima se omogućuje izračunavanje debljine i volumena ledenjaka, a primjer takvog istraživanja su mjerenja Triglavskog ledenjaka (Mušič, 2009).

## **Forenzička arheologija**

Korištenjem georadara mogu se detektirati zakopani predmeti ili tijela, metalni ili nemetalni objekti, poput novca, droge ili oružja. To olakšava posao stručnjacima sudske medicine odnosno forenzike.

Jedan od primjera je istraživanje lokacije posmrtnih ostataka. S obzirom na dezintegraciju ljudskoga tijela koja se povećava s vremenom, u Republici Hrvatskoj se takva istraživanja dijele u tri kategorije: žrtve iz Drugog svjetskog rata i poraća, žrtve iz Domovinskog rata i žrtve nedavnih ubojstava, odnosno neidentificirana tijela. Ovisno o podneblju u kojem se nalaze i mjestima ukopa (pojedinačne ili masovne grobnice), vrlo je teško sa sigurnošću ustanoviti postoje li posmrtni ostaci na nekom području, unatoč postojećim zapisima ili dokumentima. U takvim se prilikama provodi georadarsko istraživanje da bi se odredile konture područja i smanjio volumen prostora na kojem je potrebno provođenje iskapanja i ekshumacije (Meštrović, 2016).

## **Vojska**

Poslije rata redovito ostaje mnogo nejasnoća, kao što su nestali ljudi i predmeti. Georadar se koristi i za detektiranje tunela i bunkera, ali i minsko-eksplozivnih sredstava.

Teško je razgraničiti uporabu georadara na pojedine grane, jer se najčešće radi o preklapanju nekoliko znanstvenih disciplina. Kao što je slučaj s arheologijom i geologijom. Naime, da bi se mogli donositi relevantni zaključci o materijalnim ostacima potrebna su znanja iz geologije: o sastavu tla, uzrocima i posljedicama pojedinih promjena u tlu, oblicima i intenzitetu takvim promjena, kao i o njihovom utjecaju na objekte i artefakte koji su cilj arheološkog zanimanja (Geophysys, 2009).

## 4.2. Primjer georadarskog profiliranja - Petrijanec

Za potrebe ovog rada su korišteni podaci preliminarnih georadarskih istraživanja, akademske razine, provedenih radi utvrđivanja primjerenosti metode za detekciju artefakata u zoni temeljenja stambene građevine. Georadarsko profiliranje je provedeno u području postojeće i utvrđene lokacije arheološkog nalaza zidova povijesnih građevina.

### Opis lokacije

Na području općine Petrijanec, nedaleko od Varaždina, pronađeno je nekoliko arheoloških nalazišta. Naime, u 19. stoljeću je pronađena ostava puna nakita i novca, a nakon toga i dijelovi rimske arhitekture s kupališnim kompleksom i ostava srebra i skoro 30 000 srebernika, a sve upućuje da je u Petrijancu bila rimska postaja Aqua Viva. Najnovije istraživanje je bilo provedeno u dvorištu obiteljske kuće te je ukazalo na višeslojnost naselja: pronađeni su antički nalazi iz 3. stoljeća, slojevi nastambe iz 16. stoljeća te kamena nastamba iz 18. stoljeća, koja je uništena modernom gradnjom. Da bi se izbjegla daljnja oštećivanja lokaliteta, najbolje je u istraživanju koristiti georadar.

### Opis metode

Georadarsko profiliranje terena općenito podrazumijeva dubinske presjeke kroz tlo i stijene, odnosno stratificiranje (geo)medija prema električnim svojstvima. S pojavom GPR uređaja ta se geofizička metoda gotovo nezaobilazno koristi u geotehnici, a sve je značajnija i za arheološka istraživanja, posebno zato što je nedestruktivna. Osnovni princip rada GPR sustava (georadara) je odašiljanje kratkotrajnih elektromagnetskih pulsova (valova) određene frekvencije u geomedij. Odašiljač emitira puls, a putujući kroz geomedij on gubi dio svoje energije. Preostali dio energije se reflektira natrag do prijammnika, koji zajedno s odašiljačem čini antenu. Elektromagnetski puls se prigušuje zbog različitog položaja predajnika i prijammnika, zbog načina širenja u geomediju, ali i zbog različitih električnih svojstava geomedija.

Georadarom se u nekoj točki na površini mjeri vrijeme proteklo od pobude do povratka reflektiranog pulsa, slično kao kod metode seizmičke refleksije. Brzina širenja elektromagnetskih valova  $c_M$  u geomediju se izražava kao omjer brzine

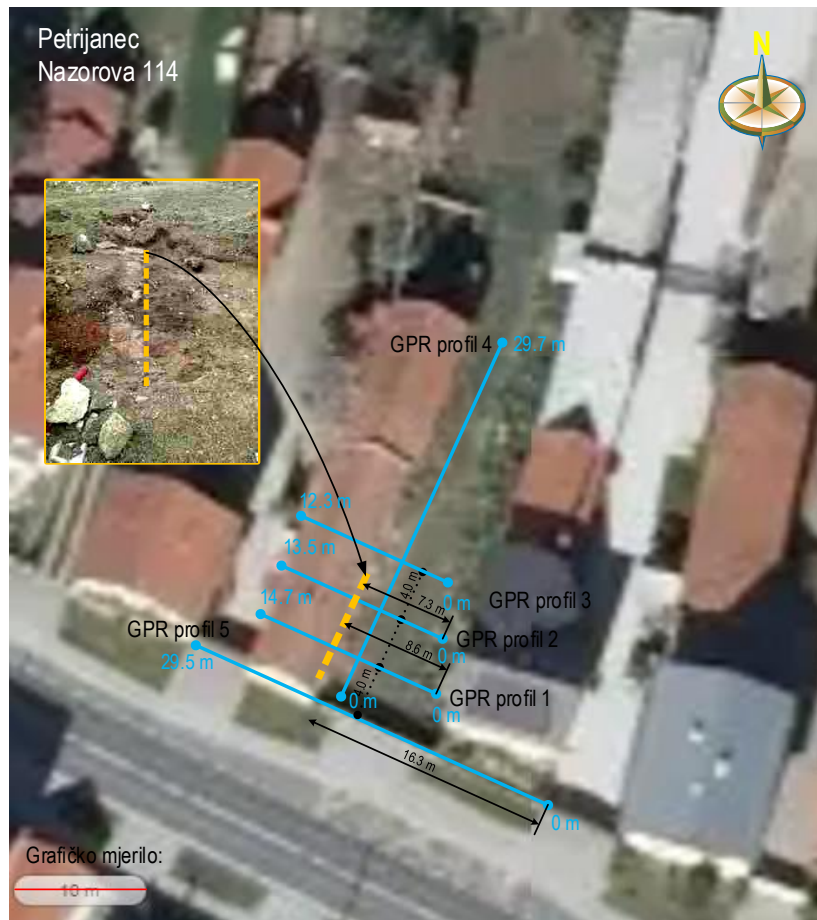
elektromagnetskih valova u vakumu  $c$  (30 cm/ns) i korijena relativne dielektrične permitivnosti  $\epsilon_r$ , koja ovisi o vrsti geomedija i frekvenciji emitiranog elektromagnetskog pulsa ( $c_M = c / \sqrt{\epsilon_r}$ ). Vrijednosti  $\epsilon_r$  su u rasponu od 1 za zrak do 81 za vodu te oko 5 do 10 za stijene.

Tehnika profiliranja georadarom se sastoji u cikličkom ponavljanju transmisije EM pulsova dok je antena u pokretu. Reflektirani puls se procesira u prijemniku pa se u realnom vremenu stvara kontinuirani profil električnih svojstava geomedija pod površinom. Na taj je način moguće dobiti izravnu stratigrafsku sliku bez potrebe definiranja inicijalnog modela za interpretaciju podataka. Dubina penetracije znatno je smanjena u električki vodljivom geomediju kao što je glina ili vodonosnik.

Georadarsko profiliranje se koristi primjerice za: određivanje dubine do osnovne stijene ili do vodnog lica, lociranje naslaga pijeska i šljunka i pojave stijenskih blokova, detekciju lokanih anomalija kao što su materijalni ostaci u arheološkim nalazištima, odnosno točkasti i linijski podzemni objekti. Zbog toga se georadar kao važna geofizička metoda vrlo često primjenjuje u arheologiji radi pozicioniranja podzemnih kanala, iskopa, prostorija, grobnica, temelja i drugih antropogenih konstrukcija. Interpretacija georadarskih snimaka arheoloških lokaliteta nije trivijalna, a može biti i vrlo zahtjevna, no brzo skeniranje terena i radargrami u realnom vremenu mogu postati vrlo pouzdani alati za arheološko rekognosciranje, lociranje i mapiranje anomalija u prostoru, procjenu stanja nalazišta i planiranje otvaranja.

### **Opis istraživanja**

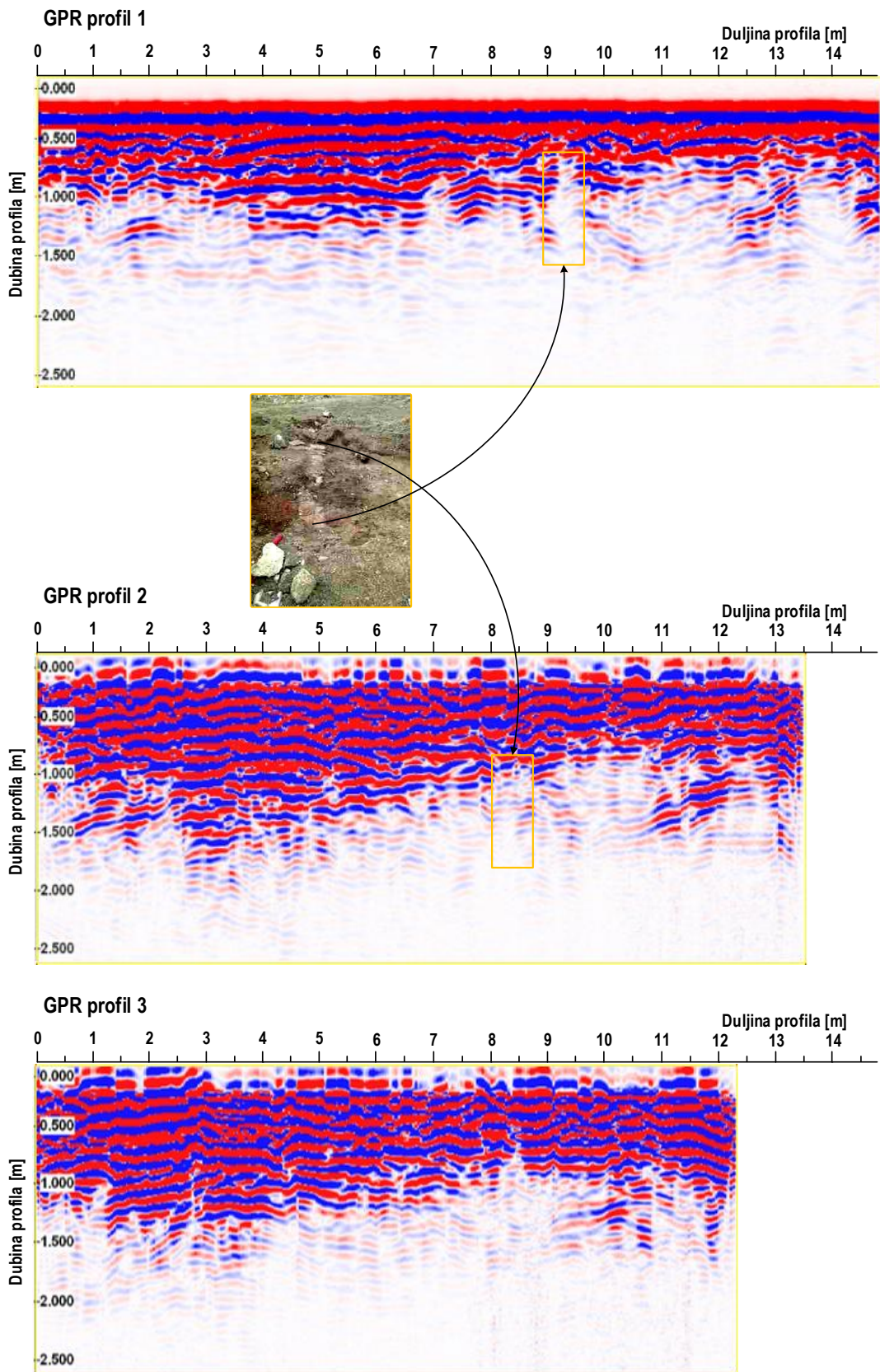
Primjer korištenja georadara za profiliranje, jest istraživanje lokacije na kućnom broju 114 u Ulici Vladimira Nazora u Petrijancu. Istraživanje je provedeno duž 5 GPR profila, kako je prikazao na slici 5., na kojoj je označen i položaj nalazišta, odnosno ukopanog temelja žutom bojom. Duljina GPR profila 1 iznosila je 15 metara, profila 2 13,5 metara, profila 3 12,5 metara, a GPR profila 4 i 5 30 metara. Valja napomenuti da je prva faza istraživanja bio Profil 4, jer na temelju arheoloških nalazišta i dokumentacije nije se znalo ništa što bi se u tlu i na kojem mjestu moglo pojaviti, a zatim su se okomitim profiliranjem na prvu fazu ustanovili da se u tlu nalazi ukopani temelj.



Slika 5. Pozicije pet georadarskih profila (GPR1-GPR5) na arheološkom lokalitetu.

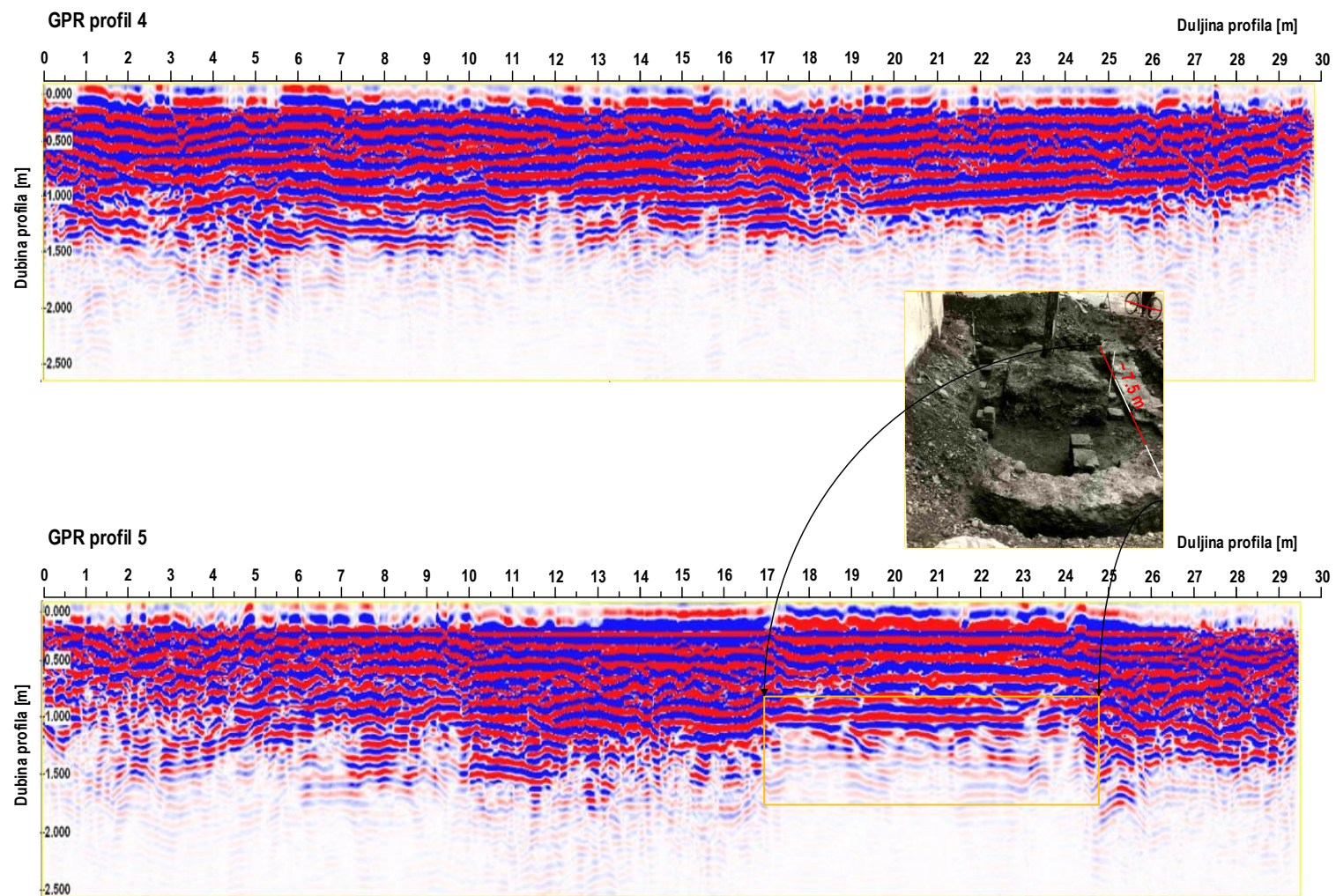
Na slikama 6. i 7. su prikazani radargrami svih pet snimljenih profila. Na GPR profilu 1 i GPR profilu 2 je moguće uočiti naznake ukopanog temelja. Na prvom profilu se temelji nalaze između devetog i desetog metra profila, a temelj se proteže od oko 0,7 metara do 1,60 metara ispod površine tla. Na drugom profilu su ukopani temelji između osmog i devetog metra profila, nešto dublje ispod površine tla, između 0,9 metara i 1,9 metara dubine. Na GPR profilu 3 i GPR profilu 4 nisu vidljivi ukopani temelji, dok GPR profil 5 prikazuje ukopani temelj od sedamnaestog do dvadesetpetog metra profila, na dubini od 0,9 metara do 1,9 metara ispod površine tla. Tim mjerenjem je utvrđeno da je temelj mnogo širi u nekim dijelovima.





Slika 6. Radargrami GPR profila 1, 2, 3.





Slika 7. Radargrami GPR profila 4 i 5.

## 5. Georadar kao pametna i održiva tehnologija

Krajem lipnja 2018. godine je u Splitu održana treća internacionalna konferencija na temu pametnih i održivih tehnologija, a sastavni dio je bila i radionica o primjeni georadara i vezanih znanosti.

Ono što Lara Pajewski i Dragan Poljak kao organizatori radionice napominju jest da se georadar zbog jednostavnosti i praktičnosti može koristiti u brojnim područjima, od arheologije i forenzike, do pronalaska mina i građevinarstva općenito, te se iz tog razloga unatrag 5 godina intenzivno radilo na promociji i popularizaciji korištenja georadara. S obzirom da se češća primjena georadara u građevinarstvu pokazala kao kvalitetnija i jeftinija metoda istraživanja, ova je takozvana COST Action proglašena uspješnom i tako interdisciplinarno povezala građevinarstvo i geofiziku. Upravo zbog takve uspješnosti, cilj radionice je bio povezati znanstvenike i inženjere različitih disciplina i sektora u svrhu razmjene dobre prakse u istraživanju i primjeni georadara (Pajewski i Poljak, 2018).

Autorica Pajewski govori o korištenju radara u svrhu pronalaska, zaštite i očuvanja kulturne baštine, budući da je 2018. godina Europska godina kulturne baštine. Upravo kulturna baština govori o različitosti, ali i zajedničkoj povijesti naroda, bogatstvu kulture koje su stvorile današnju Europu te je iz tog razloga potrebno i očuvati nalazišta. Georadar je neinvazivna, a precizna metoda kojom se stvaraju jasne slike nalazišta ispod površine zemlje. Georadarom se može pronaći i mapirati arheološke artefakte, istražiti drevne građevine, mostove, statue, freske, mozaike i dekoracije, ali se može istraživati i geološke i biološke značajke područja, kao što su primjerice glečeri, pješćane dine, fosilni ostaci i slično.

Prilikom jednog istraživanja značajnosti georadara, korišten je georadar u kombinaciji s drugim neinvazivnim metodama u svrhu istraživanja arheoloških nalazišta i ostalih povijesnih značajki od 13. stoljeća prije Krista, pa do modernog doba (istraživanje je uključivalo i grobnice i katedrale, mostove i statue). Prepoznata važnost georadara je njegova učinkovitost. Sama njegova vanjska struktura (kompaktnost, prenosivost), ali i složenost elektromagnetskog djelovanja, omogućuje stvaranje slika

kompleksnih struktura nalaza i oblika nalaza, lokaliteta i geofizičkih parametara i slično. Članovi TU1208 COST-a su prepoznali mogućnost doprinosa georadara na području kulturne baštine, a samim time povezali su se brojni stručnjaci iz različitih sektora (Pajewski i Poljak, 2018).

Simona Fontul, jedna od predavačica, važnost georadar je prepoznala i u svrhu upravljanja, odnosno planiranja određenih promjena na već postojećim prometnim infrastrukturama. Smatra se brzom i djelotvornom tehnikom za procjenu stanja postojeće infrastrukture, čime se zamjenjuje ili smanjuje dosadašnje korištenje metode bušenja. Korištenjem neinvazivnih metoda testiranja utječe se na smanjenje ekonomskih izdataka i potrebnog vremena testiranja, čime je faza kontrole kvalitete osigurana za dobru gospodarsku politiku. Korištenjem radara na cestama i prugama, za vrijeme izgradnje i kontrole, odnosi se na mjerenje debljine slojeva i otkrivanje promjena u strukturi, kao i sastav materijala i defekte kao što je primjerice loša odvodnja ili sedimentacija. Zaključak je da bi razvoj georadara u vidu antena s većim frekvencijama, kvalitetnijim softverom i novim algoritmima, omogućili svakodnevnu primjenu georadara. Ista autorica navodi da je primjena georadara potrebna i u afričkim zemljama kako bi se utvrdilo stanje postojećih infrastrukture i planirala izgradnja novih ili obnova postojećih. Prepoznaje važnost georadara i u građevinarstvu i prometnim infrastrukturama, ali i u geologiju i onečišćenjima vode i slično te navodi da je potrebno koristiti georadar s drugim razvijenim metodama kako bi se do 2030. godine stvorio održivi razvoj, regionalni, ali i na razini države (Pajewski i Poljak, 2018).

Slično navodi i Damir Varevac, koji prepoznaje potencijal georadara u građevinarstvu, odnosno, smatra da se ovom neinvazivnom metodom može utvrditi stanje elemenata i materijala postojećih drvnih, betonskih i zidarskih struktura (pukotine, praznine, čelične šipke), bez oštećenja vibracijama, radijacijama i slično.

Zaključno se može reći da je georadar prepoznat kao efikasna metoda istraživanja u raznim granama i sektorima. Osim što je jednostavan za primjenu i omogućuje precizne rezultate, korištenje georadara ne stvara velike troškove, a rezultati su vidljivi u kratkom roku. Time je njegova primjena idealna i za građevinarstvo i arheologiju, ali i za ostala područja u kojima je potrebno istraživati strukture pojedinih lokaliteta, primjerice prometnih infrastrukture (Pajewski i Poljak, 2018).

## 6. Zaključak

Arheologija i inženjerstvo okoliša su vrlo povezane znanstvene discipline. Obje proučavaju ono što se nalazi ispod površine tla i obje su vrlo značajne za održivi razvoj društva. Arheologija obuhvaća istraživanje materijalnih ostataka, ali se bavi i proučavanjem geomedija radi preciznijeg definiranja vremenskog tijeka od ukopa do pronalaska. Istraživanja i dobiveni podaci omogućuju arheološku teoriju i zaključke o kronologiji povijesti, navikama i kretanjima ljudi, kulturi i promjenama koje su dovele čovječanstvo u današnjicu. Iako je arheologija započela iz interesa ljudi o prošlosti, nalazi arheoloških istraživanja imaju značajan utjecaj na stvaranje nacionalnog ponosa i identiteta. Arheologija se u zadnje vrijeme sve češće veže i uz inženjerstvo okoliša, koje se primarno bavi istraživanjima štetnih anomalija u tlu i njihovih proporcija, te znanjima i vještinama utječe na prepoznavanje određenih pojava, identificiranje onečišćenja tla i uzroke onečišćenja tla. U svom se radu, arheologija isprepliće s geofizičkom metodom georadara, jer se takvim istraživanjima mogu pouzdano oblikovati slike stana anomalija/artefakata, odnosno objekata istraživanja ispod površine tla.

Primjena georadara u arheologiji, ali i u inženjerstvu okoliša ima brojne prednosti, a jedna od njih i možda najvažnija je da je georadar kao uređaj i princip rada nedestruktivan, odnosno, odašiljanje valova ne oštećuje niti mijenja stanje ciljanog objekta ili sredine u kojoj se nalazi. Osim toga, mjerenja se provode u prirodnom stanju, nalazi se ne diraju niti se oštećuju. Sama mjerenja se mogu izvesti i više puta s istom opremom i s istim parametrima mjerenja. Mjerenja omogućuju brzi i egzaktn pregled terena te brzu dostupnost podataka. Interpretacija radargrama olakšava donošenje zaključaka o lokaciji i stanju objekata koji se nalaze pod površinom tla. Iz opsega i učinkovitosti georadarskih istraživanja vrlo je razvidno da predstoji još intenzivniji razvoj ove metode, od poboljšanja tehničkih performansi sustava, novih konfiguracija terenskih procedura mjerenja i georeferenciranja pa do primjene novih matematičko-fizikalnih modela neophodnih za više dimenzionalne interpretacije u prostoru i vremenu.

Brojni istraživači georadar vide kao pametnu tehnologiju budućnosti, koja je primjenjiva na više područja, pa može pridonijeti i razvoju kvalitete života i bolje sanacije/remedijacije prostora u kojem živimo. Tehnologije i softverskog dijela, za što jednostavniju primjenu i čitanje rezultata.

# Popis literature

1. Awuah, A., Mensah, R.K. (2012). *Application of Ground Penetrating Radar in detecting soil contaminants*. Thesis. Milano: Politecnico di Milano, Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale.
2. Bašić, Ž. (2017). Sveučilišni odjel za forenzične znanosti – O projektu. [Online]. Dostupno na:  
<http://forenzika.unist.hr/HRZZSTRUNAFuNK/Oprojektu/tabid/1526/Default.aspx> [2.9.2018.]
3. Boras, J. (2017). Arheološka topografija Đakovštine: uloga geovizualizacije u interpretaciji podataka. *Zbornik muzeja Đakovštine*, 19-46.
4. Conyers, L.B. (2004). *Ground-penetrating radar for Archaeology*. Oxford: Altamira Press.
5. Fernando I., Rial, F. I., Lorenzo, H., Pereira, M. and Armesto, J. (2009) Waveform Analysis of UWB GPR Antennas. *Sensors* 2009, 9(3), 1454-1470.
6. Geophysics (2009). *E4: Applications of ground-penetrating radar*. [Online]. Dostupno na: <https://sites.ualberta.ca/~unsworth/UA-classes/223/notes223/223E4-2009.pdf> [19.8.2018.]
7. Gudelj, I. (2014). Prikaz časopisa Inženjerstvo okoliša. *Hrvatske vode*, 22, 404-405.
8. Meštović, N. (2016). Forenzična arheologija. *Policajska sigurnost*. 25(2), 205-213.
9. Milsom, J. (2003). *Field Geophysics*. London: University Collage London. [Online]. Dostupno na:  
[https://books.google.de/books?id=T7CKj8bqVlwC&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.de/books?id=T7CKj8bqVlwC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false). [27.6.2018.]
10. Mušič, B. (2009). *Arheološka geofizika: Treći dio, Georadarska metoda. Priručnik za studente*. Ljubljana: Odsjek za arheologiju Filozofskog fakulteta Sveučilišta u Ljubljani.
11. Pajewski, L., Poljak, D. (2018). Workshop on Applications od Ground Penetrating Radar (GPR) and Related Science. Split.

12. Pravilnik o arheološkim istraživanjima. (2010). Narodne novine 102. [Online].  
Dostupno na: <http://www.propisi.hr/print.php?id=10562> [26.6.2018.]
13. Purmalis, O., Alksnis, A., Taškova, J., Burlakovs, J. (2016). Ground-penetrating radar (GPR) screening in shallow estuary and Pape Lagoon Lakes. *Research for rural development*, 1, 228-235.
14. Robinson, M., Bristow, Ch., McKinley, J., Ruffell, A. (2013). *Ground Penetrating Radar*. Geomorphological Technique, Part 1. British Society for Geomorphology: London.
15. Strelec, S. S., Jug, J., Smrečki, D. (2012) *Podpovršinski istražni radovi (interna skripta)*. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet. [Online].  
Dostupno na: <https://docslide.net/documents/podpovrsinski-istrazni-radovi.html> [27.6.2018.]
16. Zakon o zaštiti i očuvanju kulturnih dobara. (2010). Narodne novine 69/99, 151/01, 157/03, 87/09 i 88/10. [Online]. Dostupno na:  
<https://www.zakon.hr/z/340/Zakon-o-za%C5%A1titi-i-o%C4%8Duvanju-kulturnih-dobara> [26.6.2018.]

# Popis slika

Slika 1. Princip rada georadara (Izvor: Robinson i dr., 2013). .....	10
Slika 2. Princip rada georadara odbijanjem od anomalije (Izvor: Robinson i dr., 2013).....	11
Slika 2a. Karakteristični izgled anomalije na radargramu. Prikazan je i aktivni pojedinačni trag refleksa (Izvor: Rial i dr., 2009).....	12
Slika 3. Prikaz georadara granice svježe i slane vode (Izvor: Geopshysics, 2009).....	16
Slika 4. Podzemne vode prije i nakon sanacije onečišćenja (Izvor: Geopshysics, 2009).....	18
Slika 5. Pozicije pet georadarskih profila (GPR1-GPR5) na arheološkom lokalitetu.....	23
Slika 6. Radargrami GPR profila 1, 2, 3. ....	24
Slika 7. Radargrami GPR profila 4 i 5. ....	25

# Popis tablica

Tablica 1. : Relativna dielektričnost (permitivnost) nekih geomedija (Antena 100MHz) (Izvor: Awauh i Mensah, 2012).....	15
---	----



# Izjava o akademskoj čestitosti

---

**Peić, Matija**

## **Supplement / Prilog**

*Publication year / Godina izdavanja:* **2018**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:961807>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-10-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

### GEORADARSKA ISTRAŽIVANJA U ARHEOLOGIJI

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te izrađen pod mentorstvom **doc.dr.sc. Maria Gazdeka**.

Izjavljujem da ni jedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 7. 9. 2018.

MATIJA PEIĆ

(Ime i prezime)

46113164938

(OIB)

Peić M.

(Vlastoručni potpis)